«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

№ 1 (67), 2024 г.

Основан в 2012 г. It is based in 2012.

Выходит 6 раз в год 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

ЛОБАЧЕВСКИЙ 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 end transportation engineering, Univercity of Genoa, Italy, Ph.D., Associate Professor

VIGDOROVITSCH Michael – Geschäftsführer ANGARA GmbH, Düsseldorf, Deutschland, doktor fiziko-matematicheskih 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
№ 1 (67), 2024 г.
Основанв 2012 г. **It is based in 2012.**
Выходит 6 раз в год **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.
№ 1 (67). Дата выхода в свет 29.02.2024. 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: viitin@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

Ли Р.И., Киба М.Р., Гребеньков Д.В., Ерохин В.Е.
ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА 3-D ПЕЧАТИ ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ 7

Зазуля А.Н., Даниленко Ж.Н., Макаров В.А., Макарова О.В.
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОКУЧИВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С МУЛЬЧИРУЮЩИМ РЕАКТИВНЫМ УСТРОЙСТВОМ В ГРЕБНЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ 16

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

Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В.
ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ТРИЕРНОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРНА К РЕЖИМАМ РАБОТЫ.....23

Ерохин Г.Н., Коновский В.В.
МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ПРИ УБОРКЕ СОИ 32

Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина Т.В.
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МАНЕВРЕННОСТЬ ТРАКТОРА СО ВСЕМИ УПРАВЛЯЕМЫМИ КОЛЕСАМИ.....40

Мещерякова Ю.В., Нагорнов С.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ СМЕСИТЕЛЕ 48

Ревенко В.Ю., Скорляков В.И., Юрина Т.А.
СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ НА ПОЧВУ С ДИФФЕРЕНЦИАЦИЕЙ ПО ДЛИНЕ ПРОХОДА 57

Бондарчук А.В., Коваль М.В.
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОСЕВА ДРАЖИРОВАННЫХ СЕМЯН САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ВЫСЕВАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.....66

МЕТОДЫ РАСЧЕТА, МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОНЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ, РОБОТИЗИРОВАННЫХ И БИОМАШИННЫХ СИСТЕМ

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 76

Пожидаев И.А., Головин А.Д., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОЗОНА С ЗЕРНОМ..... ..90

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

Доровских В.И., Шулаев Г.М., Милушев Р.К., Жариков В.С.
АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОРМЛЕНИЯ ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ КОРОВ..... 102

МЕХАНИЗИРОВАННЫЕ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ И РОБОТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П.
РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ 110

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

Мусин Л.И., Гизутдинов К.Р., Ахмадуллин Р.М., Нигматуллина Л.Ш., Лопухов Л.В., Спирягин В.В.
РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА ТРИГЛИЦЕРИДА КАПРОНОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ БИОДИЗЕЛЯ 118

CONTENTS

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

Li R., Kiba M., Grebenkov D., Erokhin V.
OPTIMIZATION OF 3-D MODE PRINTING OF TURBINE STIRRER FOR DISPERSING SOLUTIONS POLYMER COMPOSITES 7

Zazulya A., Danilenko Zh., Makarov V., Makarova O.
THE EFFICIENCY OF USING HILLING WORKING OGANS WITH A MULCHING DEVICE IN THE COMB TECHNOLOGY OF POTATO CULTIVATION 16

METHODS AND TOOLS FOR OPTIMIZING TECHNOLOGIES, PARAMETERS AND OPERATION MODES OF MACHINERY AND EQUIPMENT

Tishaninov N., Anashkin A., Emelyanovich S.
ASSESSMENT OF THE SENSITIVITY OF THE TRIER GRAIN CLEANING PROCESS TO OPERATING MODES 23

Erokhin G., Konovskiy V.
MODEL FOR ASSESSING LOSSES IN SOYBEAN HARVEST 32

Belyaev A., Orobinsky V., Trishina T.
ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON TRACTOR ANEUVERABILITY WITH ALL STEERABLE WHEELS 40

Meshcheryakova Yu., Nagornov S.
INVESTIGATION OF THE CAVITATION PROCESS IN AN ULTRASONIC MIXER 48

Revenko V., Skorlyakov V., Yurina T.
COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF GRAIN HARVESTS SOIL COMBINES WITH DIFFERENTIATION ACCORDING TO PASSAGE LENGTH 57

Bondarchuk A., Koval M.
THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SOWING SUGAR BEET SEEDS WITH A PNEUMATIC SOWING SYSTEM 66

METHODS OF CALCULATION, MODELING AND OPTIMIZATION OF COMPONENTS OF AUTOMATED, ROBOTIC AND BIOMACHINE SYSTEMS

Golovin A., Pozhidaev I., Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenko A.
THEORETICAL PREREQUISITES FOR DETERMINING THE SHAPE AND SIZE OF THE OZONE DISTRIBUTION CENTER IN A GRAIN HEAP 76

Pozhidaev I., Golovin A., Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenko A.
THEORETICAL ASPECTS OF OZONE-GRAIN INTERACTION 90

PHYSICAL, MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF MECHANIZED, AUTOMATED, ROBOTIC AND BIOMACHINE SYSTEMS

Dorovskikh V., Shulaev G., Milushev R., Zharikov V.
ALGORITHM FOR MANAGING THE QUALITY OF FEEDING FOR HIGH-YIELDING COWS 102

MECHANIZED, AUTOMATED AND ROBOTIC TECHNOLOGIES AND TECHNICAL TOOLS FOR THE AGRICULTURAL INDUSTRIAL COMPLEX

Gadzhiev P., Ramazanova G., Gadzhiev I.
DEVELOPMENT OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY AND TECHNICAL MEANS FOR POTATO CULTIVATION 110

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

Musin L., Gizutdinov K., Akhmadullin R., Nigmatullina L., Lopukhov L., Spiryagin V.
DEVELOPMENT METHOD OF THE SYNTHESIS OF CAPROIC ACID TRIGLYCERIDE FOR BIODISEL..... 118

Тип статьи: научная
УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-7-15

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА 3-D ПЕЧАТИ ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Роман Иннакентьевич Ли [1], ***Мария Романовна Киба*** [2],
Дмитрий Васильевич Гребеньков [3], ***Виктор Евгеньевич Ерохин*** [4]
[1,3,4] *Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*
[1] romanlee@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-4880-6081
[3]https://orcid.org/0000-0003-3045-7434, [4]https://orcid.org/ 0000-0003-3997-2563
[2] *Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия*
[2] https://orcid.org/0000-0001-9999-8146

Автор, ответственный за переписку: Роман Иннакентьевич Ли, romanlee@list.ru
Corresponding author: Roman Li, romanlee@list.ru

Реферат. *Конструкция турбинной мешалки отличается достаточно сложной формой рабочих поверхностей и при ее изготовлении традиционными способами необходимы уникальные пресс-формы для каждого типоразмера мешалки, требуются повышенные материальные и трудовые затраты. Применение 3D печати позволяет получать изделия со сложной конфигурацией поверхности, с минимальными затратами и которые не требуют в последствии механической обработки. Проведен анализ и осуществлен выбор типа 3D печати и материала турбинной мешалки, предназначенной для смешения компонентов растворов эластомерных нанокомпозитов. Для решения конструкторских и технологических задач при изготовлении турбинных мешалок наиболее подходящим типом 3D печати является FDM (Fused Deposition Modeling). Весьма широкое распространение при данном типе 3D печати получили пластики марок: ABS, PLA и PETG. Наиболее высокие механические свойства, химическую стойкость и наименьшую цену из рассматриваемых материалов имеет пластик PETG, который выбрали для изготовления турбинной мешалки, предназначенной для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов. Реализован активный эксперимент по плану B_2. Параметром оптимизации выбрали прочность образцов, изготовленных методом 3D печати при различных технологических режимах. Образцы это пластины из пластика PETG, напечатанные на 3D принтере марки Flying Bear Ghost 5. Основными режимными параметрами 3D печати по типу FDM, определяющими прочность образцов и производительность печати являются: количество концентрических линий, составляющих стенку печатаемого изделия и ширина линии. Получена регрессионная модель зависимости прочности образцов, изготовленных из пластика PETG, от количества и ширины линий при 3D печати. Установлен оптимальный режим 3D печати турбинной мешалки, обеспечивающий высокую прочность изделия и производительность технологии.*

Ключевые слова: *полимерный композит, раствор, турбинная мешалка, 3D печать, технология.*

OPTIMIZATION OF 3-D MODE PRINTING OF TURBINE STIRRER FOR DISPERSING SOLUTIONS POLYMER COMPOSITES

Roman Li [1], ***Maria Kiba*** [2], ***Dmitry Grebenkov*** [3], ***Viktor Erokhin*** [4]
[1,3,4] *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia*
[1] romanlee@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-4880-6081
[3]https://orcid.org/0000-0003-3045-7434, [4]https://orcid.org/ 0000-0003-3997-2563
[2] *St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia*

[2] https://orcid.org/0000-0001-9999-8146

Abstract. *The design of the turbine stirrer is characterized by a rather complex shape of working surfaces and during its manufacture by traditional methods unique molds are required for each type of stirrer, increased material and labor costs are required. The use of 3D printing allows you to obtain products with a complex surface configuration, with minimal costs and which do not require subsequent machining. Analysis was carried out and selection of 3D printing type and material of turbine stirrer intended for mixing of elastomeric nanocomposite solutions components was carried out. FDM (Fused Deposition Modeling) is the most suitable type of 3D printing for solving design and technological problems in the manufacture of turbine stirrers. Plastics of the brands ABS, PLA and PETG have become very widespread in this type of 3D printing. The highest mechanical properties, chemical resistance and the lowest price of the materials under consideration are PETG plastic, which was chosen for the manufacture of a turbine stirrer designed to mix and disperse solutions of elastomeric nanocomposites. An active experiment was implemented according to the B_2 plan. The samples are PETG plastic plates printed on a Flying Bear Ghost 5 3D printer. The main mode parameters of 3D printing by FDM type, which determine the strength of samples and printing performance, are: the number of concentric lines that make up the wall of the printed product and the line width. A regression model of the dependence of strength of samples made of PETG plastic on the number and width of lines in 3D printing was obtained. The optimal 3D printing mode of the turbine stirrer is set, providing high strength of the product and performance of the technology.*

Keywords: *polymer composite, solution, turbine stirrer, 3D printing, technology*.

Для цитирования: Ли Р.И., Киба М.Р., Гребеньков Д.В., Ерохин В.Е. Оптимизация режима 3-D печати тербинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 7-15. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-7-15.

For citation: Li R., Kiba M., Grebenkov D., Erokhin V. Optimization of 3-D mode printing of turbine stirrer for dispersing solutions polymer composites. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 7-15. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-7-15.

Введение. Применение современных технологий восстановления изношенных деталей позволяет существенно повысить их ресурс значительно уменьшить затраты на ремонт сельскохозяйственной техники [1-14]. Высокий технико-экономический эффект проявляется при восстановлении изношенных посадочных отверстий корпусных деталей растворами полимерных композитов. Это увеличение ресурса подшипниковых узлов и корпусных деталей после восстановления и большая экономия денежных средств, обусловленная низкой себестоимостью технологии восстановления. Эффективное восстановление посадок подшипников обеспечивается в случае, когда полимерный материал обладает высокими механическими и теплофизическими свойствами, достигаемыми при равномерном распределении частиц наполнителя по объему полимерной матрицы. При не однородном распределении частиц, наличии их агрегатов в растворе полимера резко ухудшаются эксплуатационные свойства композита. Чтобы избежать вышеупомянутых негативных явлений растворы полимерных композитов следует подвергать ультразвуковой или механической обработке. Смешение и диспергирование растворов полимерных композитов в аппаратах с турбинными мешалками отличается простотой технологии, обеспечивает существенное повышение механических и теплофизических свойств материалов, предназначенных для восстановления изношенных корпусных деталей [15-16].

В ЛГТУ разработана конструкция и определены оптимальные конструктивные параметры турбинной мешалки для смешения и диспергирования растворов полимерных композитов [17]. Конструкция турбинной мешалки обладает достаточно сложной формой рабочих поверхностей и для ее производства традиционными способами необходимо изготовление уникальных пресс-форм для каждого типоразмера мешалки, повышенные материальные и трудовые затраты. Использование 3D печати позволяет получать изделия со сложной конфигурацией поверхности, с минимальными затратами и которые не требуют в последствии механической обработки [18].

Цель исследований – провести анализ и осуществить выбор типа 3D печати и материала турбинной мешалки, экспериментально исследовать влияние режимов 3D печати на механические свойства образцов, определить рациональный режим 3D печати турбинной мешалки.

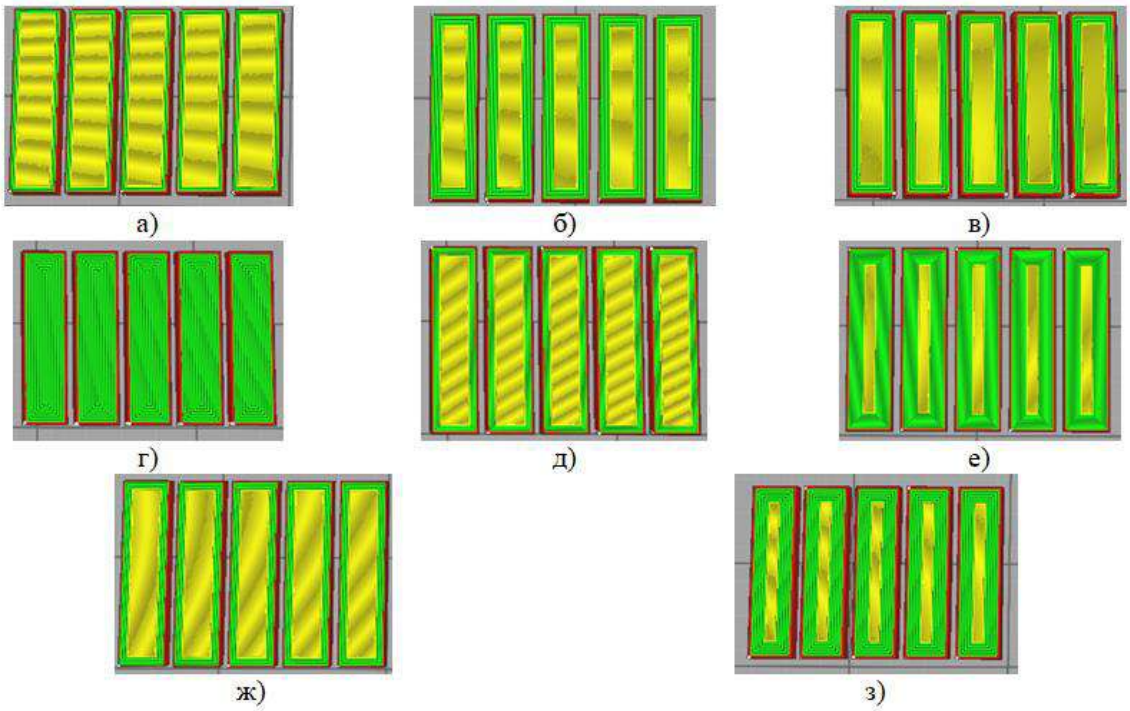
Материалы и методы. В качестве оценочного критерия использовали прочность образцов, изготовленных методом 3D печати при различных технологических режимах. Образцы изготовлены в виде пластин на 3D принтере марки Flying Bear Ghost 5 из материала PETG (рисунок 1). Размеры образца: $50 \times 12{,}8 \times 5{,}0$ мм. Повторность – 5.

Методика испытания образцов: «Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50. При этом вели запись диаграммы "нагрузка-деформация". Скорость нагружения при испытаниях составляла 5 мм/мин и была постоянной.

Прочность образцов σ рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{F_P}{A},$$

где F_P – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь поперечного сечения образца, мм^2» [7].



а) опыт №1; б) опыт №2; в) опыт №3; г) опыт №4; д) опыт №5; е) опыт №6; ж) опыт №7; з) опыт №8

Рисунок 1 – Образцы, изготовленные на 3D принтере марки Flying Bear Ghost 5 при различных режимах (таблица 5)

Для определения оптимального режима 3D печати турбинной мешалки спланировали активный эксперимент по плану B_2. Факторы и интервалы варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение фактора	Уровни варьирования фактора			Интервал варьирования
		нижний	нулевой	верхний	
Количество концентрических линий, составляющих стенку изделия	X_1	4	6	8	2
Ширина линии, мм	X_2	0,4	0,6	0,8	0,2

Результаты и обсуждение. Различают два основных типа 3D печати: Fused Deposition Modeling (FDM), использующий пластиковый филамент для нанесения слоев, и Stereolithography (SLA), где ультрафиолетовые светодиоды отверждают жидкую смолу [18].

Для конструкторских задач, требующих прочности, жесткости и экономичности, наиболее подходящим типом 3D печати является FDM. Способ печати основан на нагревании и выталкивании пластичного материала через сопло для создания трехмерного объекта слой за слоем.

Популярные расходные материалы для 3D печати включают в себя пластики марок: ABS, PLA и PETG. Каждый материал обладает своими уникальными свойствами. В таблице 2 представлены характеристики пластиков.

Таблица 2 – Характеристики пластиков для 3D печати

Характеристика пластика	Марка пластика		
	PETG	ABS	PLA
Температура печати, °С	200 – 235	220 – 250	180 – 220
Температура платформы, °С	65 – 80	80 – 110	40 – 60
Токсичность	Низкая	Высокая	Низкая
Предельная температура эксплуатации, °С	80	110	50
Усадка, %	0,2 – 0,6	0,4 – 2,0	0,3 – 0,5
Стойкость к УФ излучению	Высокая	Средняя	Низкая
Химическая стойкость,	Высокая	Средняя	Низкая
Растворитель	дихлорэтан	дихлорэтан, ацетон этилацетат	дихлорэтан, ацетон этилацетат
Влагопоглощение, %	0,8 – 1,2%	0,2 – 0,4	0,2 – 0,4
Плотность, г/см³	1,26 – 1,28	1,02 – 1,06	1,23 – 1,25
Деформация, %	50 – 150	10 – 50	5 – 10
Цена, руб/грамм	0,66	0,8	0,9

Материал турбинной мешалки должен отвечать определенным требованиям в соответствии с особенностями смешиваемых и диспергируемых компонентов (таблицы 3 и 4).

Таблица 3 – Состав и характеристики лака Ф-40 [19]

№ п/п	Наименование параметра	Единица измерения	Значение
1	Смола ФКУ (феноло-формальдегидная смола на основе замещенного фенола винилацетиленовой структуры)	масс.%	8
2	Каучук синтетический бутадиен-нитрильный марки СКН-40С	масс.%	12
3	Ацетон технический (ГОСТ 2768-84)	масс.%	80
4	Массовая доля сухого остатка	%	20
5	Прочность связи со сталью при сдвиге	МПа	5,0

Таблица 4 – Параметры нанопорошка алюминия [20]

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Значения
1	Среднеарифметический размер частиц	нм	50…70
2	Насыпная плотность	г/см^3	0,07
3	Точка плавления	^{o}C	640
4	Содержание активного алюминия	%	90
5	Удельная поверхность	м^2/г	24,5

В виду того, что процесс смешения компонентов осуществляется в помещении при комнатной температуре предельная температура эксплуатации для мешалки не играет принципиального значения. Все рассматриваемые пластики этому критерию отбора соответствуют (таблица 2).

В качестве наполнителя в эластомерном композите используют наночастицы алюминия (таблица 4). Особенностью частиц является малый размер, высокая удельная поверхность и склонность к агрегированию. Поэтому для разрушения агрегатов наночастиц смешение и диспергирование компонентов выполняют при высокой частоте вращения мешалки n = 1300 мин$^{-1}$ [17]. Для обеспечения высокой долговечности мешалки ее материал должен иметь высокие механические свойства.

Лак Ф-40 (ТУ 6-06-246-92) поставляется ОАО «НИИ пластических масс им. Г. С. Петрова» в виде раствора (таблица 3). Особенностью данного раствора эластомера является ацетон, содержание которого достигает 80%. Поэтому материал турбинной мешалки должен обладать высокой химической стойкостью и не растворяться в ацетоне.

Наиболее высокие механические свойства, химическую стойкость и наименьшую цену из рассматриваемых материалов имеет пластик PETG. Поэтому этот пластик выбрали в качестве материала для изготовления турбинной мешалки, предназначенной для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов.

Анализ литературных источников показал, что основными режимными параметрами 3D печати по типу FDM, определяющими прочность образцов и производительность печати являются: количество концентрических линий, составляющих стенку печатаемого изделия X_1 и ширина линии X_2.

Реализован активный эксперимент по плану B_2. В таблице 5 показаны матрица плана и результаты эксперимента.

Таблица 5 – План B_2 и результаты активного эксперимента

№ п/п	Факторы		Опытное значение отклика			Среднее значение отклика $\bar{Y}_g$, МПа	Расчетное значение отклика $\hat{Y}_g$, МПа	Дисперсия, S_g^2
	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3			
1	-1	-1	31,45	31,93	31,49	31,6242	31,5359	0,0078
2	+1	-1	35,95	35,83	35,87	35,8803	35,8651	0,0002
3	-1	+1	33,74	33,93	33,96	33,8792	33,8944	0,0002
4	+1	+1	37,82	37,37	37,43	37,5403	37,6285	0,0078
5	-1	0	36,83	36,31	36,08	36,4061	36,4791	0,0053
6	+1	0	40,71	40,29	40,75	40,5837	40,5107	0,0053
7	0	-1	36,40	36,57	36,94	36,6345	36,7380	0,0107
8	0	+1	38,79	38,99	38,93	38,9024	38,7989	0,0107

Проведен регрессионный анализ результатов эксперимента, итоги которого показаны в таблице 6. Методика регрессионного анализа: «однородность дисперсий оценивали по критерию Кохрена, значимость коэффициентов регрессии сравнением с соответствующими доверительными

интервалами, работоспособность по коэффициенту детерминации R^2, адекватность регрессионной модели по критерию Фишера, координаты экстремума взятием частных производных по каждому фактору в регрессионной модели и приравниванием выражений к нулю, в заключении провели каноническое преобразование регрессионной модели и по ней построили двумерное сечение поверхности отклика» [21].

Таблица 6 – Результаты регрессионного анализа

Критерий Кохрена		Критерий Фишера		Коэффициент детерминации R^2
Табличное значение, G_m	Расчетное значение, G_p	Табличное значение, F_m	Расчетное значение, F_p	
0,51	0,3321	3,01	1,29	0,9978
Дисперсии однородны		Регрессионная модель адекватна		Регрессионная модель работоспособна

В итоге получили зависимость прочности Y образцов, изготовленных из пластика PETG, от количества концентрических линий, составляющих стенку печатаемого изделия X_1 и ширины линии X_2.

Регрессионная модель в натуральных единицах

$$Y = -30{,}158 + 10{,}343 \cdot x_1 + 120{,}3 \cdot x_2 - 0{,}372 \cdot x_1 x_2 - 0{,}7593 \cdot x_1^2 - 94{,}09 \cdot x_2^2$$

На рисунке 2 показана поверхность, а на рисунке 3 – двумерное сечение поверхности отклика.

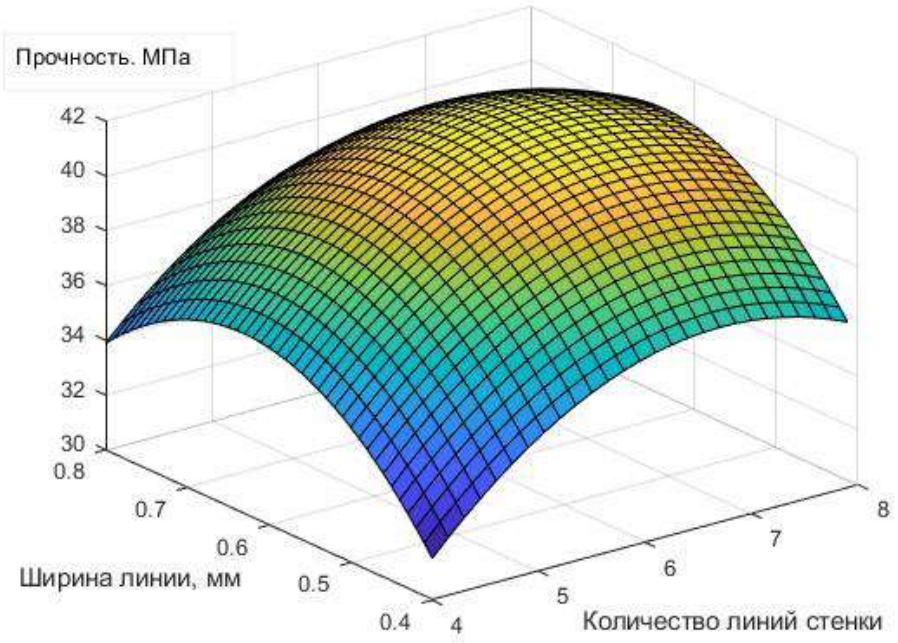


Рисунок 2 – Поверхность отклика

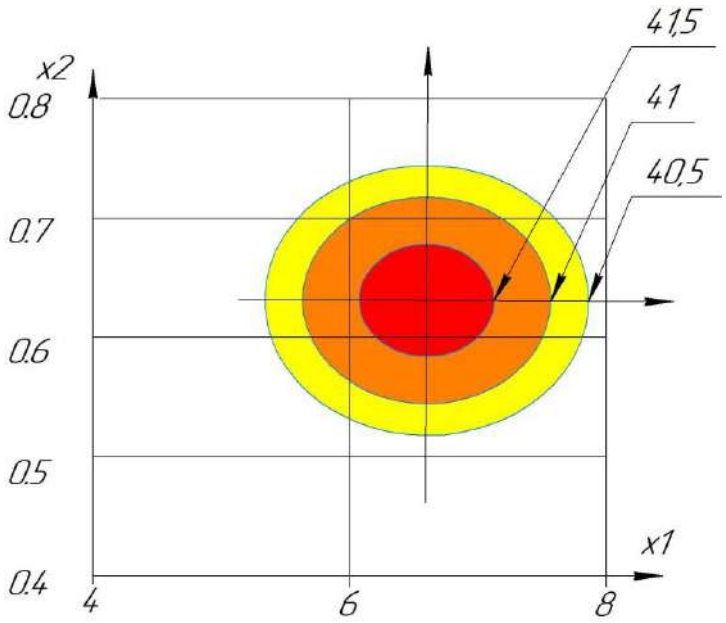


Рисунок 3 – Двумерное сечение поверхности отклика

Выводы:

1. Определен тип 3D печати и материал для изготовления турбинной мешалки, предназначенной для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов,

2. Получена регрессионная модель зависимости прочности образцов, изготовленных из пластика PETG, от количества концентрических линий, составляющих стенку печатаемого изделия X_1 и ширины линии X_2.

Установлен оптимальный режим 3D печати турбинной мешалки, обеспечивающий высокую прочность изделия и производительность технологии.

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 нанокомпозиты : 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. Щупляка. 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 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.

18. Гончарова Ю.А. Реновация технических средств с использованием 3D-печати полимерных запасных частей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Гончарова Ю.А. – Москва, 2017. – 188 с.

19. https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html.

20. www.nanosized-powders.com.

21. Ли, Р. И. Основы научных исследований: Учеб. пособие / Р. И. Ли. – Липецк: ЛГГУ, 2013. – 190 с.

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. Chernoivanov, 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. Mikhailyuk, A. E. Development of elastomeric materials based on ethylene-propylene rubbers modified with highly dispersed metal particles: dis. ...cand. tech. Sciences / Mikhailyuk 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. – T. 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 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.

18. Goncharova Yu.A. Renovation of technical equipment using 3D printing of polymer spare parts: dis. ...cand. tech. Sciences: 05.20.03: / Goncharova Yu.A. – Moscow, 2017. – 188 p.

19. https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html

20. www.nanosize-powders.com

21. Lee, R.I. Fundamentals of scientific research: Textbook. allowance / R.I. Lee. – Lipetsk: Leningrad State University for Humanities, 2013. – 190 p.

Информация об авторах

Р. И. Ли – доктор технических наук, профессор; М. Р. Киба – кандидат технических наук;
Д. В. Гребеньков – кандидат технических наук, доцент; В. Е. Ерохин – аспирант.

Information about the authors

R. Li – Doctor of Technical Science, Professor; M. Kiba – Candidate of Technical Science;
D. Grebenkov – Candidate of Technical Science, Associate Professor; V. Erokhin – Post Graduate 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): 23.12.2023 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.317
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-16-22

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОКУЧИВАЮЩИХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С МУЛЬЧИРУЮЩИМ РЕАКТИВНЫМ УСТРОЙСТВОМ В ГРЕБНЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ

Александр Николаевич Зазуля [1]***, Жанна Николаевна Даниленко*** [2]***,***
Валентин Алексеевич Макаров [3]***, Ольга Владимировна Макарова*** [4]
[1]*Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Табмов, Российская Федерация*
[1]zazulja_an@rambler.ru
[2,3] *Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, г. Рязань, Российская Федерация*
[2]danilenko.zhanna@bk.ru, [3]va_makarov@rambler.ru
[4]*Академия права и управления ФСИН России, г. Рязань, Российская Федерация*
[4]m_ov+2302@bk.ru

Автор ответственный за переписку: Валентин Алексеевич Макаров, va_makarov@rambler.ru
Corresponding author: Valentin Makarov, va_makarov@rambler.ru

Реферат. *Дан анализ машин и оборудования для окучивания посадок картофеля, рассмотрены сроки проведения технологических операций по окучиванию, начиная от довсходового периода до смыкания ботвы в гребнях и рядках. Рассмотрены геометрические формы грядки в процессе окучивания картофеля в виде рисунков по фазам развития и высоте растений. Для реализации задачи предлагается окучник с устройством для мульчирования поверхности гребня, позволяющий сохранить клубненосное гнездо от перегрева в жаркую погоду, уничтожить прорастающие сорняки и сохранить влагу в гребне. Это окучник с закрылками, за корпусом которых установлены измельчающие устройства в виде вращающихся дисков с пальцами отвала, установленными на оси. Штанга с пружиной для копирования мульчирующим устройством поверхности гребня установлена под углом в закрылках корпуса окучника с шагом, равным удвоенному диаметру пальцев измельчающего устройства. Отмечается, что использование предлагаемого окучивающего устройства позволяет выполнить за один проход междурядную обработку, совместить операцию по разрушения подрезаемого почвенного пласта и его измельчению, уничтожению сорной растительности и мульчированию поверхности гребня. Результаты исследования применения экспериментального окучника на практике показывают, что в создаваемом мелкокомковатом слое гребня из почвы происходит насыщение его кислородом воздуха, который ускоряет, происходящие в нём анаэробные и аэробные процессы, способствующие ускоренному разложению и минерализации органического вещества почвы. Проведено сравнение показателей работы серийного и экспериментального окучников. Установлено, что экспериментальный окучник позволяет работать культиватору на повышенных скоростях до 2,6 м/с и создать укрытие гребня мульчирующим слоем почвы в 3 – 4 см, с величиной комков на поверхностном слое гребня в 1-1,5 см, уничтожать всходы сорняков в гребне до 95 %. В ходе исследований установлено, что эффективность от внедрения экспериментального окучника повысит урожайность картофеля на 5-7%.*

Ключевые слова: *почва, картофель, окучник, гребень, мульчирующее устройство, урожайность.*

THE EFFICIENCY OF USING HILLING WORKING OGANS WITH A MULCHING DEVICE IN THE COMB TECHNOLOGY OF POTATO CULTIVATION

Alexander Zazulya [1]***, Zhanna Danilenko*** [2]***, Valentin Makarov*** [3]***, Olga Makarova*** [4]

[1]*All-Russian Research Institute for the Use of Technology and oil products in agriculture, Tabmov, Russian Federation*
[1]zazulja_an@rambler.ru
[2,3]*Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostycheva, Ryazan, Russian Federation*
[2]danilenko.zhanna@bk.ru, [3]va_makarov@rambler.ru
[4] *Academy of Law and Administration of the Federal Penitentiary Service of Russia, Ryazan, Russian Federation*
[4]m_ov+2302@bk.ru

Abstract. *An analysis of machines and equipment for hilling potato plantings is given, the timing of technological hilling operations is considered, starting from the pre-emergence period until the tops are closed in ridges and rows. The geometric shapes of the bed during the process of hilling potatoes are considered in the form of drawings according to the phases of development and height of the plants. To implement the task, a Hiller with a device for mulching the surface of the ridge is proposed, which allows you to keep the tuberous nest from overheating in hot weather, destroy germinating weeds and retain moisture in the ridge, it is proposed to be used to implement the task. This is a hiller with flaps, behind the body of which grinding devices are installed in the form of rotating disks with blade fingers mounted on an axis. A rod with a spring for copying the surface of the ridge by the mulching device is installed at an angle in the flaps of the hiller body with a pitch equal to twice the diameter of the fingers of the chopping device. It is noted that the use of the proposed hilling device makes it possible to perform inter-row cultivation in one pass, combine the operation of destroying the pruned soil layer and crushing it, destroying weeds and mulching the surface of the ridge. The results of a study of the use of an experimental hiller in practice show that in the created fine-lumpy ridge layer from the soil, it is saturated with air oxygen, which accelerates the anaerobic and aerobic processes occurring in it, contributing to the accelerated decomposition and mineralization of soil organic matter. A comparison of the performance indicators of serial and experimental hillers has been carried out. It has been established that the experimental hiller allows the cultivator to operate at increased speeds of up to 2.6 m/s and to create a cover of the ridge with a mulching layer of soil of 3–4 cm, with the size of lumps on the surface layer of the ridge of 1–1.5 cm, to destroy weed seedlings in comb up to 95%. During the research, it was found that the effectiveness of the introduction of an experimental hiller will increase potato yields by 5-7%.*

Keywords: *soil, potatoes, spud, comb, mulching device, yield.*

Для цитирования: Зазуля А.Н., Даниленко Ж.Н., Макаров В.А., Макарова О.В. Эффективность использования окучивающих рабочих органов с мульчирующим реактивным устройством в гребневой технологии возделывания картофеля // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 16-22. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-16-22.

For citation: Zazulya A., Danilenko Zh., Makarov V., Makarova O. The efficiency of using hilling working ogans with a mulching device in the comb technology of potato cultivaton. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 16-22. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-16-22.

Введение. Для получения высокого урожая в гребневой технологии возделывания картофеля, важно своевременно проводить не менее, чем 2-3-х кратное окучивание в сезон с созданием и поддержанием рыхлого почвенного слоя в зоне развития клубневого гнезда в течение периода вегетации. В этом плане, при изучении тенденций развития конструкций рабочих органов, следует отметить, что создание новых окучивающих рабочих органов должно реализовываться за счёт более эффективного воздействия на почву и создания мелкокомковатой почвы в гребне. Установлено, что для этого, в культиваторах для окучивания картофеля используются пассивные и активные (фрезерные) окучивающие рабочие органы. Однако, используемые культиваторы с активными рабочими органами имеют сложную конструкцию с приводом от ВОМ трактора и обладают высокой энергоёмкостью процесса. Совершенствование процесса окучивания, в этом

плане можно достигнуть путём создания новых пассивных рабочих органов. Разработки могут быть реализовываться при создании рабочего органа ротационного принципа воздействия на почву в гребне и технологии возделывания картофеля. Для снижения энергоёмкости процесса в культиваторах следует использовать ротационные органы с реактивным приводом (то есть от самой почвы). Такие машины должны быть оснащены рабочими органами: для окучивания с мульчированием поверхности гребня с крошением комков и глыб в верхнем её слое. Такое решение позволит культиваторам работать со скоростями движения агрегата для 15 км/час, благодаря чему реактивные рабочие органы находят применение в агрегатах для обработки гребней картофеля. Глубину обработки почвы при окучивании определяют с помощью линейки (ГОСТ 427—75). Линейку погружают вглубь до необработанного слоя. Замеры делаются не менее чем в 10 точках с равными промежутками. Среднеарифметическая величина всех измерений является фактическим значением показателя. Точность измерения ± 0,5 см. Высоту гребней измеряют от нижней стороны рейки, наложенной поперек гребня, до дна борозды.

Материал и методы. Указанная задача по окучиванию грядок картофеля с мульчированием поверхности в окучивающих корпусах с отвалами между пальцами решается установлением ротационных рыхлителей в виде пальцев на дисках, которые одновременно измельчают почву на глубину до 3 - 4 см. Дисковые роторы с пальцами установлены в пазах стрельчатого окучника и дополнительно измельчают почву между этими пальцами. Для рассмотрения процесса измельчения почвенных комков при движении по крылу с пальчатой поверхностью окучника пальцы дисков, установленные на валу по винтовой линии и при перекатывании в слое почвы разрушают, её на более мелкие частицы по ходу движения в направлении вращения дисков. В процессе исследования при окучивании картофеля устанавливалась степень крошения комков почвы в гребне, в зависимости от параметров реактивного диска, формы его пальцев, скорости передвижения самого культиватора, оснащённого реактивными дисками.

Окучивание картофеля осуществляется агрегатом, состоящим из трактора тягового класса 1, 4 и культиватора КОН-2, 8 с устройством для формирования и мульчирования поверхности гребня. Довсходовая обработка посадок картофеля заключалась в рыхлении почвы с окучиванием при формировании гребней по рядкам. В послевсходовый период проводится рыхление почвы (междурядий и откосов гребней) и окучивание растений. Окучивание начинают при достижении растениями высоты 18—20 см (± 3 см), заканчивают перед смыканием ботвы. Последнее окучивание проводится обязательно, а предшествующие — в условиях недостаточного увлажнения заменяются рыхлением. Высота гребней, перед смыканием ботвы, в рядках должна быть: для супесчаных почв при оптимальности влажности 18—20 см; для суглинистых почв 23—25 см. Допустимое отклонение гребней по высоте, в вертикальной плоскости ± 3 см. Для формирования гребней при окучивании картофеля, создания мелкокомковатой структуры почвы, оптимального водно-воздушного баланса в почве необходимы технические средства для обработки с уничтожением сорняков на поверхности почвы грядки [1-3]. Геометрическая форма грядки, обрабатываемой рабочими органами (окучниками) в технологии возделывания картофеля представлена на рисунке 1.

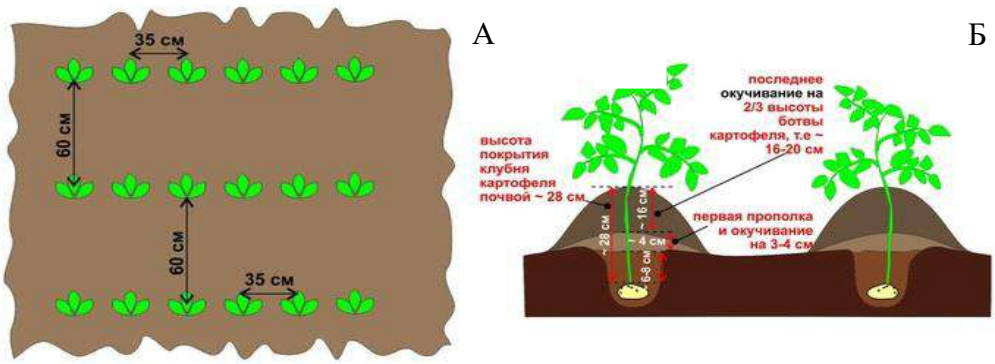


Рисунок 1 - Схема посадки картофеля А, и схема окучивания картофеля Б.

Результаты и обсуждение. Техническое решение заключается в том, что повышение качественных показателей рабочего органа окучника осуществляется путем предотвращения забивания промежутков между прутками комками почвы, камнями и сорняками, путем обеспечения вычесывания корней сорных растений, рыхления боковых поверхностей гребней для обеспечения воздушного и водного режима гребней. Техническое решение достигается тем, что рабочий орган окучника содержит криволинейную стойку со стрельчатой лапой, корпуса окучника и отвалами, а отвалы изготовлены с закрылками, за корпусом установлены измельчающие устройства, изготовленные в виде вращающихся дисков с жестко закрепленными пальцами и установленными на оси, которые закреплены за отвалами на закрылках в верхней и нижней части опорами, причем ось измельчающего устройства установлена под углом к закрылкам корпуса окучника, и закрылки корпуса выполнены с прорезями, изготовленными с шагом, равным удвоенному диаметру пальцев измельчающего устройства (рисунок 2), за корпусом между закрылками установлена штанга, снабженная пружиной (рисунок 3).

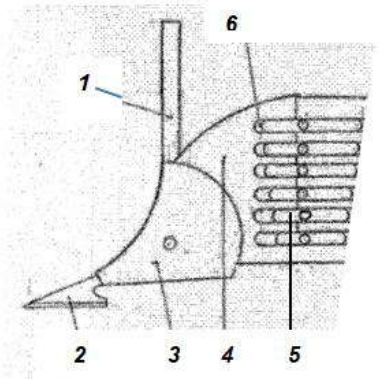


Рисунок 2 - Окучивающий рабочий орган
Вид сбоку

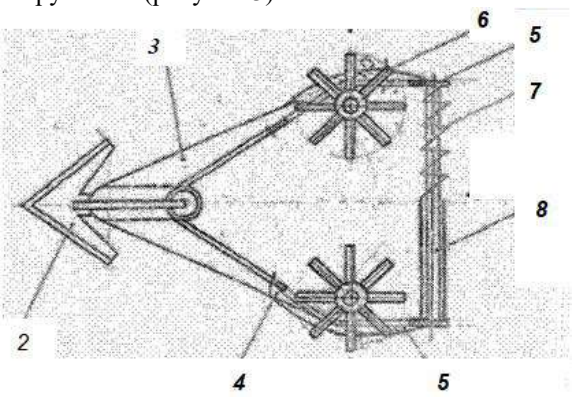


Рисунок 3 - Окучивающий корпус с рыхлителями
Вид сверху

Отвалы рабочего органа окучника 2 изготовлены с закрылками. 3. За каждым отвалом рабочего органа окучника установлено измельчающее устройство 6. Измельчающие устройства изготовлены в виде вращающихся дисков, на которых жестко закреплены пальцы. Каждый вращающийся диск, на котором жестко закреплены пальцами. Ось каждого измельчающегося устройства установлена за отвалом корпуса окучника. Ось измельчающего устройства закреплена к отвалам корпуса окучника в верхней и нижней части опорами. Ось измельчающего устройства установлена под углом к закрылкам корпуса окучника. Закрылки корпуса окучника 4 изготовлены с прорезями 6. Прорези на закрылке корпуса окучника изготовлены с шагом, равным удвоенному диаметру пальцев измельчающего устройства. Между закрылками установлена штанга 8, снабженная пружиной 7 см. В нижней части измельчающего устройства пальцы измельчают почвенные комки и активно рыхлят боковую поверхность гребней на глубину до 3 - 4 см. Вращающиеся пальцы измельчающего устройства не только измельчают почвенные комки, активно рыхлят боковую поверхность гребней, но и вычесывают корни сорных растений. В случае не прямолинейности расположения гребней картофеля, закрылки преодолевают сжатие пружин, размещенных и копируют неровности боковых поверхностей гребней. В целом рабочий орган окучника позволят рационально выполнить междурядную обработку картофеля, совместить несколько операций, таких как измельчение почвенных комков, подъем и сепарирование почвы, уничтожение сорняков и вычесывание корней сорняков, рыхление боковых поверхностей гребней и обеспечить воздушный и водный режим гребней картофеля. В структурной мелкокомковатой почве, при снижении поверхностных стоков с гребней, снижаются процессы, связанные с водной и ветровой эрозией. Наличие же капиллярных пор и большим межагрегатным промежуткам усиливаются анаэробные и аэробные процессы в почве.

В ходе исследований установлено, что при окучивании картофеля количества агрегатов размером 0,25 -10 мм. На рисунке представлены фотоснимки состояния поверхности гребней при

окучивании серийным сошником (рисунок 4 А) и сошником с устройством для мульчирования поверхности.

А) без мульчирующего устройства. Б) – с устройством для мульчирования.

Рисунок 4 - Общий вид гребней картофеля после окучивания серийным и экспериментальным окучниками.

Как видно из рисунка 4, что применение серийного окучника (рисунок 4А) на поверхности гребня преобладает комковатая почва с размером частиц больше 15-20 мм. При использовании экспериментального окучника размер частиц находится в пределах 0, 25 – 10 мм (рисунок 4Б), что как раз отвечает агротехническим требованиям. Основные данные в процессе их работы при окучивании определены в зависимости от применения серийного и экспериментального окучника представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние типов окучника на качество обработки гребня и урожайность картофеля.

Тип окучника	Количество сорняков шт./м.^{2}		Гибель сорняков в гребне, %	Площадь обработанной поверхности,%	Урожайность картофеля, т/га
	до обработки гребней	после обработки			
Скорость агрегата – 2,15 м/с					
Серийный	42	12	70	79	24
Экспериментальный	49	7	85	98	26,1
Скорость агрегата -2,6 м/с					
Серийный	70	14	78	81	27
Экспериментальный	76	4	95	100	29,9

Проведенные исследования и анализ табличных данных использования экспериментального окучника позволяет повысить урожайность, картофеля за счёт внедрения новых окучников с реактивными рабочими органами с мульчированием поверхности гребня в пределах 1,5 т/га.

Выводы.

1. Найдено конструктивно – техническое решение по окучиванию с мульчированием поверхности гребня картофеля при гребневой технологии его возделывания.
2. Установлено что экспериментальный окучник, с устройством для мульчирования поверхности гребня позволяет работать культиватору на повышенных скоростях и создать укрытие гребня мульчирующим слоем почвы в пределах 3 – 4 см, с величиной комков на поверхностном слое гребня в пределах 1-1,5 см, уничтожать всходы сорняков в гребне до 95 % при скорости движения культиватора с новыми окучивающими рабочими органами 2,6 м/с.
3. В целом окучивающий рабочий орган с реактивным устройством для мульчирования поверхности гребня при окучивании картофеля в составе агрегата повышает экономическую эффективность.

Список источников

1. Измайлов А.Ю., Колчин Н.Н., Лобачевский Я.П., Кынев Н.Г. Современные технологии и специализированная техника для картофелеводства //Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. – 3. – С.43 – 47.

2. Сраровойтов В.И., Павлова О.А. Грядовая технология возделывания картофеля: Науч. тр. ВИМ. Т.1, Ч1. – М.: 2002. – С.175 – 181.

3. Гусев В.Г. Технология выращивания картофеля с применением комплекса отечественных сельхозмашин // Картофель и овощи. 2022. №12. С. 29-32. https://doi.org/10.25630/PAV.2022.15.39.006

4. Картофель. Уход з апосадками при гребневой технологии возделывания. рсх РСФСР Р740 – 87. Типовой технолгический процесс. ОКП (ОКСТУ) 973110.

5. Лахмаков В.С. Применение комбинированного гребнеобразователя в технологии производства картофеля // Агропанорама. – 2014. – № 2. – С. 4-6.

6. Колчин Н.Н., Понамарёв А.Г. Система машинных технологий и машин для картофелеводства //Система технологий и машин ля инновационного развития АПК России: Сб. науч. докл. Междунар. Науч. – техн. конф. – Ч.1. – М.: ВИМ, 2013. – С. 271 – 275.

7. Пдолько П.М. Повышение качества обработки почвы под картофель //вестник Челябинского государственного университета. – 2009. - № 55. – С.101 – 104.

8. Патент 118824. Ротационная боронка /М.С. Чекусов, Д.А. Голованов, А.А . Кем //Бюл. 2011. № 22. 9. Матяшев Ю.И. Расчёт и проектирование ротационных и почвообрабатывающих машин /Ю.И. Матяшев, И.М. гринчук, Г.М. Егоров. – М.: ВО Агропромиздат, 1988, - 281 с.

10. Измайлов А.Ю., Колчин Н.Н., Лобачевский Я.П. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства //Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2015. -№ 3. – С. 43-47.

11. Картофель. Уход за посадками при гребневой технологии возделывания. рсх РСФСР Р740 – 87. Типовой технологический процесс. ОКП (ОКСТУ) 973110.

12. Патент 219696 Рабочий орган окучника / Ж.В. Даниленко, В.А. Макаров, А.В. Шемякин, В.Д. Липин //Бюл. 2023. № 22.

References

1. Izmailov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevsky Ya.P., Kynev N.G. Modern technologies and specialized equipment for potato growing //Agricultural machinery and technology. - 2015. – 3. – pp. 43-47.

2. Srarovoitov V.I., Pavlova O.A. Ridge technology of potato cultivation: Scientific tr. VIM. Vol.1, Ch1. – M.: 2002. – pp.175 – 181.

3. Gusev V.G. Technology of growing potatoes using a complex of domestic agricultural machines // Potatoes and vegetables. 2022. No. 12. pp. 29-32. https://doi.org/10.25630/PAV.2022.15.39.006

4. Potatoes. Care of seedlings with comb cultivation technology. RSFSR RSFSR R740 – 87. A typical technological process. OKP (OKSTU) 973110.

5. Lakhmakov V.S. The use of a combined comb-forming agent in potato production technology // Agropanorama. - 2014. – No. 2. – pp. 4-6.

6. Kolchin N.N., Ponamarev A.G. System of machine technologies and machines for potato growing //The system of technologies and machines for the innovative development of the agroindustrial complex of Russia: Collection of scientific documents. International. Scientific and technical Conf. – Part 1. – Moscow: VIM, 2013. – pp. 271-275.

7. Pdolko P.M. Improving the quality of tillage for potatoes //Bulletin of the Chelyabinsk State University. - 2009. - No. 55. – pp.101-104

. 8. Patent 118824. /rotary sideboard / M.S. Chekusov, D.A. Golovanov, A.A. By whom //Byul. 2011. No. 22.

9. Matyashev Yu.I. Calculation and design of rotary and tillage machines /Yu.I. Matyashev, I.M. grinchuk, G.M. Egorov. – M.: VO Agropromizdat, 1988, - 281 p.

10. Izmailov A.Yu., Kolchin N.N., Lobachevsky Ya.P. Modern technologies and special equipment for potato growing //Agricultural machinery and technology. - 2015. -No. 3. – pp. 43-47.

11. Potatoes. Post-planting care with ridge cultivation technology. RSFSR RSFSR R740 – 87. A typical technological process. OKP (OKSTU) 973110.

12. Patent 219696 The working organ of the hoarder / J.V. Danilenko, V.A. Makarov, A.V. Shemyakin, V.D. Lipin //Byul. 2023. No. 22.

Информация об авторах

А.Н. Зазуля – доктор технических наук, профессор; Ж.Н. Даниленко – старший преподаватель; В. А. Макаров - доктор технических наук, профессор; О.В. Макарова – доктор экономических наук, професссор.

Information about the authors

A. Zazulya – Doctor of Technical Sciences, Professor; Zh. Danilenko – senior lecturer; V. Makarov - Doctor of Technical Sciences, Professor; O. Makarova – Doctor of Economics, 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): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 18.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.362.34
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-23-31

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА ТРИЕРНОЙ ОЧИСТКИ ЗЕРНА К РЕЖИМАМ РАБОТЫ

Николай Петрович Тишанинов [1], ***Александр Витальевич Анашкин*** [2], ***Сергей Владимирович Емельянович*** [3]
[1,2,3] *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, Тамбов, Россия*
[1]vniitinlab5@mail.ru, [2]av-anashkin@mail.ru, [3]seruvarovo@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 скоростного режима работы овсюжного триера с показателями качества технологического процесса очистки пшеницы от длинных примесей: неизбежными технологическими потерями полноценного зерна основной культуры в отходы и остаточной засоренности очищенного зерна. Исследования проводились с помощью экспериментального триера, обеспечивающего раздельную подачу компонентов зерносмеси в ячеистый цилиндр в заданных соотношениях и контроль частоты вращения цилиндра с точностью до 0,1 об/мин. Установлено, что на качество процесса очистки зерна от длинных примесей большое влияние оказывает скоростной режим работы триера. Для конкретных значений подачи зерна в триер и углового положения выводного лотка существует оптимальное значение частоты вращения ячеистого цилиндра, при котором задействована вся длина ячеистой поверхности при минимальных потерях зерна основной культуры сходом. При этом достигается максимальное качество очистки по показателю остаточной засоренности зерна. Снижение частоты вращения цилиндра от оптимальных 34,6 об/мин до 34,0 об/мин (на 1,7%) приводит к увеличению технологических потерь в 3,6 раза при нулевой исходной засоренности и в 15,5 раз при засоренности 1,3 %. Установлена взаимосвязь показателя остаточной засоренности с величиной свободной ячеистой поверхности при отклонении частоты вращения ячеистого цилиндра от оптимальной в большую сторону. При подаче зерна 1,2 т/ч, угловом положении рабочей кромки выводного лотка 55° и частоте вращения цилиндра 36,0 об/мин, величина свободной ячеистой поверхности составила 70 см, остаточная засоренность при этом составила 14,2 штук/кг, а при отсутствии свободной ячеистой поверхности, достигнутом за счет снижения скоростного режима работы триера до 34,6 об/мин, остаточная засоренность очищенного зерна составила 1,5 штук/кг, что в 9,5 раз меньше.*

Ключевые слова: *экспериментальный триер, зерносмесь, качество очистки, длинная примесь, потери, остаточная засоренность.*

ASSESSMENT OF THE SENSITIVITY OF THE TRIER GRAIN CLEANING PROCESS TO OPERATING MODES

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

Abstract. *Studies of the relationship between the speed mode of operation of the wild oat trier and the quality indicators of the technological process of purifying wheat from long impurities: the inevitable technological losses of full-fledged grain of the main crop into waste and residual contamination of the purified grain have been carried out. The studies were carried out using an experimental trier, which*

provided separate supply of grain mixture components into a cellular cylinder in specified ratios and control of the cylinder rotation speed with an accuracy of 0.1 rpm. It has been established that the quality of the process of cleaning grain from long impurities is greatly influenced by the speed mode of operation of the trier. The optimal value of the rotational speed of the cellular cylinder, at which the entire length of the cellular surface is involved with minimal losses of grain from the main crop, exists for specific values of grain supply to the trier and the angular position of the output tray. The maximum cleaning quality in terms of residual grain contamination is achieved in this way. Reducing the cylinder rotation speed from the optimal 34.6 rpm to 34.0 rpm (by 1.7%) leads to an increase in technological losses by 3.6 times with zero initial clogging and by 15.5 times with clogging 1. 3%. The relationship between the indicator of residual contamination and the size of the free cellular surface when the rotation speed of the cellular cylinder deviates upward from the optimal one has been established. With a grain supply of 1.2 t/h, an angular position of the working edge of the output tray of 55° and a cylinder rotation speed of 36.0 rpm, the value of the free cellular surface was 70 cm, the residual contamination was 14.2 pieces/kg, and in the absence of a free cellular surface, achieved by reducing the speed mode of the trier to 34.6 rpm, the residual contamination of the cleaned grain was 1.5 pieces/kg, which is 9.5 times less.

Keywords: *experimental trier, grain mixture, quality of cleaning, long impurity, losses, residual contamination.*

Для цитирования: Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В. Оценка чувствительности процесса триерной очистки зерна к режимам работы // Наука в Центральной России. 2024. Т. 67, № 1. С. 23-31. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-23-31.

For citation: Tishaninov N, Anashkin A., Emelyanovich S. Assessment of the sensitivity of the trier grain cleaning process to operating modes. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 23-31. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-23-31.

Введение. Авторы работ [1-5] разработали базовые положения теории триеров. Они установили закономерности циркуляции слоев зерносмеси в сегменте и его осевого смещения в зависимости от загрузки триера, скоростных режимов работы, исходных свойств зерносмеси и других факторов. По выявленной динамике перемещения рабочей среды в триере авторы аналитическим путем определяют важнейшие характеристики процесса – производительность, энергоемкость. Но результаты их исследований не позволяют достаточно объективно оценивать качество процесса, показатели которого имеют наибольшую весомость в общей оценке. Необходимы большая детализация задач исследований и подтверждение их результатов экспериментальным путем. Частично недостатки работ [1-5] восполняются исследованиями [6-9], в которых рассматриваются условия захвата зерновок ячеями, начальные условия их выброса и траектории движения. Однако, указанные результаты позволяют анализировать процесс только в поперечном сечении триерного цилиндра, они не учитывают влияние на процесс примесных частиц и степени загрузки ячеистой поверхности по длине, которая определяет риски снижения качества процесса. Поэтому оценка влияния степени загрузки ячеистой поверхности по длине на качество процесса в зависимости от подачи зерносмеси триер и скоростного режима работы является актуальной задачей.

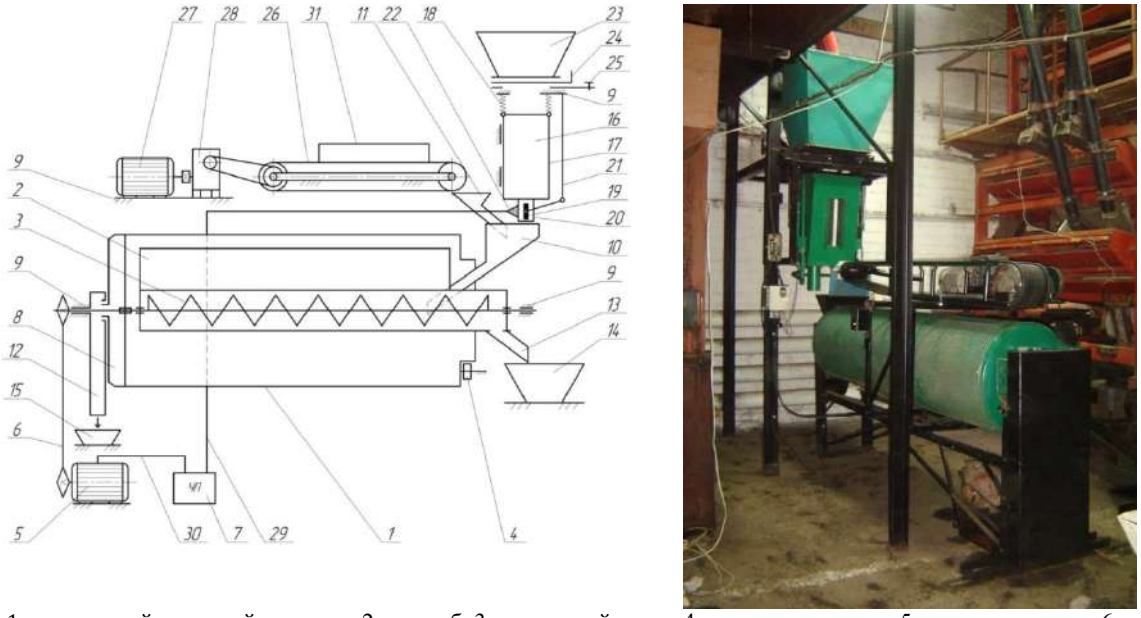
Материалы и методы. Отправной точкой при формировании плана эксперимента стали рациональные режимы и параметры триера, установленные нами ранее [10-12] с использованием в качестве рабочей среды пшеницы без засорителей. Были определены условия, обеспечивающие формирование зернового клина внутри ячеистого цилиндра с исключением или минимально возможным наличием свободной рабочей поверхности и минимальными потерями зерна основной культуры сходом.

Известно, что существенное влияние на величину остаточной засоренности ($З_о$) и величину технологических потерь ($П$) оказывает загрузка ячеистой поверхности [13-17], поэтому в эксперименте наряду с рациональными, необходимо было оценить последствия отклонения режимов работы и настроечных параметров.

Исследования проводились на экспериментальной установке с раздельной подачей компонентов зерносмеси и возможностью автоуправления частотой (n) вращения триерного

цилиндра [18-20], рисунок 1. Для повышения точности контроля *n* до 0,1 об/мин был усовершенствован изготовленный нами электронный тахометр.

Перед проведением основной серии опытов была установлена взаимосвязь *n* с частотой тока (*f*) на выходе частотного преобразователя. Тарировку частоты вращения выполняли следующим образом. Включали электропривод триера, затем с помощью частотного преобразователя задавали частоту тока на некотором уровне и определяли *n* с помощью электронного тахометра. Одновременно с этим величину *n* определяли подсчетом оборотов. Для этого на приводную звездочку была нанесена метка, с помощью которой подсчитывали 30 полных оборотов цилиндра. При этом контролировали время с помощью электронного секундомера с точностью до 0,01 с.



1 – овсюжный ячеистый цилиндр; 2 – желоб; 3 – выводной шнек; 4 – опорные ролики; 5 – электропривод; 6 – цепная передача; 7 – частотный преобразователь; 8 – розетка; 9 – рама; 10 – питатель; 11, 12, 13 – лотки; 14 и 15 мерные емкости; 16 – регулятор; 17 – подвижная стабилизирующая емкость; 18 – пружинная грузовоспринимающая система; 19 – клапан; 20 – отвод; 21 – рычажный механизм; 22 – исполнительный механизм системы управления работой триера; 23 – питающий бункер; 24 – шиберный регулятор подачи; 25 – упор; 26 – ленточный питатель; 27 – электродвигатель; 28 – червячный редуктор; 29 и 30 – кабели; 31 – короб

Рисунок 1 – Экспериментальная установка для исследований процессов триерной очистки зерна от длинных примесей

Соотношение компонентов зерносмеси изменяли шибером 24, и скоростью движения транспортерной ленты питателя 26.

По полученным данным рассчитывали *n*, таблица 1.

Таблица 1 – Результаты тарировки частоты вращения триерного цилиндра

Частота тока, Гц	*n*, об/мин (по тахометру)	Число оборотов цилиндра, шт	Время поворота цилиндра на 30 оборотов	*n*, об/мин (расчетная)
31,8	30,3	30	59,22	30,39
37,1	35,4	30	50,81	35,42
42,3	40,3	30	40,37	40,37
47,2	45,0	30	45,03	45,03

Из таблицы 1 видно, что электронный тахометр обеспечивает высокую точность измерений. Расхождения показаний тахометра с расчетным значением n не превышает 0,09 об/мин. Установленная взаимосвязь n и f имеет 100%-ную корреляцию ($R^2 = 1$), рисунок 2.

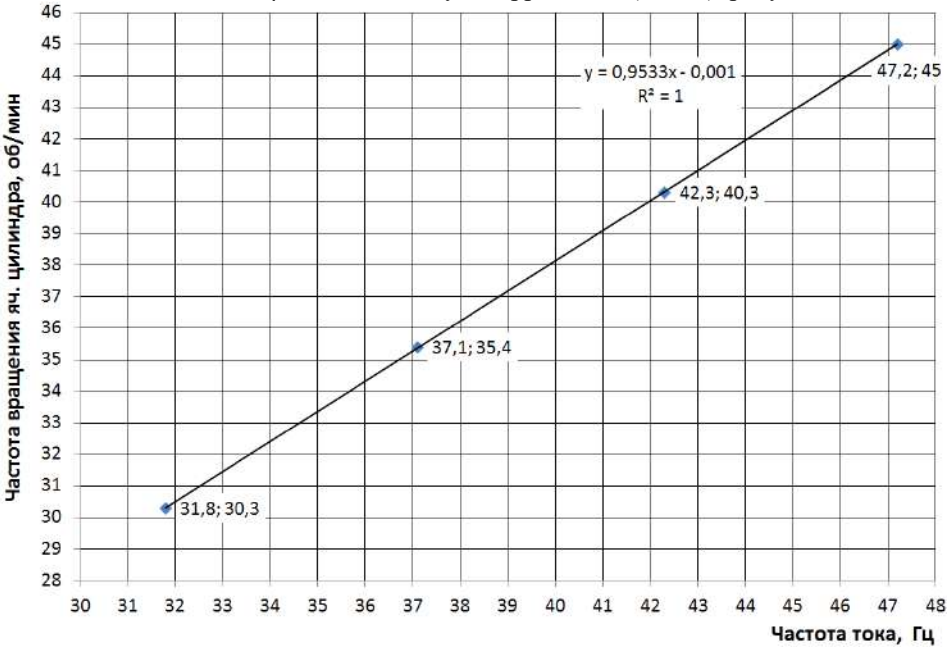


Рисунок 2 – Взаимосвязь частоты вращения ячеистого цилиндра (без загрузки) с частотой тока

Результаты и обсуждение. По условиям опытов подача основной культуры в триерный цилиндр составляла W = 1,2 т/ч (0,333 кг/с), а угловое положение выводного лотка – $\gamma_п$ = 55°. Для этих условий рациональная частота вращения ячеистого цилиндра n = 34,0 об/мин.

Перед началом опыта при незаполненном ячеистом цилиндре взаимосвязи $n = f(f)$ была установлена частота тока f_1 = 35,7 Гц. С момента начала подачи зерна в цилиндр частота его вращения снижалась. При этом производили ее корректировку с помощью регулятора частотного преобразователя с контролем заданного уровня по электронному тахометру. Через некоторое время n стабилизировалась, частота тока при этом составила f_2 = 36,2 Гц, что на 0,5 Гц больше значения f_1 при незаполненном цилиндре. Эта разница соответствует корректировке n в 0,48 об/мин. Для исследуемого процесса она существенна.

Для определения времени стабилизации процесса и уровня технологических потерь при указанных режимах работы триера в процессе опыта отбирали пробы зерна из схода с интервалом 30 с в течение 7 минут. Время отбора пробы составляло $t_{i(сх)}$ =10 с.

Отобранные навески взвешивали и определяли время стабилизации ($t_{ст}$) процесса и потери зерна сходом ($П$), которые составили для указанных выше условий: $t_{ст}$ = 4 мин, $П$ = 35,3 %. Величина потерь определена по пяти навескам, отобранным после $t_{ст}$. Время отбора проб чистого зерна составляло $t_{i(ч)}$ =5 с.

По окончании каждого опыта выполнялся анализ параметров сформированного внутри цилиндра зернового клина с целью оценки длины свободной ячеистой поверхности, рисунок 3.

Из рисунка 3 видно, что свободной поверхности при заданных условиях нет, а зерновая масса перекрывает нижнюю часть выгрузной розетки, что объясняет высокий уровень потерь.

Для снижения потерь была увеличена частота вращения ячеистого цилиндра до n = 34,6 об/мин. Заданному значению n при незаполненном цилиндре соответствует частота тока f_1 = 36,3 Гц, а при W = 1,2 т/ч – f_2 = 36,7 Гц. Разница $\Delta f = f_2 - f_1$= 0,4 Гц эквивалентна 0,38 об/мин, что несколько меньше, чем в предшествующем опыте. Это связано с уменьшением массы зерна, циркулирующего внутри ячеистого цилиндра при увеличении n и неизменных W и $\gamma_п$.

Величина технологических потерь составила *П* = 9,75 %. Увеличение частоты вращения на 0,6 об/мин привело к сокращению потерь в 3,6 раза, что свидетельствует о крайне высокой чувствительности исследуемого процесса к скоростному режиму работы триера. По окончании опыта свободной поверхности внутри ячеистого цилиндра также не наблюдалось.

Рисунок 3 – Зерновой клин внутри цилиндра по окончании опыта при W = 1,2 т/ч, n = 34,0 об/мин, $\gamma_п$ = 55°, $З_и$ = 0%

В ожидании дальнейшего снижения потерь дополнительно был увеличен скоростной режим работы до *n* = 35,1 об/мин. Примесный компонент не подавался. Показания частоты тока составили: f_1 = 36,7 Гц, f_2 = 37,1 Гц. Разность частот Δf = 0,4 Гц осталась на прежнем уровне. Потери составили 3,0 %. Свободная ячеистая поверхность отсутствовала. Этот режим работы триера можно считать рациональным, так как по агротребованиям на триерную очистку зерна допускаются потери до 5 %.

Далее установлен скоростной режим с гарантированным наличием свободной ячеистой поверхности, когда ожидается снижение качества очистки зерна − *n* увеличена до 36,0 об/мин. После остановки привода длина свободной ячеистой поверхности составила 56 см, рисунок 4.

Рисунок 4 – Зерновой клин внутри цилиндра по окончании опыта при W = 1,2 т/ч, n = 36,0 об/мин, $\gamma_п$ = 55°, $З_и$ = 0%

Не смотря на достаточно большой участок свободной ячеистой поверхности потери основной культуры сходом составили $П$ = 0,92 %. Это свидетельствует о неблагоприятных условиях захвата зерновок основной культуры на свободной ячеистой поверхности при отсутствии сформированного циркулирующего зернового сегмента.

Далее, при тех же значениях W, $\gamma_п$ и n наряду с основной культурой была осуществлена подача длинной примеси (овса) с помощью ленточного питателя. Распределение примесного компонента на ленте осуществлялось с помощью оборачиваемого короба с размерами 600×24×21 мм. Масса примеси в коробе составляла в среднем 138 г, что при скорости ленты 2 см/с обеспечивает расходную характеристику примеси $q_п$ = 4,61 г/с. При подаче зерна основной культуры W = 1,2 т/ч исходная засоренность зерносмеси составила $З_и$ = 1,3 %.

В результате опыта установлено, что за 6 минут стабилизация процесса по массовому расходу примесного компонента не достигнута. В среднем по навескам, отобранным в заключительном интервале времени (4-6 минут с момента начала подачи примеси в ячеистый цилиндр), сход примеси составил 3,51 г/с − 77,96 % от ее подачи.

Остаточная засоренность по результатам анализа пяти проб средней массой 1820 г из фракции чистого зерна составила $З_о$ = 0,025 % или 8,13 шт./кг, что является высоким результатом для продовольственного зерна, однако для посевного материала, согласно ГОСТ Р 52325–2005 [21], соответствует только категории РС (репродукционные семена).

Потери полноценного зерна в отходы составили $П$ = 0,009 %, что в 102 раза меньше, чем в опыте с теми же условиями, но без подачи примесного компонента. Это свидетельствует о принципиальной разнице протекания процесса по условиям захвата частиц основной культуры на свободном участке ячеистой поверхности при наличии или отсутствии длинной примеси в зерносмеси.

После остановки привода свободная ячеистая поверхность от зерна основной культуры оказалась заполнена частицами длинной примеси, рисунок 5.

Рисунок 5– Зерновой клин внутри цилиндра по окончании опыта при W = 1,2 т/ч, n = 36,0 об/мин, $\gamma_п$ = 55°, $З_и$ = 1,3%

Длина свободной от основной культуры ячеистой поверхности составила $l_{св}$ = 75 см, что на 19 см больше, чем в опыте при тех же условиях, но без примеси. Далее при тех же условиях была увеличена продолжительность контроля времени стабилизации процесса по сходу примесного компонента. Через 4 минуты после включения привода и подачи основной культуры процесс стабилизировался по ее расходу. Затем был включен ленточный дозатор примеси и начат отсчет времени отбора проб из схода. Отобрано 30 проб с интервалом в 30. После этого отобрано 5 проб

фракции чистого зерна.

Установлено, что в этих условиях процесс по расходу примесного компонента стабилизировался через 9 минут с момента начала подачи примеси. Остаточная засоренность зерна составила $З_о$ = 0,04 %, что составляет 14,2 шт/кг. Это соответствует той же категории семян РС. Потери зерна сходом $П$ = 0,0004%. Длина свободной ячеистой поверхности $l_{св}$ = 70 см оказалась сопоставимой с предыдущим опытом.

При W = 1,2 т/ч, $\gamma_п$ = 55°, n = 34,6 об/мин и $З_и$ = 1,3 % стабилизация процесса по основной культуре завершилась в течение 5 минут, после чего был включен ленточный дозатор примеси и отобраны пробы аналогично предыдущему опыту.

Остаточная засоренность составила $З_о$ = 0,004 % (1,5 шт/кг), что в 9,5 раз меньше, чем при $l_{св}$ = 70 см. По содержанию семян сорных растений полученный показатель соответствует самой высокой категории качества семян пшеницы ОС (оригинальные семена), для которых допускается не более 3 шт/кг [21]. Потери основной культуры сходом составили $П$ = 1,09%, что 9 раз меньше, чем при $З_о$ =0 и тех же условиях. В связи с этим для подачи зерна на уровне W = 1,2 т/ч скоростной режим n = 34,6 об/мин и угловое положение рабочей кромки выводного лотка $\gamma_п$ = 55° можно считать оптимальными.

Заключение. Установлено, что на качество процесса очистки зерна от длинных примесей скоростной режим работы триера оказывает большое значение. Кроме того характер протекания технологического процесса существенно различается при наличии или отсутствии примеси в рабочей среде. Снижение частоты вращения цилиндра от оптимальных n = 34,6 об/мин до n = 34,0 об/мин (всего на 1,7%) приводит к увеличению технологических потерь в 3,6 раза при нулевой исходной засоренности и в 15,5 раз при засоренности 1,3 %.

При равных значениях производительности (W=1,2 т/ч), углового положения выводного лотка ($\gamma_п$ = 55°) и скоростного режима (n = 34,6 об/мин) наличие примеси ($З_и$ = 1,3%) снижает величину потерь в 9 раз в сравнении с процессом без примесного компонента. Такой эффект достигается за счет смягчения динамического воздействия кромок ячей на зерновки основной культуры при наличии примеси на конечном участке ячеистого цилиндра, что повышает вероятность захвата зерновок ячеями.

Установлена взаимосвязь показателя остаточной засоренности с величиной свободной ячеистой поверхности при отклонении частоты вращения ячеистого цилиндра от оптимальной в большую сторону. При W =1,2 т/ч, $\gamma_п$ = 55°, n = 36,0 об/мин и величине $l_{св}$ = 70 см остаточная засоренность составила $З_о$ = 14,2 шт/кг, а при величине $l_{св}$ = 0 см, достигнутой за счет снижения n до 34,6 об/мин (на 3,9%), $З_о$ составила 1,5 шт/кг (в 9,5 раз меньше).

Список источников

1. Летошнев М.Н. Сельскохозяйственные машины, теория, расчет, проектирование и испытание. – М.: Л.: Сельхозгиз, 1955. – 856 с.

2. Летошнев М.Н. Теория триера // Сборник научно-технических работ Ленинградского института механизации сельского хозяйства. – Л. – 1948. – Вып. IV. – С. 3-58.

3. Трубилин Е.И., Федоренко Н.Ф., Тлишев А.И. Механизация послеуборочной обработки зерна и семян. – Краснодар. – 2009. – 96 с.

4. Полетаев С.В. Триеры. – М.: Л.: Госкомиздат, 1932. – 95 с.

5. Гладков Н.Г. Зерноочистительные машины. (Конструкция, расчет, проектирование и эксплуатация). − М.: Машгиз., 1961. − 368 с.

6. Рассадин А.А. Движение материальной точки и тела по вращающимся фрикционным и ячеистым поверхностям // Проблемы сепарирования зерна и других сыпучих материалов / Тр. ВНИИЗ. − М., 1963, вып. 42. − С. 91-109.

7. Урханов Н.А. Анахин В.Д., Воробьев А.М. Определение момента начала движения зерна из ячейки цилиндрического триера. − Улан-Удэ, 1978. − С.78-81.

8. Абидуев А.А. Исследование процесса выпадения зерна из ячеек триерных цилиндров // Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления (Вестник ВСГТУ). – 1989. – С. 107-108.

9. Бурков А.И., Одинцов Д.В. Модернизация цилиндрических триеров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 1. – С. 15-16.

10. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В. Взаимосвязь качества триерной очистки зерна с режимами работы и настроечными параметрами // Наука в центральной России. – 2023. – № 5 (65). – С. 17-25.

11. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В. Результаты поисковых исследований прибора для разделения зерносмесей // Наука в центральной России. – 2016. – № 5 (23). – С. 37-44.

12. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Альшинайиин Х.Д.Д. Обоснование режимов работы и параметров прибора для рассева проб зерносмесей // Наука в центральной России. – 2016. – № 3 (21). – С. 74-80.

13. Листопад Г.Е. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины. – М.: Агропромиздат. – 1986. – 687с.

14. Лурье А.Б. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин. – Л.: Машиностроение, 1997. – 526 с.

15. Павловский Г.Т. Исследование технологического процесса в цилиндрических триерах // Сборник научных трудов ВИМ. –1952. – Т.17.

16. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В. Анализ способов управления качеством триерной очистки зерносмесей // Наука в центральной России. –2017. – № 4 (28). – С. 88-94.

17. Одинцов Д.В. Повышение эффективности функционирования цилиндрического триера с полимерной ячеистой поверхностью путем обоснования основных параметров и режимов работы: дис. … канд. техн. наук: 05.20.01. – Киров, 2007. – 161 с.

18. Патент на изобретение RU 2775584 C1. Тишанинов Н.П., Емельянович С.В. Триер. – 05.07.2022. – Заявка № 2022102982 от 07.02.2022.

19. Тишанинов Н.П., Емельянович С.В. Триер с авторегулированием скоростного режима // Сельский механизатор. – 2022. – № 6. – С. 16-17.

20. Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Емельянович С.В. Обеспечение качества триерной очистки зерна за счёт авторегулирования режимов работы // Вестник АПК Верхневолжья. – 2021. – № 4 (56). – С. 67-75.

21. ГОСТ 52325-2005 Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия. – Введ. 2005-03-23. – М.: Стандартинформ, 2009. – 20с.

References

1. Letoshnev M.N. Agricultural machines, theory, calculation, design and testing. – M.: L.: Selkhozgiz, 1955. – 856 p.

2. Letoshnev M.N. Trier theory // Collection of scientific and technical works of the Leningrad Institute of Agricultural Mechanization. – L. – 1948. – Issue. IV. – P. 3-58.

3. Trubilin E.I., Fedorenko N.F., Tlishev A.I. Mechanization of post-harvest processing of grain and seeds. - Krasnodar. – 2009. – 96 p.

4. Poletaev S.V. Triremes. – M.: Leningrad: Goskomizdat, 1932. – 95 p.

5. Gladkov N.G. Grain cleaning machines. (Construction, calculation, design and operation). − M.: Mashgiz., 1961. − 368 p.

6. Rassadin A.A. Movement of a material point and body along rotating frictional and cellular surfaces // Problems of separation of grain and other bulk materials / Proc. VNIIZ. − M., 1963, issue. 42. − P. 91-109.

7. Urkhanov N.A. Anakhin V.D., Vorobiev A.M. Determination of the moment of the beginning of grain movement from the cell of a cylindrical trier. − Ulan-Ude, 1978. − P.78-81.

8. Abiduev A.A. Study of the process of grain loss from the cells of trier cylinders // Bulletin of the East Siberian State University of Technology and Management (Bulletin of ESGTU). – 1989. – P. 107-108.

9. Burkov A.I., Odintsov D.V. Modernization of cylindrical triers // Tractors and agricultural machines. – 2007. – No. 1. – P. 15-16.

10. Tishaninov N.P., Anashkin A.V. The relationship between the quality of grain grain cleaning with operating modes and setting parameters // Science in Central Russia. – 2023. – No. 5 (65). – pp. 17-25.

11. Tishaninov N.P., Anashkin A.V. Results of search studies of a device for separating grain mixtures // Science in Central Russia. – 2016. – No. 5 (23). – pp. 37-44.

12. Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Alshinaiin Kh.D.D. Justification of operating modes and parameters of the device for sifting samples of grain mixtures // Science in Central Russia. – 2016. – No. 3 (21). – P. 74-80.

13. Leaf fall G.E. Agricultural and reclamation machines. – M.: Agropromizdat. – 1986. – 687 p.

14. Lurie A.B. Calculation and design of agricultural machines. – L.: Mechanical Engineering, 1997. – 526 p.

15. Pavlovsky G.T. Study of the technological process in cylindrical triremes // Collection of scientific papers of VIM. –1952. – T.17.

16. Tishaninov N.P., Anashkin A.V. Analysis of methods for managing the quality of grain-mixed grain cleaning. // Science in Central Russia. –2017. – No. 4 (28). – pp. 88-94.

17. 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: thesis. ...cand. tech. Sciences: 05.20.01. – Kirov, 2007. – 161 p.

18. Patent for invention RU 2775584 C1. Tishaninov N.P., Emelyanovich S.V. Trier. – 07/05/2022. – Application No. 2022102982 dated 02/07/2022.

19. Tishaninov N.P., Emelyanovich S.V. Trier with automatic speed control // Rural machine operator. – 2022. – No. 6. – P. 16-17.

20. Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Emelyanovich S.V. Ensuring the quality of grain grain cleaning through automatic regulation of operating modes // Bulletin of the Verkhnevolzhye Agro-Industrial Complex. – 2021. – No. 4 (56). – pp. 67-75.

21. GOST 52325-2005 Seeds of agricultural plants. Varietal and sowing qualities. General technical conditions. – Enter. 2005-03-23. – M.: Standartinform, 2009. – 20 p.

Информация об авторах

Н.П. Тишанинов - доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник; А.В. Анашкин - доктор технических наук, главный научный сотрудник; 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; 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 631.354
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-32-39

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ПРИ УБОРКЕ СОИ

Геннадий Николаевич Ерохин [1]***, Валерий Викторович Коновский*** [2]
[1,2] *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российскя Федерация*
[1]witin4@rambler.ru

Автор, ответственный за переписку: Геннадий Николаевич Ерохин, witin4@rambler.ru
Corresponding author: Gennady Erokhin, witin4@rambler.ru

Реферат. *Потери сои при комбайновой уборке в зависимости от условий могут достигать более 30%. Это оказывает существенное влияние на рентабельность производства сои в целом. Статья посвящена моделированию возможных потерь при уборке сои в сельхозпредприятии. В процессе исследования использовались результаты мониторинга качества уборки сои и информационные материалы, опубликованные в периодической печати. Общие потери рассматривались как сумма потерь самоосыпанием из-за задержки уборки и потерь непосредственно за комбайнами. Рассмотрены три варианта уборки сои: в агросрок, частично в агросрок и полностью за агросроком. Моделирование потерь самоосыпанием выполняется в зависимости от варианта уборки и продолжительности работы за агросроком. Моделирование потерь сои за отдельным комбайном производится на основе зависимостей, учитывающих изменение потерь от продолжительности работы за агросроком, рабочей скорости, высоты среза и полеглости. Отличительной особенностью модели является прогнозирование надежности комбайнов, в зависимости от наработки с начала эксплуатации. Исходные данные модели формируются показателями: условий уборки; потребительских свойств комбайнов; технологических режимов работы комбайнов при уборке сои. Модель предусматривает для каждого комбайн определение показателей производительности по эксплуатационному времени. На основе этого определяются: суммарная эксплуатационная производительность комбайнов и продолжительность уборки сои без учета и с учетом задержки по метеоусловиям. Далее моделируются технологические потери за каждым комбайном, суммарные потери сои за комбайнами и потери сои осыпанием в период работы за агросроком. В итоге оцениваются общие потери сои в сельхозпредприятии за период уборки. Результаты моделирования позволяют осуществить выбор наиболее благоприятного сценария использования комбайнов в предприятии с точки зрения минимизации потерь.*

Ключевые слова: *зерноуборочный комбайн, соя, урожайность, модель, потери.*

MODEL FOR ASSESSING LOSSES IN SOYBEAN HARVEST

Gennady Erokhin [1]***, Valery Konovskiy*** [2]
[1,2] *All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov, Russia*
[1]witin4@rambler.ru

Abstract. *Soybean losses during combine harvesting, depending on conditions, can reach more than 30%. This has a significant impact on the profitability of soybean production as a whole. The article is devoted to modeling possible losses when harvesting soybeans in an agricultural enterprise. The results of monitoring the quality of soybean harvesting and information materials published in periodicals were used in the research process. Total losses were considered as the sum of self-shedding losses due to harvesting delays and losses directly behind the combines. Three options for soybean harvesting are considered: within the agricultural period, partially within the agricultural period and completely beyond*

the agricultural period. Modeling of losses by self-shedding is performed depending on the harvesting option and the duration of work over the agricultural period. Modeling of soybean losses for a separate combine is carried out on the basis of dependencies that take into account changes in losses from the duration of work over the agricultural period, operating speed, cutting height and lodging. A distinctive feature of the model is the prediction of the reliability of combines, depending on the operating time since the start of operation. The initial data of the model is formed by the following indicators: cleaning conditions; consumer properties of combines; technological operating modes of combines when harvesting soybeans. The model provides for each combine harvester to determine performance indicators based on operating time. Based on this, the following are determined: the total operational productivity of combines and the duration of soybean harvesting without taking into account and taking into account delays due to weather conditions. Next, the technological losses behind each combine, the total losses of soybeans behind the combines, and the losses of soybeans by shedding during the period of operation after the agricultural period are modeled. As a result, the total soybean losses in the agricultural enterprise during the harvesting period are estimated. The simulation results make it possible to select the most favorable scenario for using combines in an enterprise from the point of view of minimizing losses.

Keywords: *combine harvester, soybean, yield, model, losses.*

Для цитирования: Ерохин Г.Н., Коновский В.В. Модель оценки потерь при уборке СОИ // Наука в Центральной России. 2024. Т. 67, № 1. С. 32-39. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-32-39.

For citation: Erokhin G, Konovskiy V. Model for assessing losses in soybean harvest. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 32-39. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-32-39.

Введение. В Российской Федерации посевные площади, занятые соей, последние годы неуклонно росли. По данным Росстата площадь сои в 2010 году составляла 1209 тыс.га, в 2022 году она приблизилась к 3500 тыс.га. За этот период произошел рост урожайности с 10,9 ц/га до 18,0 ц/га. Динамичное развитие производства сои связано с высокой рентабельностью , несмотря на нестабильность закупочных цен.

Особое место в производстве сои занимает ее уборка. Уборка сои в сельхозпредприятии сопровождается неизбежными потерями урожая, которые в значительной степени влияют на эффективность ее производства. Потери сои при уборке состоят из потерь самоосыпанием при превышении агросрока и потерь за комбайнами, выполняющими уборку этой культуры.

Потери самоосыпанием вызваны растрескованием бобов и ослаблением их связи с растением. Потери самоосыпанием просходят свободным зерном и опавшими бобами. Они увеличиваются с ростом превышения фактической продолжительности уборочных работ над агросроком. Данный вид потерь зависит от сорта сои, сроков задержки уборки сои, частоты смены периодов дождей и высыхания. При длительной задержке уборки потери самоосыпанием могут достигать 20-30% от урожая.

Потери за комбайном, в свою очередь, состоят из потерь за жаткой и потерь за молотилкой. Потери за жаткой формируются:

- полностью или частично не срезанными бобами при высоком срезе жатки;
- срезанными и опавшими бобами под воздействием мотовила, ножа и шнека жатки;
- свободным зерном, опавшем из бобов под воздействием мотовила и ножа.

Потери за молотилкой образуются вышедшими после прохождения молотилки необмолоченными (или частично необмолоченными) бобами и свободным зерном сои. Потери за молотилкой зависят в основном от условий уборки, технологических настроек и рабочей скорости комбайна.

Согласно агротребований потери при уборке сои нормируются относительно биологической урожайности на момент уборки [1]:

- за жаткой несрезанными бобами – не более 1,5%;
- за жаткой свободным зерном, срезанными и опавшими бобами – не более 1,5%;

- за молотилкой – не более 1,5%;
- из-за разгерметизации комбайна – не более 0,5%.

Общие потери урожайности за комбайном при уборке сои не должны превышать 4,5-5%.

В настоящее время сою убирают обычными зерноуборочными комбайнами. При этом используются самые разнообразные комбайны по типу молотильного устройства и пропускной способности. Применяются соевые жатки низкого среза или зерновые жатки. Используются различные скоростные режимы и технологические настройки при уборке. Все это, а также условия уборки, несомненно оказывают влияние на потери урожая сои.

На практике, как показывает мониторинг, при неблагоприятных погодных условиях и значительной задержке уборки по срокам, потери резко возрастают и могут достигать 30% от урожайности.

И потребителю важно иметь возможность прогнозировать потери при уборке сои в различных условиях разнобразным составом зерноуборочных комбайнов. Такая оценка необходима для целенаправленного проведения работ по снижению потерь и повышению эффективности производства сои. В настоящей статье представлены исследования по моделированию подобной оценки.

Материалы и методы. Исследования проводились на основе результатов мониторинга качества уборки сои в сельхозпредприятиях, выполненного ФГБНУ ВНИИТиН. Также использованы показатели оценки потерь сои при уборке, опубликованные в открытой печати. Аппроксимация зависимостей показателей от исследуемых факторов выполнялась компьютерной обработкой исходных данных.

Результаты и обсуждение. Потери зерна сои в сельхозпредприятии за период уборки можно описать общим уравнением:

$$П_С = П_О + \sum_{i=1}^{N} П_{Ki} \text{ , т} \quad (1)$$

где $П_О$ - потери сои самоосыпанием вследствие задержки и превышения агросрока уборки, т; $П_{Ki}$ - потери зерна сои отдельным i-ым комбайном за период уборки, т; N – количество комбайнов в сельхозпредприятии на уборке сои.

Потери $П_О$ зависят от величины превышения фактической продолжительности уборочных работ над агросроком [2, 3]. Под фактической продолжительностью уборки сои понимают сумму:

$$Т_Ф = Д_{ПР} + Т_{УБ}, \quad (2)$$

где $Д_{ПР}$ – продолжительность задержки уборки из-за погодных или других условий, дни; $Т_{УБ}$ - продолжительность уборки сои в сельхозпредприятии, дни.

Продолжительность периода уборки $Т_{УБ}$ определяется на основе планируемого объема работ и суммарной эксплуатационной производительности комбайнов на уборке сои в условиях сельхозпредприятия. Подробно эта процедура описана в [4].

Далее рассмотрим три возможных варианта уборки сои в сельхозпредприятии в зависимости от $Т_Ф$.

Вариант А. Характеризуется фактической продолжительностью уборки менее агросрока:

$$Т_Ф \le Т_{АГР}, \quad (3)$$

где $Т_{АГР}$ – агросрок уборки сои, дни;

Величина потерь от превышения агросрока в этом случае равна нулю: $П_О = 0$.

Вариант Б. При этом варианте фактическая продолжительность уборки удовлетворяет условиям:

$$T_{Ф} > T_{АГР}, \quad Д_{ПР} < T_{АГР} \tag{4}$$

То есть фактическая продолжительность уборки становится больше агросрока, однако величина задержки меньше агросрока. Уборка происходит в период агросрока и за его пределами.

Величина периода, превышающего агросрок, равна:

$$T_{ПРЕ} = T_{Ф} - T_{АГР}, \text{ дни} \tag{5}$$

Площадь сои, убираемая за пределами агросрока, равна:

$$S_{АГР} = S_{С} - T_{\Sigma ЭКГА} \cdot T_{ДН} \cdot (T_{АГР} - Д_{ПР}), \tag{6}$$

где $S_{С}$ - общая площадь уборки сои в сельхозпредприятии, га; $T_{\Sigma ЭКГА}$ - суммарная эксплуатационная производительность комбайнов, га/ч; $T_{ДН}$ - среднее суточное эксплуатационное время работы комбайна на уборке сои.

Исследования [2, 3] и мониторинг работы комбайнов на уборке сои показывают, что потери осыпанием линейно возрастают с ростом времени уборки сверх агросрока. Средний процент потерь сои осыпанием $P_{СР}$ при уборке площади $S_{АГР}$ можно описать зависимостью:

$$P_{СР} = 0{,}35 \cdot T_{ПРЕ}, \% \tag{7}$$

В итоге потери осыпанием $П_{О}$ для варианта (Б) равны:

$$П_{О} = 0{,}001 \cdot У \cdot S_{АГР} \cdot P_{СР}, \text{ т} \tag{8}$$

где $У$ - потенциальная урожайность сои без учета потерь, ц/га.

Вариант В. В этом варианте задержка уборки $Д_{ПР}$ больше агросрока $T_{АГР}$:

$$Д_{ПР} > T_{АГР}. \tag{9}$$

Величина периода $T_{ПРЕ}$, превышающего агросрок, для данного варианта также определяется формулой (5). Вся уборка происходит в период за пределами агросрока. Поэтому площадь уборки за пределами агросрока равна общей площади сои в хозяйстве:

$$S_{АГР} = S_{С}, \tag{10}$$

Средний процент потерь самоосыпанием вследствие уборки за агросроком для этого варианта составляет:

$$P_{СР} = 0{,}7 \cdot T_{ПРЕ} - 0{,}35 \cdot T_{УБ}, \% \tag{11}$$

Потери осыпанием $П_{О}$ для варианта (В) равны:

$$П_{О} = 0{,}001 \cdot У \cdot S_{С} \cdot P_{СР}, \text{ т} \tag{12}$$

Следует отметить, что вариант (В) характеризуется наибольшими потерями сои $П_{О}$. Это происходит потому, что за пределами агросрока убирается максимальная площадь и средний процент потерь также наиболее высокий.

Моделирование потерь сои за комбайном. Согласно уравнения (1) потери при уборке сои состоят из потерь за комбайнами и потерь при работе за пределами агосрока. Рассмотрим потери за комбайном подробнее. Эти потери за уборочный сезон составляют:

$$П_К = 10^{-2} \cdot Y_К \cdot У \cdot S_К, \text{ ц} \quad (13)$$

где $Y_К$ - уровень потерь сои за отдельным комбайном в условиях сельхозпроизводителя, %; $S_К$ - площадь сои, убранная комбайном за сезон, га.

Значение уровня потерь сои за комбайном $Y_К$ зависит от многих факторов. Как показывает мониторинг и испытания комбайнов на МИС, при нормальных условиях уровень потерь сои за комбайном находится в интервале 1,5…4,5%.

Однако на практике потери сои за комбайнами часто бывают более высокими и достигают 20…30% от урожая. Повышенные потери могут возникать из-за множества факторов [5]. Согласно экспертной оценки специалистов сельхозпредприятий наиболее значимые из них:

- сроки проведения работ;
- высота среза;
- рабочая скорость комбайна;
- полеглость растений.

С учетом влияния этих факторов уровень потерь за комбайном при уборке сои можно описать уравнением:

$$Y_К = Y_Б + K_{ПРЕ} + K_{ВС} + K_{СК} + K_{ПОЛ}, \quad (14)$$

где $Y_Б$ - базовый уровень потерь комбайна при уборке сои, %; $K_{ПРЕ}$ - коэффициент потерь от превышения агросрока, %; $K_{ВС}$ - коэффициент потерь от высоты среза, %; $K_{СК}$ - коэффициент потерь от рабочей скорости комбайна, %; $K_{ПОЛ}$ - коэффициент потерь от полеглости сои.

Базовый уровень потерь принимается равным потерям при нормальных условиях уборки: $Y_Б = 3...4\%$.

Сроки проведения уборки сои. Работа комбайна в период за агросроком характеризуется дополнительными потерями осыпанием бобов и зерна за жаткой. Это происходит вследствие взаимодействия склонного к осыпанию растения с мотовилом, ножом и шнеком. Как и потери самоосыпанием, эти потери зависят от величины превышения фактической продолжительности уборочных работ над агросроком. Также рассматриваем три варианта проведения уборки.

При варианте (А), когда фактическая продолжительность уборки не превышает агросрок, $K_{ПРЕ} = 0$.

При варианте (Б) уборка происходит в период агросрока и за его пределами. Период, превышающий агросрок, определяется по формуле (4). Используя данные [28], получена зависимость коэффициента потерь от превышения агросрока:

$$K_{ПРЕ} = 0{,}262 \cdot T_{ПРЕ} \cdot \frac{S_{АГР}}{S_С}. \quad (15)$$

При варианте (В) вся уборка происходит за периодом агросрока. При этом коэффициент увеличения потерь от превышения агросрока равен:

$$K_{ПРЕ} = 0{,}262 \cdot (2 \cdot T_{ПРЕ} - T_{УБ}). \quad (16)$$

Высота среза. Особенности куста сои таковы, что наиболее урожайные бобы располагаются в нижней части. Высота крепления нижних бобов составляет 3-15 см от поверхности почвы. Отсюда следует, что высота среза непосредственным образом влияет на величину потерь сои за жаткой. Это потери несрезанными и частично несрезанными бобами. Обработкой данных мониторинга получено, что величина коэффициента $K_{ВС}$ описывается формулами:

$$\text{при } h_C \le 6см;\ \text{К}_{\text{ВС}} = 0, \tag{17}$$

$$\text{при } h_C > 6см;\ K_{BC} = 1{,}220 \cdot h_C - 7{,}962, \tag{18}$$

где h_C - высота среза, см.

При использовании выражений (17) и (18) необходимо учитывать, что соевые жатки обеспечивают минимальный срез 4-5 см, а зерновые – 10-15 см.

Рабочая скорость комбайна. Большинство специалистов при выборе рабочей скорости комбайна на уборке сои рекомендуют скорость 4-6 км/ч. С ростом скорости увеличиваются и потери сои. Одна из причин этого заключается в следующем: рост рабочей скорости способствует появлению участков нечистого среза, что приводит к повышенным потерям сои за жаткой. Также увеличивается сила взаимодействия растений с элементами режущего аппарата и мотовила. Это стимулирует потери свободным зерном и опавшими бобами. Исследования показывают, что увеличение рабочей скорости приводит к увеличению общих потерь в шнековой жатке. Используя данные [6] предлагаются зависимости коэффициента потерь от скорости:

$$\text{при } V_P < 5км/ч\ ;\ K_{CK} = 0. \tag{19}$$

$$\text{при } V_P > 5км/ч\ K_{CK} = 0{,}125 \cdot V_P^2 - V_P + 1{,}875. \tag{20}$$

где V_P - рабочая скорость комбайна, км/ч.

Полеглость. Полеглость возникает, когда стебли растений не могут удерживать растения в вертикальном положении и они наклоняются или падают. Эта ситуация увеличивает потери урожая сои, замедляет скорость комбайна и, соответственно, снижает производительность. Выбор сорта сои оказывает большое влияние на потенциальную полеглость. Кроме того, обильные осадки или поливная вода на стадиях вегетативного роста являются основными условиями окружающей среды, приводящими к полеганию.

Полеглость приводит к потерям урожая, поскольку режущий аппарат проезжает по склонившимся растениям, оставляя необрезанные части растений с бобами в поле. Часто при этом происходит наматывание растительной массы на мотовило, что также приводит к потерям зерен и бобов сои.

Полеглость растения согласно нормативной документации [7] определяют процентным отношением разности высот выпрямленного и естественного состояния к высоте выпрямленного. В данной модели принята гипотеза, что при полеглости до 40% не наблюдается значимого влияния на потери, то есть $K_{ПОЛ} = 0$. При полеглости растений выше 40% коэффициент увеличения потерь от полеглости предлагается оценивать по формуле:

$$K_{ПОЛ} = \frac{(-0{,}005 \cdot П_P^2 + 0{,}960 \cdot П_P - 30{,}28) \cdot S_{ПОЛ}}{S_C}, \tag{21}$$

где $S_{ПОЛ}$ - площадь полеглых участков убираемой сои, га; $П_P$ - полеглость растений на площади $S_{ПОЛ}$, %.

Формулы (1)…(21) представляют собой ядро модели оценки потерь сои при комбайновой уборке в сельхозпредприятии. Для ее практической реализации необходимо выполнить моделирование эксплуатационных показателей уборки сои в сельхозпредприятии [4]. При этом осуществляется прогнозирование надежности комбайнов в зависимости от наработки с начала эксплуатации. Такой подход позволяет повысить точность оценки эксплуатационной производительности комбайнов на уборке сои. В общем виде структура модели показана на рисунке 1.

Рисунок 1- Структура модели оценки потерь при комбайновой уборке сои в сельхозпредприятии

Исходные данные модели оценки потерь подразделяются на три группы.

1 группа - показатели условий уборки сои в сельхозпредприятии. К ним относятся: количество и марки используемых комбайнов, наработка комбайнов с начала эксплуатации, тип и ширина жаток, убираемая площадь сои, сорт, урожайность, полеглость, отношение зерна к соломе, влажность зерна и соломы, длина гона, задержка и простои по метеоусловиям.

2 группа - показатели потребительских свойств применяемых зерноуборочных комбайнов. Сюда входят: мощность двигателя, объем бункера, скорость выгрузки зерна, площадь подбарабанья, площадь соломотряса, площадь очистки, удельные затраты времени на устранение технологических отказов, удельные затраты времени на ТО и регулировку комбайна;

3 группа – показатели технологических режимов работы комбайнов. Это показатели: рабочая скорость комбайна, высота среза.

Модель предусматривает определение по каждому комбайну показателей: производительность по основному и сменному времени; коэффициент готовности по общему времени; производительность по эксплуатационному времени. На основе этого определяются: суммарная эксплуатационная производительность комбайнов, годовое эксплуатационное время работы комбайнов на уборке сои, продолжительность уборки сои без учета и с учетом задержки по метеоусловиям. Далее моделируются технологические потери за каждым комбайном, суммарные потери сои за комбайнами и потери сои осыпанием в период работы за агросроком. В итоге оцениваются общие потери сои в сельхозпредприятии за период уборки.

Выводы. Модель рассматривает три варианта уборки сои: в агросрок, частично в агросрок и полностью за пределами агросрока. В зависимости от этого производится моделирование потерь самоосыпанием, потерь за уборочными комбайнами и оцениваются общие потери сои в сельхозпредприятии за период уборки.

Применение разработанной модели дает возможность прогнозировать разнообразные сценарии уборки сои в сельхозпредприятии и оценивать соответствующие потери. Результаты

моделирования позволяют осуществить выбор наиболее благоприятного сценария использования комбайнов в предприятии на уборке сои с точки зрения минимизации потерь.

Список источников

1. Липкань А.В., Кувшинов А.А., Усанов В.С., Смолянинова Н.О., Сахаров В.А. Методика определения потерь зерна за жаткой и молотилкой комбайна при уборке сои // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16. N1. С. 69-77.

2. Soybean Field Losses as Influenced by Harvest Delays /B.D. Philbrook and E.S. Oplinger// Reprinted from Agronomy Journal. – 1986. - Vol. 81, No. 2. - S. 251-258.

3. Ряднов А. И., Федорова О. А., Поддубный О. И. Потери зерна от увеличения сроков уборки зерновых культур // Известия НВ АУК. 2020. 2(58). 375-384.

4. Прогнозирование продолжительности уборки сои в сельхозпредприятии /Г.Н.Ерохин, В.В.Коновский, Першин И.А. // В сборнике: Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса. Юбилейный сборник научных трудов XV Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2022. С. 59-61.

5. Качество уборки сои зерноуборочными комбайнами / Г.Н.Ерохин, В.В. Коновский, Першин И.А. // Наука в центральной России. – 2022. – № 3(57) . – С.7–13.

6. Cortez J.W., Syrio M.G., Rodrigues S.A. Types of header, operating speed, and geometry of collection frames on the total losses of soybean harvest. Engenharia Agricola. 2019. Vol. 39(4). 482-489.

7. ГОСТ Р 52778-2007. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы эксплуатационно-технологической оценки. – М.: «Стандартинформ». – 2008. – 24с.

References

1. Lipkan A.V., Kuvshinov A.A., Usanov V.S., Smolyaninova N.O., Sakharov V.A. Methodology for determining grain losses behind the reaper and thresher of a combine when harvesting soybeans // Agricultural machines and technologies. 2022. T. 16. N1. pp. 69-77.

2. Soybean Field Losses as Influenced by Harvest Delays /B.D. Philbrook and E.S. Oplinger // Reprinted from Agronomy Journal. – 1986. - Vol. 81, No. 2. - S. 251-258.

3. Ryadnov A.I., Fedorova O.A., Poddubny O.I. Grain losses from increasing the timing of harvesting grain crops // Izvestia NV AUK. 2020. 2(58). 375-384.

4. Forecasting the duration of soybean harvesting in an agricultural enterprise / G.N. Erokhin, V.V. Konovsky, I.A. Pershin. // In the collection: State and prospects for the development of the agro-industrial complex. Anniversary collection of scientific works of the XV International Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don, 2022. pp. 59-61.

5. Quality of soybean harvesting with grain harvesters / G.N. Erokhin, V.V. Konovsky, Pershin I.A. // Science in central Russia. – 2022. – No. 3(57). – P.7–13.

6. Cortez J.W., Syrio M.G., Rodrigues S.A. Types of header, operating speed, and geometry of collection frames on the total losses of soybean harvest. Engenharia Agricola. 2019. Vol. 39(4). 482-489.

7. GOST R 52778-2007. Testing of agricultural machinery. Methods of operational and technological assessment. – M.: “Standardinform”. – 2008. – 24s.

Информация об авторах

Г.Н. Ерохин - кандидат технических наук; В.В. Коновский – научный сотрудник.

Information about the authors

G. Erokhin - Candidate of Technical Sciences; V. Konovskiy – Senior 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): 18.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 21.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 629.3.012
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-40-47

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА МАНЕВРЕННОСТЬ ТРАКТОРА СО ВСЕМИ УПРАВЛЯЕМЫМИ КОЛЕСАМИ

Александр Николаевич Беляев [1], ***Владимир Иванович Оробинский*** [2], ***Татьяна Владимировна Тришина*** [3]
[1,2,3] *Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия*
[1] aifkm_belyaev@mail.ru, [2] n7477@mail.ru, [3] t.v.trishina@gmail.com

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Беляев, aifkm_belyaev@mail.ru
Corresponding author: Alexander Belyaev, aifkm_belyaev@mail.ru

Реферат. *Приведены результаты теоретического анализа по оценке влияния продольной базы и колеи трактора со всеми управляемыми колесами на его основные геометрические и кинематические характеристики при криволинейном движении, характеризующие его маневренность. В качестве оценочных показателей приняты максимальные абсцисса и ордината траектории входа в поворот и минимальный теоретический радиус установившегося этапа кругового беспетлевого поворота. Дано сравнение с результатами расчетов, полученными при исследовании трактора с передними управляемыми колесами при идентичных конструктивных параметрах и эксплуатационных условиях. Для определения необходимых искомых параметров, описывающих траекторию криволинейного движения трактора, получены уравнения параметрического вида. Анализ результатов расчетов показал, что при поочередном увеличении длины продольной базы с 2,2 м до 3,0 м и ширины колеи с 1,2 м до 2,2 м, при остальных неизменных конструктивных и эксплуатационных характеристиках, минимальный радиус возрастает, соответственно, на 18,5 % и 16,3 %, а максимальная ордината траектории входа в поворот – на 3,9 % и 16,6 %, при этом максимальная абсцисса этого участка траектории уменьшается на 20,4 % и 40,4 %. Сравнение способа поворота, являющегося предметом исследования в настоящей работе со способом поворота передними управляемыми колесами при прочих равных условиях показало эффективность первого из них. Выявлено увеличение максимальной абсциссы в 1,75 раза, но уменьшение максимальной ординаты в 1,05 раза и минимального радиуса поворота в 1,69 раза. дает основание говорить о лучшей маневренности трактора со всеми управляемыми колесами.*

Ключевые слова: *трактор, маневренность, колесная база, колея, абсцисса, ордината, траектория, радиус поворота.*

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DESIGN PARAMETERS ON TRACTOR ANEUVERABILITY WITH ALL STEERABLE WHEELS

Alexander Belyaev [1], ***Vladimir Orobinsky*** [2], ***Tatiana Trishina*** [3]
[1,2,3] *Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia*
[1] aifkm_belyaev@mail.ru, [2] n7477@mail.ru, [3] t.v.trishina@gmail.com

Abstract. *The results of a theoretical analysis are presented to assess the influence of the longitudinal base and track of a tractor with all steerable wheels on its basic geometric and kinematic characteristics in curved motion, characterizing its maneuverability. The maximum abscissa and ordinate of the trajectory of the entrance to the turn and the minimum theoretical radius of the steady-state stage of a circular loop-free turn are taken as estimated indicators. A comparison is given with the calculation results obtained in the study of a tractor with front steerable wheels under identical design parameters and operating conditions. To determine the necessary desired parameters describing the trajectory of the*

curved movement of the tractor, parametric equations are obtained. Analysis of the calculation results showed that with an alternate increase in the length of the longitudinal base from 2.2 m to 3.0 m and the track width from 1.2 m to 2.2 m, with the remaining unchanged design and operational characteristics, the minimum radius increases, respectively, by 18.5% and 16.3%, and the maximum ordinate of the trajectory of entry into the turn – by 3.9% and 16.6 %, while the maximum abscissa of this section of the trajectory decreases by 20.4 % and 40.4%. A comparison of the turning method, which is the subject of research in this paper, with the method of turning the front steerable wheels, all other things being equal, showed the effectiveness of the first of them. An increase in the maximum abscissa by 1.75 times was revealed, but a decrease in the maximum ordinate by 1.05 times and the minimum turning radius by 1.69 times. This gives reason to talk about the best maneuverability of a tractor with all steerable wheels.

Keywords: *tractor, maneuverability, wheelbase, track, abscissa, ordinate, trajectory, turning radius*.

Для цитирования: Беляев А.Н., Оробинский В.И., Тришина Т.В. Анализ влияния конструктивных параметров на маневренность трактора со всеми управляемыми колесами // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 40-47. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-40-47.

For citation: Belyaev A., Orobinsky V., Trishina T. Analysis of the influence of design parameters on the maneuverability of a tractor with all steerable wheels. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 40-47. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-40-47.

Введение.

Важным эксплуатационным свойством универсально-пропашного колесного трактора, определяющим качество выполнения технологической операции, приспособляемость к условиям функционирования, удобство и эффективность управления, является маневренность – способность изменять требуемым образом положение на возможно минимальной площади при движении по траектории малого радиуса кривизны с резким изменением направлений, и вписываться в необходимые габариты [1]. Для решения проблемы улучшения маневренности колесного трактора необходимо выявление влияния конструктивных и эксплуатационных факторов на характеристики, определяющие его коридор движения.

Основными конструктивными параметрами, влияющими на маневровые свойства колесной машины являются продольная (колесная) база и колея, для обеспечения оптимального сочетания величин которых, при сохранении качественных показателей машины при эксплуатации, необходимо принятие некоторых компромиссных решений [2], так как, например, при удлинении базы, для сохранения маневренности, необходимо увеличение предельных углов поворота управляемых колес, а действующие стандарты ограничивают ширину колеи.

Кроме того, увеличение этих параметров приводит к возрастанию массы машины, что очевидно, скажется на условиях качения колес и на топливной экономичности [3].

Также, как известно, их изменение оказывает значительное влияние на перераспределение нормальных нагрузок по мостам и бортам машины и, следовательно, на величины боковых и касательных сил [2].

Материалы и методы.

Цель настоящей работы состоит в теоретической оценке влияния основных конструктивных параметров на маневренность колесного трактора.

В соответствие с этим задачами исследований является выявление закономерностей изменения величин длины L колесной базы и ширины B колеи универсально-пропашного трактора на геометрические и кинематические характеристики криволинейного движения (рисунок 1).

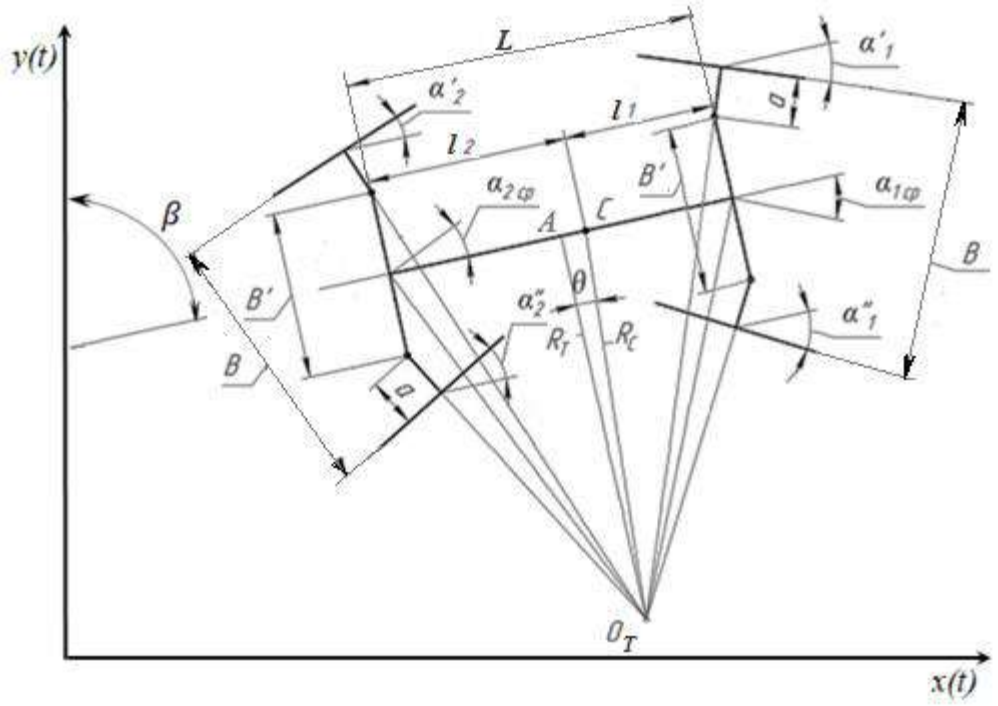


Рисунок 1 – Расчетная плоская схема поворота трактора со всеми управляемыми колесами

Так как кинематические способы поворота применяются в настоящее время для управления большинством современных колесных тракторов, и процесс криволинейного движения двухосных колесных машин с передними управляемыми колесами на различных этапах поворота довольно подробно рассмотрен в литературе, поэтому для решения поставленных задач предметом исследований выбран способ поворота, при котором изменение направления движения реализуется поворотом всех четырех управляемых колес в противоположные стороны относительно рамы (рисунок 1). Такая компоновка в последнее время находит все большее применение, так как является наиболее действенным конструктивным мероприятием для уменьшения почти в два раза его радиуса поворота [4, 5, 6].

Исследования будем проводить по характеру поведения трактора при реализации беспетлевого кругового поворота, так как его комбинации являются основой большинства из известных способов поворота, и при выполнении маневра на ограниченной площадке циклы поворота почти во всех случаях в качественном отношении идентичны [7].

Так как тракторы, выбранные в качестве объекта исследований, в основном работают в полевых условиях, то на них накладываются, в первую очередь, ограничения в виде агротехнических требований, которые заключаются в стремлении к сокращению площади поворотной полосы, что является признаком значительного уменьшения количества повреждаемых растений, уплотнения и распыления почвы, и поэтому в качестве оценочных показателей маневровых свойств приняты граничные геометрические и кинематические характеристики изучаемого типа траектории – максимальные значения абсциссы x_{max} и ординаты y_{max} траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота $R_T = R_{Tmin}$ на установившемся участке поворота, относящиеся к кинематическому центру трактора [2].

Текущие координаты принятой за кинематический центр трактора точки A на его продольной оси, находящейся на пересечении перпендикуляра к ней, проведенного из мгновенного центра поворота O_T, находились при переменном радиусе кривизны путем решения системы дифференциальных уравнений с искомыми функциями времени $x=x(t)$ и $y=y(t)$ согласно принятой

плоской расчетной схемы с учетом допущений об отсутствии бокового увода и скольжения колес (рисунок 1) [8, 9]

$$\left.\begin{array}{c}\rho=\left|\dfrac{(\dot{x}^2+\dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x}\ddot{y}-\dot{y}\ddot{x}}\right|;\\ v^2=\dot{x}^2+\dot{y}^2\end{array}\right\}, \quad (1)$$

где $\rho=\rho(t)$ – мгновенный радиус кривизны траектории поворота трактора, м;

t – время выполнения трактором маневра, с;

v – скорость поступательного движения трактора, м/с.

Если поворот происходит на деформируемом грунте, а также, если схема или конструкция трактора создает дополнительный момент сопротивления повороту, то принятию допущения о не учете влияния динамических характеристик на кинематические параметры должен предшествовать соответствующий анализ [2].

Очевидно, выбор той или иной формулы для определения радиуса кривизны траектории при изучении процесса криволинейного движения колесной машины определяется задачами, которые в конкретном случае стоят перед исследователем. Однако, когда необходимо проводить многовариантные расчеты, например при дискретном изменении длины L продольной базы и ширины B колеи, использование универсальной формулы для определения минимального теоретического радиуса поворота трактора со всеми управляемыми колесами, которая разработана на основании того, что в нее входит большинство параметров, которые определяются, а в некоторых случаях и ограничиваются, его конструкцией, наиболее эффективно [2]

$$R_T=\frac{\left[\dfrac{B'}{2}(tg\alpha_1''+tg\alpha_2'')+L\right]\cos\alpha_1''\cos\alpha_2''}{\sin(\alpha_1''+\alpha_2'')}, \quad (2)$$

где B' – расстояние между осями шкворней рулевых трапеций (принято допущение (что вполне оправдано конструктивными особенностями большинства существующих типов современных колесных машин [5]) о равенстве расстояний между осям шкворней передних и задних колес), м;

α_1'' и α_2'' – соответственно, углы поворота передних и задних, внутренних, по отношению к центру поворота, управляемых колес, град.

Совместным решением (1) и (2) были выведены уравнения для расчета координат траекторий (абсцисс и ординат) кинематического центра колесной машины со всеми управляемыми колесами при входе в поворот [2, 10]

$$x(t)=v\int_0^t\sin\left[v\int_0^{t_1}\frac{\sin(\omega_1\tau+\omega_2\tau)}{\left[\dfrac{B'}{2}(tg\omega_1\tau+tg\omega_2\tau)+L\right]\cdot\cos\omega_1\tau\cos\omega_2\tau}d\tau\right]dt_1; \quad (3)$$

$$y(t)=v\int_0^t\cos\left[v\int_0^{t_1}\frac{\sin(\omega_1\tau+\omega_2\tau)}{\left[\dfrac{B'}{2}(tg\omega_1\tau+tg\omega_2\tau)+L\right]\cdot\cos\omega_1\tau\cos\omega_2\tau}d\tau\right]dt_1. \quad (4)$$

где ω_1 и ω_2 – соответственно, угловые скорости поворота передних и задних управляемых колес трактора в поперечной плоскости относительно его остова, $с^{-1}$.

Дальнейшие рассуждения в настоящей работе будут отнесены к выбранному кинематическому центру *A*, но при необходимости все выводы возможно генерировать на любые другие базовые точки трактора, так как его координаты связаны с ними вполне определенными геометрическими соотношениями.

Например, требуется определить координаты и радиус кривизны траектории, описываемой серединой левого переднего тракторного колеса.

Текущие координаты траектории центра масс трактора (точка *C* на рисунке 1) устанавливаются по следующим уравнениям:

$$x_C(t) = x(t)\cos\theta; \tag{5}$$

$$y_C(t) = y(t)\sin\theta, \tag{6}$$

где на рисунке 1:

$$\theta = arctg\left(\frac{tg\alpha_1''(R_T - \frac{B'}{2}) - l_1}{R_T}\right),$$

а l_1 – расстояние от центра тяжести *C* до середины переднего моста, *м.*

С учетом (5) и (6) имеем для рассматриваемого колеса

$$x_1' = x_C + l_1 \cdot \sin\beta - B'/2 \cdot \cos\beta - a \cdot \cos\left(\beta + \alpha_1'\right); \tag{7}$$

$$y_1' = y_C + l_1 \cdot \cos\beta + B'/2 \cdot \sin\beta + a \cdot \sin\left(\beta + \alpha_1'\right), \tag{8}$$

где *a* – плечо обката, м.

Курсовой угол трактора и угол поворота левого переднего колеса вычисляются, соответственно, по следующим зависимостям (2):

$$\beta = v\int_0^t \frac{d\tau}{\rho};$$

$$\alpha_1' = arctg\left(\frac{tg\alpha_1'' \cdot (2R_T - B')}{2R_T + B}\right).$$

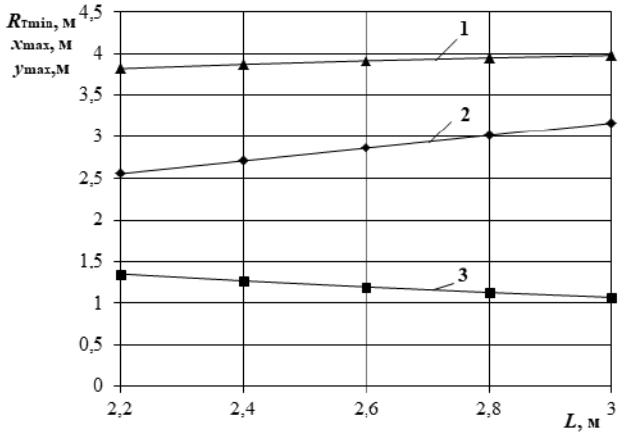
Радиус кривизны в любой точке траектории, с учетом (3) и (4), (7) и (8), определяется по первому уравнению системы (1).

Следует отметить, что последовательное решение уравнений (3) и (4) с определенным шагом интегрирования позволяют не только определить координаты основных точек трактора, но и также построить траекторию их движения (2).

Результаты и обсуждение.

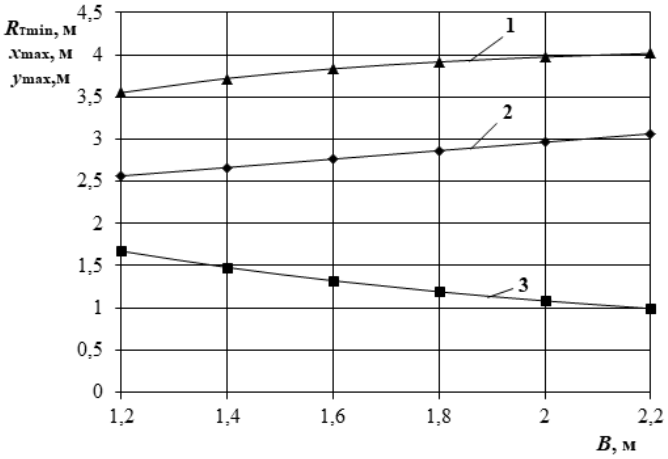
Значения абсцисс x_{max}, ординат y_{max} и минимального радиуса поворота R_{Tmin}, очевидно, согласно (3) и (4), будут получены в верхней точке траектории входа в поворот, соответствующей, например одним из принятых нами начальным условиям: $t=t_{max}$=3 с, ω_1=0,195 с$^{-1}$ и ω_2=0,195 с$^{-1}$ (рисунок 2, рисунок 3).

Кроме того, были также приняты другие следующие исходные параметры: $\alpha_1'' = \alpha_{1max}''$ =33°30' и $\alpha_2'' = \alpha_{2max}''$ =33°30', *v*=1,41 м/с. При этом при дискретном изменении длины *L* постоянна ширина *B'*=1,8 м, а при варьировании *B'* низменна *L*=2,6 м.



1– y_{max} ; 2 – R_{Tmin}; 3 – x_{max}

Рисунок 2 – Зависимость максимальных координат траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота от продольной базы трактора



1– y_{max} ; 2 – R_{Tmin}; 3 – x_{max}

Рисунок 3 – Зависимость максимальных координат траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота от расстояния между осями шкворней трактора

Синхронный поворот передних и задних колес на некоторые углы $\alpha_1'' = \alpha_2''$ за время t осуществляется с постоянными угловыми скоростями $\omega_1=\omega_2$, что вполне допустимое, с достаточной для практики точностью, условие [2, 10].

В результате расчетов выявлено, что при поочередном увеличении L с 2,2 м до 3,0 м и B' с 1,2 до 2,2 м при остальных неизменных входных параметрах R_{Tmin} возрастает в обоих случаях почти с одинаковой интенсивностью и практически по линейным зависимостям: в первом варианте R_{Tmin}=2,562…3,166 *м*, во втором – 2,564…3,064 *м* (рисунок 2 и рисунок 3, зависимости 2). В процентном отношении – это, соответственно – 18,5 % и 16,3 %.

Такая же практически картина, разве что необходимо отметить некоторую нелинейность и чуть большую интенсивность роста зависимости при повышении B', по отмеченным критериям и по изменению y_{max} в рассматриваемых случаях (рисунок 2 и рисунок 3, зависимости 1): при варьировании L – y_{max}=3,823…3,978 м, а при изменении B' – y_{max}=3,530…4,016 м, что дает 3,9 % и 11,6 %.

Зависимости x_{max} от L и B' также не очень значительно отличаются друг от друга по интенсивности, но в отличие от R_{Tmin} и y_{max} характер изменения у них другой: происходит уменьшение x_{max} с 1,344 м до 1,070 м и с 1,673 м до 0,993 м при вышеуказанных пределах роста L и B', что соответствует 20,4 % и 40,64 % (рисунок 1 и рисунок 2, зависимости 3).

При этом с увеличением L средние углы поворота передних и задних колес $\alpha_{1cp}=\alpha_{2cp}$ возрастают с 23,240° до 25,349°, а с увеличением B' – уменьшаются с 26,885° до 22,980°.

Приведем для примера один из вариантов результатов расчётов при L=2,6 м и B'=1,8 м: x_{max}=1,192 м, y_{max}=3,915 м, R_{Tmin}=2,864 м, $\alpha_{1cp}=\alpha_{2cp}$=24,19° и β=48,942°.

При тех же начально-исходных параметрах при повороте передними управляемыми колесам согласно (3), (4) и первому уравнению (1) при ω_2=0 и $\alpha_2''=0$ получили следующие значения: x_{max}=0,68 м, y_{max}=4,13 м, R_{Tmin}=4,828 м, α_{1cp}=28,303°, α_{2cp}=0° и β=28,303°.

При сравнении имеем: x_{max} при повороте всеми колесами в 1,75 раза выше, чем передними, а y_{max} уменьшается всего лишь в 1,05 раза, за счет этого площадь участка входа в поворот примерно в 1,6 раза больше, но затем возможно последующее продолжение маневра на участке установившегося движения с R_{Tmin} меньшим в 1,69 раза и при этом величина угла β в 1,73 раза выше, что позволяет получить более рациональное размещение центра окружности радиуса R_{Tmin}, влияющее на общую площадь поверхности для разворота.

Выводы.

1. Отмечено, что маневренность является одним из важных эксплуатационных свойств колесного трактора, определяющим качество выполнения технологической операции, приспособляемость к условиям функционирования, удобство и эффективность управления.

2. В качестве оценочных показателей маневровых свойств колесного трактора предложены максимальные значения абсциссы и ординаты траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота на установившемся участке поворота.

4. Как увеличение длины продольной базы, так и ширины колеи приводит к возрастанию максимальной ординаты траектории входа в поворот и минимального теоретического радиуса поворота, и, наоборот, – к уменьшению максимальной абсциссы траектории входа в поворот.

5. При повороте трактора всеми колесами более чем в 1,5 раза уменьшается площадь поворотной полосы в сравнении с поворотом передними колесами.

6. Полученные результаты расчетов основных геометрических и кинематических характеристик криволинейного движения на различных этапах поворота колесного трактора со всеми управляемыми колесами позволят выбрать рациональные значения длины продольной базы и ширины колеи.

Список источников

1. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.

2. Беляев А.Н. Повышение эффективности работы машинно-тракторных агрегатов на базе интегральных универсально-пропашных колёсных тракторов: дис. … д-ра техн. наук: 05.20.01 / А.Н. Беляев. Мичуринск-наукоград, 2019. 440 с.

3. Автомобильный справочник: пер. с англ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЗАО «КЖИ «За рулём», 2004. 992 с.

4. Скотников В.А., Мащенский А.А., Солонский А.С. Основа теории и расчета трактора и автомобиля. М.: Агропромиздат, 1986. 383 с.

5. Смирнов Г.А. Теория движения колесных машин. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

6. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е. и др. Тракторы: теория. М.: Машиностроение, 1988. 374 с.

7. Иофинов С.А., Бабенко Э.П., Зуев Ю.А. Справочник по эксплуатации машинно-тракторного парка. М.: Агропромиздат, 1985. 272 с.

8. Болотин С.В., Карапетян А.В., Кугушев Е.И., Трещев Д.В. Теоретическая механика. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 432 с.

9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984. 831 с.

10. Belyaev A.N., Kozlov V.G., Vysotskaya I.A., Trishina T.V. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn / International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. Vol. 9. №. 1. Pp. 4527-4531.

References

1. Litvinov A.S., Farobin Ya.E. Automobile. Theory of performance properties. M.: Mechanical Engineering, 1989. 240 p.

2. Belyaev A.N. Increasing the efficiency of machine-tractor units based on integral universal row-crop wheeled tractors: Dis. ...Dr.Tech. Sciences: 05.20.01 / A.N. Belyaev. Michurinsk-naukograd, 2019. 440 p.

3. Automotive reference book: per. from English 2nd ed., revised. and additional M.: CJSC “KZHI “Za Rulem””, 2004. 992 p.

4. Skotnikov V.A., Mashchensky A.A., Solonsky A.S. The basis of the theory and calculation of tractors and cars. M.: Agropromizdat, 1986. 383 p.

5. Smirnov G.A. The theory of movement of wheeled vehicles. 2nd ed., add. and processed M.: Mechanical Engineering, 1990. 352 p.

6. Guskov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E. etc. Tractors: theory. M.: Mechanical Engineering, 1988. 374 p.

7. Iofinov S.A., Babenko E.P., Zuev Yu.A. Handbook for operating the machine and tractor fleet. M.: Agropromizdat, 1985. 272 p.

8. Bolotin S.V., Karapetyan A.V., Kugushev E.I., Treshchev D.V. Theoretical mechanics. M.: Publishing center "Academy", 2010. 432 p.

9. Korn G., Korn T. Handbook of mathematics for scientists and engineers. M.: Nauka, 1984. 831 p.

10. Belyaev A.N., Kozlov V.G., Vysotskaya I.A., Trishina T.V. Computation of Vehicle Motion Path upon Entering Turn / International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. Vol. 9. No. 1.Pp. 4527-4531.

Информация об авторах

А.Н. Беляев – доктор технических наук, доцент; В.И. Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор; Т. В. Тришина – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. Belyaev – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor; V. Orobinsky - Doctor of gricultural Sciences, Professor; T. Trishina - 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): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 18.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.347.3.012.3.001.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-48-56

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ СМЕСИТЕЛЕ

Юлия Владимировна Мещерякова [1], ***Станислав Александрович Нагорнов*** [2]
[1, 2] *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Россия*
[1] *Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия*
[1]yulya-belova@yandex.ru, [2]snagornov@yandex.ru

Автор ответственный за переписку: Юлия Владимировна Мещерякова, yulya-belova@yandex.ru
Corresponding author: Yulia Meshcheryakova, yulya-belova@yandex.ru

Реферат. *Инновационным способом решения актуальных проблем энергосбережения и снижения загрязнения окружающей среды при работе автотракторной техники может стать применение в ней специально разработанного ультразвукового смесителя моторного топлива. Создание кавитационных областей в ультразвуковом смесителе способствует дроблению длинных углеводородных цепей и тем самым позволяет улучшать качество топлива (дизельного и смесевого дизельного топлива), снижать расход топлива, продлевать работу топливной системы дизельного двигателя. С целью создания в смесителе оптимальной кавитационной области исследованы возможные режимы ультразвуковой обработки. Установление режимов обработки осуществляли по изменению напорно-расходной зависимости на лабораторной установке, а определение областей кавитации исходя из методики численного моделирования потоков топлива в исследуемой конструкции. Численное моделирование позволило установить области кавитации с различной акустической мощностью. Проведенные экспериментальные исследования гидродинамических параметров реального смесителя указывают на адекватность разработанной модели. В зависимости от перепада давления определены 8 режимов ультразвукового воздействия, которые в свою очередь разделили на докавитационные и кавитационные. Диапазон рабочего давления составил от 0 до 4 атм при перепаде в 0,5 атм для каждого режима. При достижении перепада давления в 2,5 атм наблюдается максимальное снижение кинематической вязкости (в среднем на 23%) для всех видов топлива. Дальнейшее изменение кавитационного режима в сторону увеличения перепада давления не приводит к существенному изменению кинематической вязкости моторных топлив (около 2%). Следовательно, для оптимальной работы установки подходит 5 кавитационный режим*.

Ключевые слова*: ультразвук, кавитация, дизельное топливо, модель, режимы*.

INVESTIGATION OF THE CAVITATION PROCESS IN AN ULTRASONIC MIXER

Yulia Meshcheryakova [1], ***Stanislav Nagornov*** [2]
[1,2]*All-russian research institute for use of machinery and petroleum products in agriculture, Tambov, Russia,*
[2]*Tambov State Technical University, Tambov, Russia*
[1]yulya-belova@yandex.ru, [2]snagornov@yandex.ru

Abstract. *An innovative way to solve pressing problems of energy saving and reducing environmental pollution during the operation of automotive equipment can be the use of a specially designed ultrasonic motor fuel mixer. The creation of cavitation areas in an ultrasonic mixer promotes the fragmentation of long hydrocarbon chains and thereby improves the quality of fuel (diesel and mixed diesel fuel), reduces*

fuel consumption, and prolongs the operation of the diesel engine fuel system. Possible modes of ultrasonic treatment were investigated in order to create an optimal cavitation region in the mixer. The establishment of treatment modes was carried out by changing the pressure-flow relationship in a laboratory installation, and the determination of cavitation areas based on the technique of numerical modeling of fuel flows in the structure under study. Numerical modeling made it possible to establish cavitation regions with different acoustic powers. The experimental studies of the hydrodynamic parameters of a real mixer indicate the adequacy of the developed model. 8 modes of ultrasonic exposure are defined depending on the pressure drop; they, in turn, are divided into pre-cavitation and cavitation. The operating pressure range was from 0 to 4 atm with a difference of 0.5 atm for each mode. The maximum reduction in kinematic viscosity (on average 23%) for all types of fuel is observed when the pressure drop reaches 2.5 atm. A further change in the cavitation regime towards an increase in the pressure drop does not lead to a significant change in the kinematic viscosity of motor fuels (about 2%).

Keywords: *ultrasound, cavitation, diesel fuel, model, modes.*

Для цитирования: Мещерякова Ю.В., Нагорнов С.А. Исследование кавитационного процесса в ультразвуковом смесителе // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 48-56. https://doi.org/10.35887/2305- 2538-2024-1-48-56.

For citation: Meshcheryakova Yu., Nagornov S. Investigation of the cavitation process in an ultrasonic mixer. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 48-56. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-48-56.

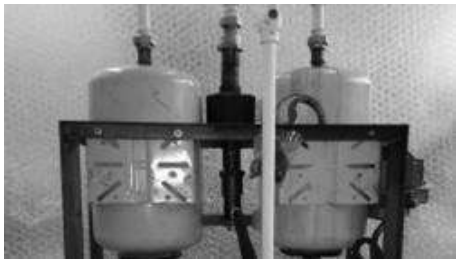
Введение. Применение кавитационной обработки тесно связано ультразвуковым воздействием. При реализации ультразвука в жидких средах возникает сопутствующее явление кавитация. Кавитация характеризуется образованием пузырьков газа в зоне пониженного давления. Пузырек растет, запасая энергию, далее проходит стадия сжатия, и пузырек мгновенно сокращается в объеме и схлопывается. Создание масштабного схлопывания пузырьков, т.е. кавитационного режима в ультразвуковых аппаратах позволяет реализовать множество механохимических, механотехнологических и химических процессов [1-5].

При колебании и схлопывании кавитационных пузырьков в обрабатываемом объеме (например, при обработке дизельного топлива) скапливается энергия, обусловленная высокими значениями давления и температуры, что, вероятнее всего, обуславливает деструкцию тяжелых молекул углеводородов, появление более легких и разветвленных молекул. Все это сказывается на качестве конечного продукта: изменению фракционного состава, снижению содержания смол (при их наличии), изменению физико-химических характеристик. Также благодаря модификации дизельного топлива в однородную гомогенную массу уменьшается расход топлива, повышается его теплотворная способность, обеспечивается более полное сгорание, поскольку наше топливо в конечном итоге трансформируется в виде энергетически насыщенного моторного топлива.

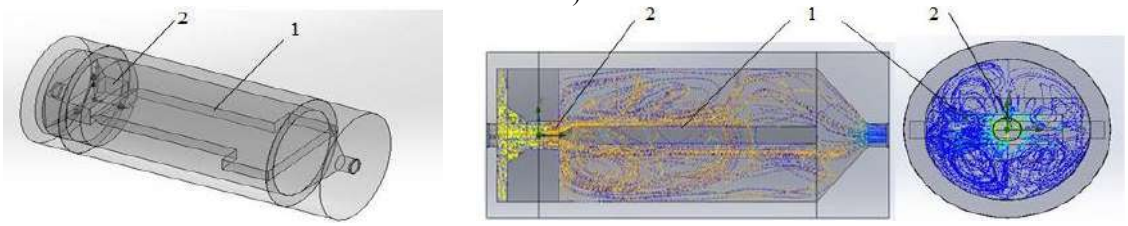
Наиболее востребованы пьезоэлектрические и гидродинамические устройства. Однако, для создания кавитационного режима в них, необходимы данные об оптимальных ультразвуковых параметрах обработки для различных по вязкости моторных топлив. В предыдущих работах показана эффективность обработки моторного топлива на ультразвуковом гидродинамическом смесителе. Однако при его работе не уточнялись необходимые режимы обработки для осуществления кавитации. В связи с этим, целью данной работы является установление кавитационных ультразвуковых режимов обработки моторного топлива на лабораторной установке, на примере дизельного топлива.

Материалы и методы. Установление режимов ультразвуковой обработки осуществляли по изменению напорно-расходной зависимости в разработанной установке, (рисунок 1а) а определение областей кавитации исходя из методики численного моделирования потоков топлива в исследуемой конструкции. На рисунке 1б и 1в представлены модели ультразвукового смесителя в общем виде (б) и с траекториями потока дизельного топлива (в). Ультразвуковой смеситель представляет собой камеру внутри, которой расположена тонкая пластинка. Струя топлива под давлением через сопло подается в смеситель, попадает на пластину и она совершает колебания, обеспечивающие смешение и обработку дизельного топлива. Расчет течения исследуемого

топлива в исследуемой модели осуществляется решением встроенных в программу известных дифференциальных уравнений движения, неразрывности, энергии. Задача решается методом решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для моделирования турбулентных течений [6].



а)



1 - пластина; 2 - сопло.

а) в общем виде б) с траекториями потока

Рисунок 1 – Фото и модель ультразвукового смесителя

Результаты и их обсуждение. Результаты по обработке топлива показали, что использование ультразвуковых смесителей способствует улучшению качества топлива (рисунок 2), снижению расхода топлива, позволяет продлевать работу топливной системы дизельного двигателя (таблица 1), способствует изменению углеводородного состава, что подтверждено хроматографическими исследованиями.

Таблица 1 – Показатели ресурсных характеристик топливной аппаратуры

Показатель	Цикловая подача, $мм^3$/цикл	Пусковая подача, $мм^3$/цикл	Давление подкачивающего насоса, КПа	Давление начала впрыскивания, $кгс/см^2$
без смесителя активатора	62	17,5	175	160
с активатором-смесителем (после 960 моточасов)	65	20	190	165

На рисунке 2 представлена кинематическая вязкость топлив, прошедших кавитационную обработку в ультразвуковом смесителе.

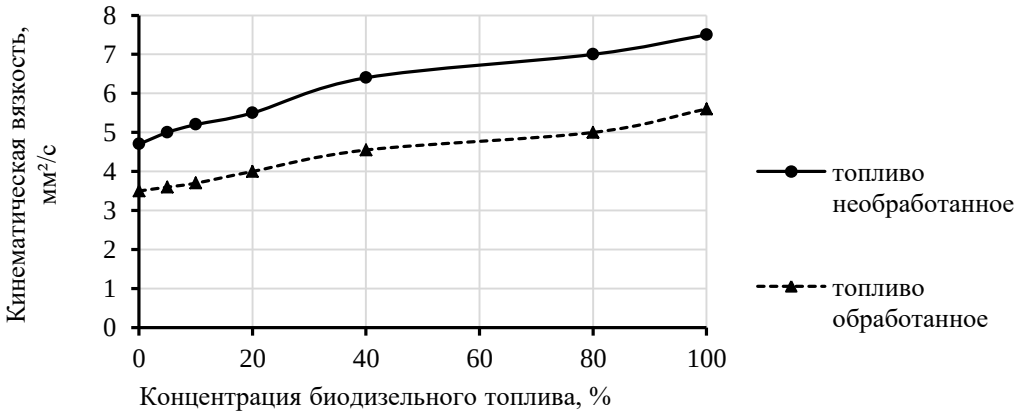


Рисунок 2 – Динамика кинематической вязкости

Обработка дизельного топлива в ультразвуковом кавитационном смесителе, дизельного смесевого топлива (топлива полученного смешением дизельного топлива и метиловых эфиров растительных масел) показала изменение вязкостно-плотностных свойств. Также обработка растительных масел совместно с дизельным топливом в роторном кавитационном смесителе позволяет снижать вязкость получаемого масла, позволяет улучшить свойства обрабатываемого смесевого топлива (топлива полученного смешением обработанного растительного масла и дизельного топлива) и как следствие уменьшить нагар на соплах топливных форсунок и в цилиндрах [7].

При прохождении топлива через данные устройства возникают дополнительные физические явления (кавитация, гомогенизация, вихреобразование), которые воздействую на углеводородные молекулы и способствуют их дроблению и активации, что выражается в изменении физико-химических характеристик дизельного топлива. Подробные исследования по этому направлению представлены в других публикациях [8-10]. Данная статья посвящена установлению причин изменения этих физико-химических параметров, а именно явлению кавитации.

С помощью моделирования, разработанного ультразвукового смесителя, на рисунке 3, 4 показано распределение давления в различных точках конструкции (по всей длине внутренней и внешней части сопла, на заостренной части пластины, верхней и нижней частях пластины). Установлено, что при выходе дизельного топлива из сопла и попадании на заостренную часть пластины происходит резкое повышение давления. Это наглядно прослеживается на рисунке 3 и численно можно увидеть на рисунке 4, давление в области пластины (кривые 1,3, 4, 6) выше, чем давление в сопле (кривая 5).

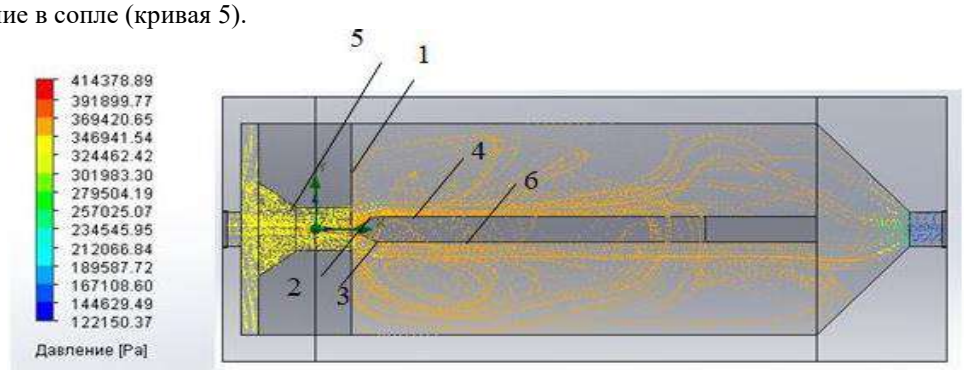


Рисунок 3 – Фото распределения давления внутри смесителя

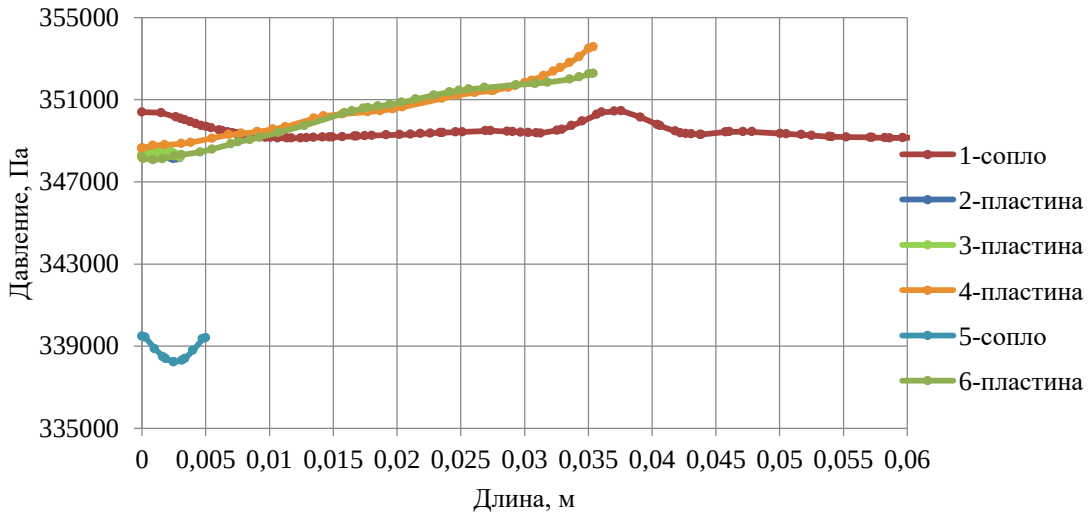


Рисунок 4 – Изменение давления в различных точках смесителя

На рисунке 5 показаны длины траектории потока дизельного топлива в зависимости от акустической мощности или по-другому распределение акустической мощности по длине смесителя. При распределении уровня акустической мощности по длине смесителя замечено, что усиление акустической мощности наблюдается при выходе потока дизельного топлива из сопла и попадании его на заострённую часть колебательного элемента (пластины), что может свидетельствовать о наличии явления кавитации (области активной кавитации). По мере удаления потоков дизельного топлива от сопла и пластины, колебания затухают, уровень акустической мощности снижается, кавитация прекращается (область отсутствия кавитации).

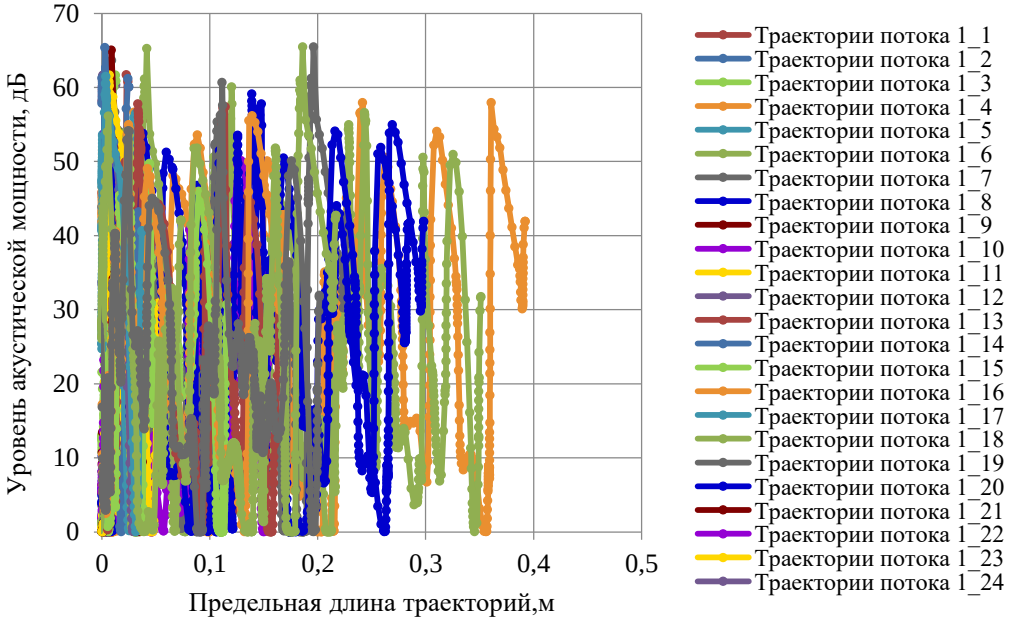


Рисунок 5 – Распределение уровня акустической мощности

При изменении подаваемого давления характер распределения акустической мощности по длине смесителя остается прежним, но значения увеличиваются. Так как при увеличении перепада давления уровень акустической мощности увеличивается, следовательно, размер кавитационной области может увеличиваться (рисунок 6).

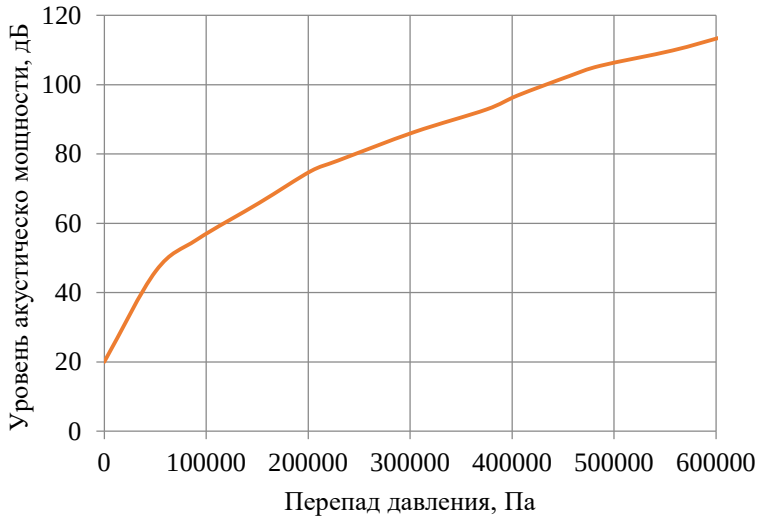


Рисунок 6 – Влияние давления на уровень акустической мощности в смесителе

Для проверки адекватности модели и расчетных зависимостей были выполнены экспериментальные исследования гидродинамических параметров разработанного смесителя (рисунок 7).

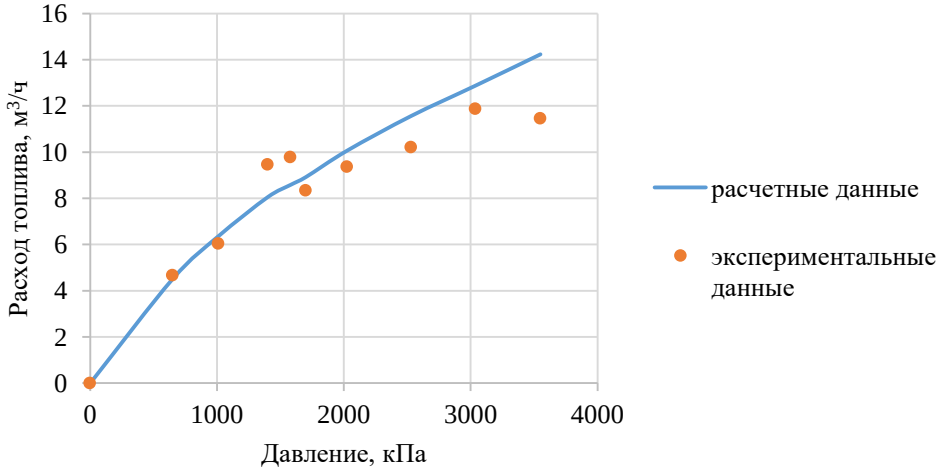


Рисунок 7 – Напорно-расходная зависимость гидродинамического смесителя

Проведенные исследования показали, что погрешность расчета в среднем 7-10% по сравнению с экспериментальными данными, что говорит об адекватности разработанной модели.

В зависимости от перепада давления в таблице 2 представлены 8 режимов ультразвукового воздействия, которые в свою очередь разделили на докавитационные и кавитационные. Диапазон рабочего давления составил от 0 до 4 атм при перепаде в 0,5 атм для каждого режима.

Таблица 2 – Режимы воздействия на моторное топливо

Режимы	1	2	3	4	5	6	7	8
	докавитационный	кавитационный						
ΔP, атм	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4
Области кавитации	3-4	2-4	1-4					

При достижении перепада давления в 2,5 атм наблюдается максимальное снижение кинематической вязкости (в среднем на 23%) для всех видов топлива. Дальнейшее изменение кавитационного режима в сторону увеличения перепада давления не приводит к существенному изменению кинематической вязкости моторных топлив (около 2%). Следовательно, для оптимальной работы установки подходит 5 кавитационный режим (рисунок 8).

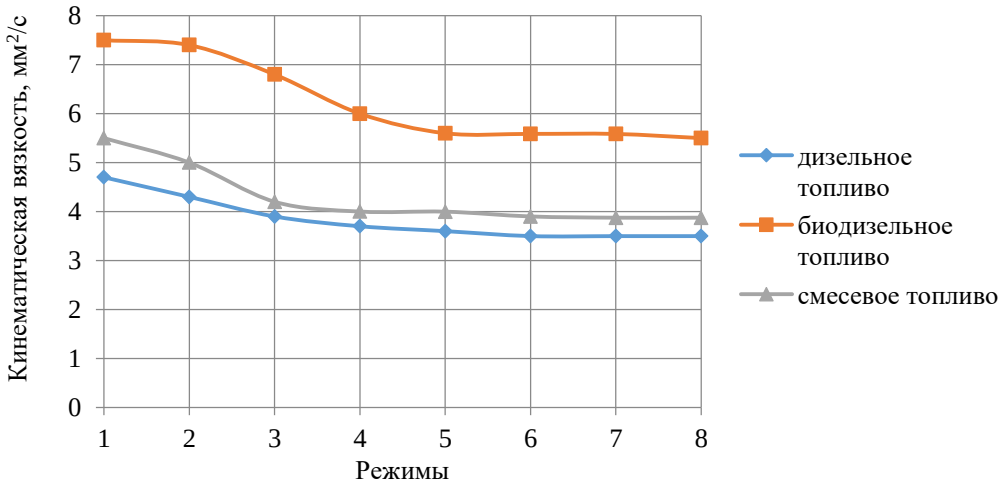


Рисунок 8 – Динамика кинематической вязкости

Заключение. Реализация ультразвукового воздействия в разработанном гидродинамическом ультразвуковом смесителе происходит в докавитационном и кавитационных режимах работы установки. Кавитационные режимы способствуют дроблению длинных углеводородных цепей и тем самым позволяют улучшить основные показатели качества моторного топлива.

Смоделировано течение потоков моторного топлива в акустическом гидродинамическом смесителе. Установлено, наличие областей с различной акустической мощностью. В зависимости от перепада давления для гидродинамического излучателя установлены 8 режимов ультразвукового воздействия. Установлено, что обработку используемого моторного топлива следует проводить на 5 кавитационном режиме работы (перепад давления 2,5 атм).

Список источников

1. Акуличев, В.А. Пульсации кавитационных полостей / В.А. Акуличев // Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Рознеберга.– М.: Наука, 1970.– С. 129–167.

2. Русалин, С.М. Содержательное и математическое представление событий в гидравлической системе с кавитатором и резонатором / С.М. Русалин, В.Л. Юшко, В.В. Кузьмина // Вестник ХПИ. Сборник научных трудов. – 2010. – № 20. – С. 37–45.

3. Иванников, В.И. Кавитация и перспективы ее использования в нефтегазовой отрасли / В.И. Иванников // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 3.

4. Хмелев, В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев, О.В. Попова. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.

5. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) / А.Ю. Радзюк, Е. Б. Истягина, Л.В. Кулагина, А. В. Жуйков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 9. – С. 209–218.

6. Яковлев, А.Ю. Численное моделирование и проектирование новых типов движителей / А.Ю. Яковлев // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019, № 1(387). С. 32–50.

7. Мещеряков, А.Г. Исследование работы топливной аппаратуры на смесевом топливе / А. Г. Мещеряков // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: Сборник научных докладов XXI Международной научно-практической конференции, Тамбов, 28–29 сентября 2021 года. – Тамбов: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве", 2021. – С. 139-144.

8. Нагорнов, С.А. Работа двигателя на разных видах топлива / С.А. Нагорнов, Р.В. Фокин // Сельский механизатор. – 2008. – № 7. – С. 42-43.

9. Мещеряков, А.Г. Совершенствование комбинированного устройства для получения и активации дизельного смесевого топлива: специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мещеряков Александр Геннадьевич, 2022. – 141 с.

10. Романцова, С.В. Улучшение эксплуатационных и экологических свойств дизельного топлива / С.В. Романцова, С.А. Нагорнов // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства, Тамбов, 24 сентября 2013 года / Сборник научных докладов XVII Международной научно-практической конференции. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2013. – С. 293-297.

References

1. Akulichev, V.A. Pulsations of cavitation bands / V.A. Akulichev // physical foundations of ultrasonic technology. L.D. Rosenberg. – M.: Nauka, 1970. – pp. 129-167.

2. Rusalin, S.M. Meaningful and mathematical representation of events in a hydraulic system with a cavitator and resonator / S.M. Rusalin, V.L. Yushko, V.V. Kuzmina // Bulletin of the KHPI. Collection of scientific papers. 2010. – No. 20. – pp. 37-45.

3. Ivannikov, V.I. Cavitation and prospects of its use in the oil and gas industry / V.I. Ivannikov // construction of oil and gas wells on land and at sea. – 2010. – № 3

4. Khmelev, V.N. Multifunctional ultrasonic devices and their application in conditions of small production, agriculture and household / V.N. Khmelev, O.V. Popova. Barnaul: AltSTU, 1997. 160 P.

5. The current state of the use of cavitation technologies (a brief overview) / A.Y. Radzyuk, E. B. Istyagina,L.V. Kulagina, A.V. Zhuikov // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. - 2022. – vol. 333, No. 9. – pp. 209-218.

6. Yakovlev, A.Yu. Numerical modeling and design of new types of engines / A.Yu. Yakovlev // proceedings of the Krylov State Scientific Center. – 2019, No. 1(387). pp. 32-50.

7. Meshcheryakov, A.G. Investigation of the operation of fuel equipment on mixed fuel / A. G. Meshcheryakov // Improving the efficiency of the use of resources in the production of agricultural products - new technologies and equipment of a new generation for crop production and animal husbandry: collection of scientific reports of the XXI International Scientific and Practical Conference, Tambov, September 28-29, 2021. - Tambov: Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", 2021. – pp. 139-144.

8. Nagornov, S.A. Engine operation on different types of fuel / S.A. Nagornov, R.V. Fokin // rural mechanizer. – 2008. – No. 7. – pp. 42-43.

9. Meshcheryakov, A.G. Development of a combined device for obtaining and activating diesel mixed fuel: specialty 05.20.01 "technology and means of mechanization agriculture": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Meshcheryakov Alexander Gennadievich, 2022. - 141 p.

10. Romantsova, S.V. Improvement of operational and environmental properties of diesel fuel / S.V. Romantsova, S.A. Nagornov // Improving the efficiency of the use of resources in the production of agricultural products – new technologies and equipment of a new generation for crop and livestock production, Tambov, September 24, 2013 / collection of scientific reports of the XVII International Scientific and Practical Conference. Tambov: Pershin R.V. Publishing House, 2013. pp. 293-297.

Информация об авторах

Ю.В. Мещерякова - кандидат технических наук; С.А. Нагорнов - доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

Yu. Meshcheryakova - Candidate of Technical Sciences; S. Nagornov - 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): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.55
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-57-65

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЙ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ НА ПОЧВУ С ДИФФЕРЕНЦИАЦИЕЙ ПО ДЛИНЕ ПРОХОДА

Валерий Юрьевич Ревенко [1]***, Виктор Иосифович Скорляков*** [2]***,***
Татьяна Адександровна Юрина [3]
[1,2,3] *Росинформагротех, Р.п. Правдинский, Московская область, Россия*
[1] skskniish@rambler.ru https://orcid.org/0000-0003-0336-5323
[2] skorlv@yandex.ru
[3] agrolaboratorya@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-6158-5714

Автор ответственный за переписку: Валерий Юрьевич Ревенко, skskniish@rambler.ru
Corresponding author Valerij Revenko, skskniish@rambler.ru

Реферат. *Наблюдаемый в последние годы интенсивный рост вместимости бункеров зерноуборочных комбайнов сопровождается увеличением их металлоемкости и соответственно – ростом давления на почву ходовых систем данной техники. Предыдущими нашими исследованиями установлены значительные превышения максимального давления колес комбайнов относительно нормируемого стандартом уровня. Но, отсутствие методов сравнительной оценки воздействия на почву движителей комбайнов не позволяет корректно выбрать наиболее эффективный вариант для почвенных условий конкретных сельхозпредприятий. В настоящей публикации предложена методика сравнительной оценки зерноуборочных комбайнов разных классов, как по давлению на почву, изменяющемуся в процессе заполнения бункера зерном, так и по относительной площади поля, подверженной уплотнению с разной вертикальной нагрузкой. Выявлено, что при заполнении бункеров зерном, прирост максимального давления на почву ведущих колес комбайнов Дон 1500Б, Акрос 550, КЗС 3219 и Торум 780 составит соответственно 17, 43, 31 и 68 кПа или 8,4, 19,4, 15,3 и 29,1 %. При допустимом максимальном давлении на почву в летний период равном 210 кПа, площади следов указанных комбайнов со сверхнормативным давлением составит соответственно 14,0, 24,0, 15,0 и 18,4 % от площади поля. Кроме того, в статье дается визуальное представление результатов сравнительной оценки уборочных машин, включающее интервалы максимального давления движителей комбайнов, в начале и по окончании заполнения бункера зерном.*

Ключевые слова: *зерноуборочный комбайн, давление на почву, длина прохода, сравнительная оценка.*

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF GRAIN HARVESTS SOIL COMBINES WITH DIFFERENTIATION ACCORDING TO PASSAGE LENGTH

Valery Revenko [1]***, Victor Skorlyakov*** [2]***, Tatyana Yurina*** [3]
[1,2,3] *Rosinformagrotekh, Pravdinsky Township, Moscow Region, Russian Federation*
[1] skskniish@rambler.ru https://orcid.org/0000-0003-0336-5323
[2] skorlv@yandex.ru
[3] agrolaboratorya@mail.ru https://orcid.org/0000-0002-6158-5714

Abstract. *The intensive growth in the capacity of combine harvester bunkers observed in recent years is accompanied by an increase in their metal consumption and, accordingly, an increase in the pressure on the soil of the running systems of this equipment. established Significant excesses of the maximum pressure of combine wheels relative to the standard level were established by our previous studies. But, the lack of methods for comparative assessment of the impact of combine propulsion on the soil does not allow us to correctly select the most effective option for the soil conditions of specific agricultural*

enterprises. This publication proposes a method for comparative evaluation of combine harvesters of different classes, both in terms of pressure on the soil, which changes during the process of filling the bunker with grain, and in terms of the relative area of the field subject to compaction with different vertical loads. It was revealed that when filling the bunkers with grain, the increase in the maximum pressure on the soil of the driving wheels of the Don 1500B, Akros 550, KZS 3219 and Torum 780 combines will be 17, 43, 31 and 68 kPa, respectively, or 8.4, 19.4, 15.3 and 29.1%. With the permissible maximum pressure on the soil in the summer equal to 210 kPa, the areas of tracks of the specified combine harvesters with excess pressure will be 14.0, 24.0, 15.0 and 18.4% of the field area, respectively. In addition, the article provides a visual representation of the results of a comparative assessment of harvesting machines, including the intervals of maximum pressure of combine propellers at the beginning and at the end of filling the bunker with grain.

Keywords: *combine harvester, soil pressure, passage length, comparative assessment.*

Для цитирования: Ревенко В.Ю., Скорляков В.И., Юрина Т.А. Сравнительная оценка воздействий зерноуборочных комбайнов на почву с дифференциацией по длине прохода // Наука в центральной России. 2024. Т. 67, № 1. С. 57-65. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-57-65.

For citation: Revenko V., Skorlyakov V., Yurina T. Comparative assessment of the impact of grain harvests soil combines differentiation according to passage length. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 57-65. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-57-65.

Введение. В связи с ростом размерно-массовых параметров зерноуборочных комбайнов (ЗУК) воздействие их ходовых органов на почву в настоящее время достигает критических значений. Так, максимальное давление колес ЗУК на почву (в вертикальной плоскости по оси колес) при вместимости бункера 9-12 м^3 и пропускной способности 8,5-12 кг/с достигает от 250 до 350 кПа [1], что значительно превышает регламентированные допустимые значения. Несмотря на это при разработках и поступлении на рынок новых ЗУК наблюдается тенденция устойчивого повышения размерно-весовых показателей [2].

По результатам многих исследований установлены негативные последствия переуплотнения почвы сверх допустимых пределов тракторами и комбайнами [3, 4] и др. При этом известно, что предлагаемые технические и технологические решения лишь частично решают проблему переуплотнения. А переоснащение парка с/х предприятий зерноуборочными комбайнами происходит преимущественно высокопроизводительными образцами с увеличенными параметрами, несмотря на рекомендации ученых об их ограничении [1] и об отказе от высокопроизводительных ЗУК [5]. У таких комбайнов с большой вместимостью бункеров при поступлении зерна увеличиваются диапазоны максимального давления и длина проходов в рабочих циклах при росте соответствующих воздействий на почву.

Наряду с этим, в публикациях, посвященных выбору комбайнов и предназначенных специалистам с/х предприятий, вопросы сверхнормативного воздействия на почву не затрагиваются [6, 7, 8]. В данной ситуации для снижения воздействий на почву необходим обоснованный выбор зерноуборочных комбайнов с приемлемыми для хозяйств показателями воздействия на почву. Однако в настоящее время сравнительная оценка длины и относительной площади переуплотненных следов (в общей длине при заполнении бункера) невозможна из-за отсутствия соответствующего метода.

Цель исследования – разработка метода сравнительной оценки давления зерноуборочных комбайнов на почву.

Материалы и методы исследования. Метод исследования – экспериментально - расчетный. Объекты исследований – сравнительные оценки показателей воздействия наиболее нагруженных передних ведущих колес зерноуборочных комбайнов на почву при уборке зерновых колосовых культур.

При выполнении оценок исходили из того, что длина прохода комбайна в рабочих циклах достигается в пределах заполнения конструкционного объема бункера и соответствует известному выражению:

$$L_{пр} = Q \cdot j / B_{ж} \cdot У,$$

где Q – вместимость бункера, м^3; j – объемная масса зерна, кг/м^3; $У$ - урожайность зерна на поле, кг/м^2; $B_{ж}$ – рабочая ширина захвата жатки, м.

Расчеты длины прохода комбайна и относительной площади следов ведущих колес на поле в рабочих циклах заполнения бункера зерном озимой пшеницы ($L_{пр}$) провели для четырех комбайнов исходя из значений вместимости бункеров и ширины жаток (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры комбайнов и длина их проходов при заполнении бункеров (для урожайности 70 ц/га)

Марка комбайна	Масса с жаткой, кг	Вместимость бункера, м^3	Рабочая ширина жатки, м	Ширина следа колеса, м	Длина прохода по полю, м
ДОН 1500	14320	6	6,8	0,81	974
Акрос 550	16630	9	6,8	0,82	1386
КЗС 3219	20920	9,5	8,9	0,86	1119
Торум 780	19470	12	8,9	0, 82	1445

Также исходили из того, что максимальное давление ведущих колес на почву по длине прохода в рабочем цикле заполнения бункера сопровождается изменением значений, от соответствующего пустому бункеру в начальной фазе движения, до заполненного - в конечной фазе движения. Т.е. возрастание максимального давления происходит синхронно с передвижением комбайна по длине прохода, а также - с заполнением бункера.

Значения максимального давления ведущих колес комбайнов были определены по известным стандартизованным методам, представленным в [9]. Необходимо заметить, что начальные показатели давления колес на почву (при пустом бункере) могут быть приняты из публикуемых протоколов испытаний комбайнов на машиноиспытательных станциях, а при заполненном бункере - по результатам расчетов по методике, представленной в [10].

Проводя сравнения, также исходили из того, что показатели ключевых точек заполнения бункера в процессе работы комбайна в соответствии с [9] соответствуют следующим параметрам:

- перед началом заполнения, когда длина прохода равна нулю $L_{пр} = 0$, максимальное давление на почву передних колес соответствовало пустому бункеру, т.е. $P_{max} = P_{max\ пуст}$;

- по окончании заполнения, когда длина прохода соответствовала длине рабочего цикла $L_{пр} = L_{прц}$, максимальное давление стало соответствовать полному бункеру $P_{max} = P_{max\ полн}$.

Для выявления точки перехода максимального давления к сверхнормативному в рабочем цикле заполнения бункера, определяли уравнение прямой, проходящей через две точки с координатами, соответствующими началу и окончанию движения комбайна в рабочем цикле $L = f(P_{max})$ и, подставляя значение максимального давления $P_{max} = P_{max\ допустимое}$, находили длину прохода комбайна, после которой P_{max} превышало допустимое значение [9].

Результаты и обсуждение. Наиболее информативно вертикальные воздействия на почву комбайнов выражаются значением показателя максимального давления, допустимые значения которого регламентированы государственным стандартом ГОСТ Р 58655-2019 [11]. При движении комбайна почва по следу колеса по всей длине прохода подвергается воздействию максимальным давлением с его постепенным увеличением от накопления зерна в бункере.

Негативное воздействие техники на почву по всей площади поля можно оценить по двум показателям: 1-й – максимальное давление колес; 2-й – длина прохода комбайна в рабочем цикле заполнения бункера, в том числе с превышением допустимого давления. Первый показатель влияет на величину напряжения в почве от вертикального давления колес, второй – на длину следов колес на поле и их соответствующую площадь.

В результате роста в последние два десятилетия вместимости бункеров комбайнов ведущих фирм - производителей (в 1,5-2 раза), их давление на почву во многих случаях превышает допустимый стандартом уровень уже перед началом поступления зерна в бункер, что в первую

очередь связано с ростом эксплуатационной массы современных высокопроизводительных машин. В этом случае сверхнормативное переуплотнение почвы на поле реализуется по всей площади следов комбайна (рисунок 1).

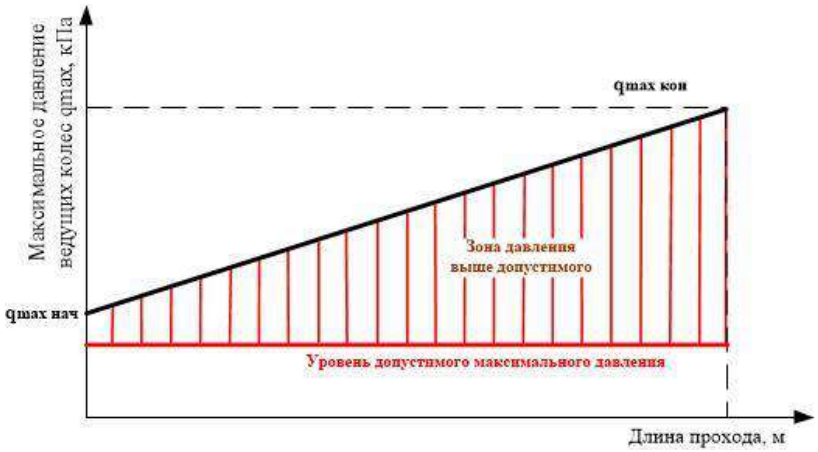


Рисунок 1 – Схема изменения сверхнормативного максимального давления ведущих колес комбайна по длине рабочего прохода

Более сложной для оценки переуплотнения почвы по длине прохода комбайна является ситуация, когда в начале заполнения бункера в рабочем проходе комбайна давление ходовых органов на почву не превышает нормативные показатели, установленных ГОСТ Р 58655-2019 [11], но, по мере заполнения бункера зерном, давление на почву ходовых органов достигают допустимого значения, а затем начинают его превышать (рисунок 2).

В данном случае расстояния прохода комбайна в рабочем цикле заполнения бункера с давлением менее и более допустимого могут быть определены с использованием методики, изложенной в [9, 12]. С ее применением представляется возможной оценка давления в любой промежуточной точке длины прохода комбайна, а также оценка относительной площади поля, подвергнутой воздействию колес зерноуборочного комбайна сверх регламентированного допустимого предела.

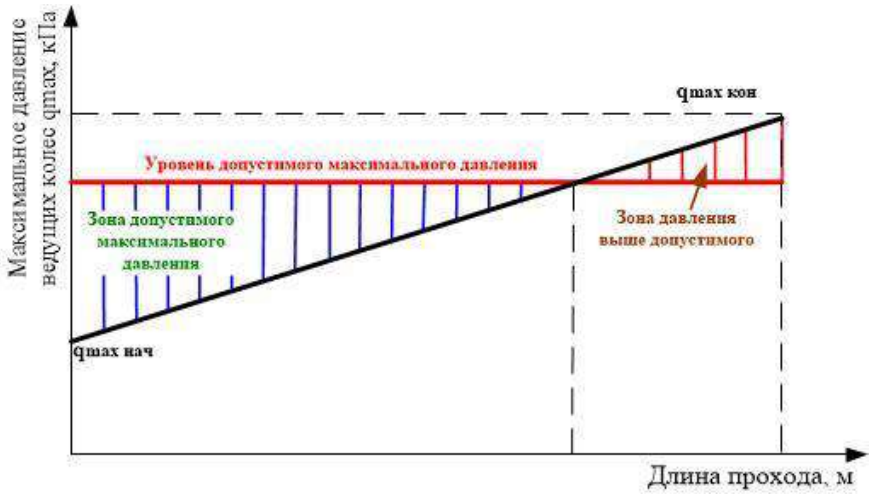


Рисунок 2 – Схема изменения максимального давления ведущих колес комбайна (с преодолением допустимого предела) по длине рабочего прохода

В результате расчетов в соответствии с вышеуказанной методикой установлено, что комбайн Дон 1500 Б воздействует на почву в пределах допустимого максимального давления (210 кПа) лишь частично – при росте максимального давления с 203 до 210 кПа, что соответствует 41 % длины прохода в рабочем цикле (рисунок 3). С учетом массы зерна в заполненном бункере (4800 кг) с помощью алгоритма, приведенного в [10], можно определить какая масса зерна будет соответствовать допустимому пределу максимального давления: 4800 кг х 0,41 = 1968 кг, что соответствует длине прохода 399,3 м. У комбайна КЗС 3219 при 22,6 -процентном заполнении бункера (1718 из 7600 кг) на длине прохода 253 м давление колес на почву будет в пределах допустимого, при дальнейшем наполнении бункера зерном происходит превышение норматива.

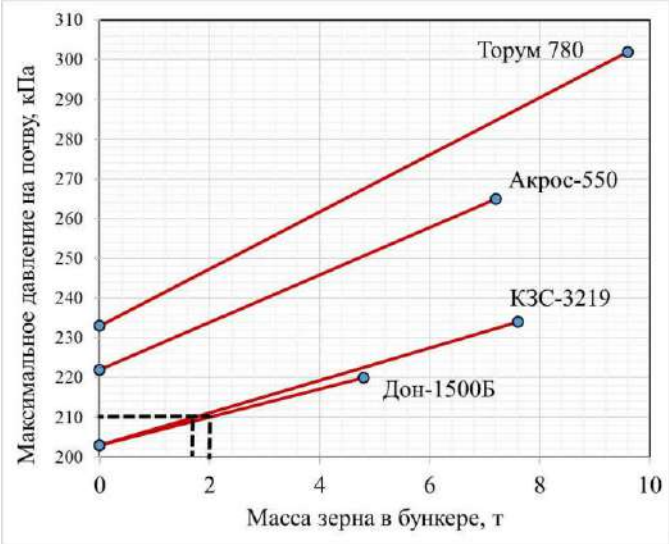


Рисунок 3 - Зависимости максимального давления ведущих колес комбайнов от степени заполнения бункера

Таким образом, комбайн ДОН 1500Б уплотняет почву сверх допустимого значения в диапазоне 210-220 кПа, комбайн КЗС 3219 – в диапазоне 210-234 кПа. Другие исследуемые образцы техники: комбайны Агрос 530 и Торум 780 переуплотняют почву по длине всего прохода в рабочих циклах заполнения бункера зерном.

Более приемлемые показатели максимального давления на почву комбайна КЗС 3219 получены вследствие применения более широких шин (0,86 м, против 0,82 м у трех остальных комбайнов), что обеспечивает большую площадь пятна контакта шины с почвой.

Таким образом, рост вместимости бункеров современных зерноуборочных комбайнов приводит как к значительному увеличению давления ведущих колес на почву, так и к росту длины прохода в рабочем цикле заполнения бункера, на которой отмечается указанное повышенное давление. Кроме этого, увеличение вместимости бункера приводит к росту энергозатрат на транспортировку поступающего в бункер зерна [13].

При уборке зерна на поле диапазон нагрузки на ведущее колесо и соответствующее максимальное давление на почву в рабочем цикле воспроизводится в повторениях рабочих циклов на всей площади поля. При этом, у комбайнов с различной ёмкостью бункера и шириной жатки будет варьировать количество рабочих циклов на одном и том же поле. Например, на поле площадью 70 га, у комбайна Дон 1500 с 7-метровой жаткой и бункером ёмкостью 6 м^3 число циклов составит 107. У комбайна Торум 780 с 7- метровой жаткой и бункером 12 м^3 - 54. Исходя из этого возможно разделение диапазонов максимальных давлений ведущих колес на почву в рабочих циклах и на поле, например на 5 частей (с шагом в 20 %) с расчетом для каждой части средних показателей максимального давления (таблица 2). При этом обеспечиваются численные значения давления на почву, дифференцированные по длине прохода и по стадиям заполнения

бункеров. Это позволяет конкретизировать соотношения значений давления на разных стадиях заполнения бункеров и для разных комбайнов. Так, если в начале заполнения бункера зерном (отрезок 0-20 %) среднее значение максимального давления комбайнов Акрос 550 и Торум 780 больше, чем у комбайна Дон 1500Б (базовый вариант) соответственно на 10,2 и 17,6 %, то в конце заполнения (отрезок 80-100 %) – на 19,7 и на 35,3 %.

Таблица 2 – Средние максимальные давления колес на 20-процентных участках длины в рабочих циклах заполнения бункеров

Марка комбайна	Процентное разделение давлений по длине проходов в рабочих циклах, %				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
Дон 1500Б	205	208	211	215	218
КЗС 3219	206	212	218	225	231
Акрос 550	226	235	243	252	261
Торум 780	241	254	268	282	295

Высокие показатели среднего давления в конце заполнения бункеров (261 и 295 кПа), полученные для комбайнов Акрос 550 и Торум 780, обусловлены их большей металлоемкостью для обеспечения достаточной прочности, а также недостаточными размерами применяемых шин на передней оси.

Вполне очевидно, что при оценке воздействий комбайнов на почву на первый план выходят сочетания таких параметров как вместимость бункера, ширина жатки и размеры шин. Применительно к выбору комбайнов и их комплектации научные рекомендации, как правило, распространяются на осредненные условия регионов. Однако хозяйства внутри регионов во многих случаях характеризуются существенным разнообразием почвенно-климатических условий в периоды уборочных работ. Исходя из этого с применением расчетного метода возможна предварительная оценка влияния на показатели вертикальных воздействий ширины жатки и вместимости бункеров относительно результатов известных аналогов (таблица 3).

Таблица 3 – Сравнительные показатели изменений силовых воздействий ведущих колес комбайнов на почву в рабочем цикле заполнения бункеров

Показатели	Зерноуборочные комбайны			
	Дон 1500Б	Акрос 550	КЗС 3219	Торум 780
Убираемая площадь за цикл, S, га	0,662	0,943	0,996	1,286
Изменение максимального давления ведущих колес при заполнении бункера, кПа	203-220	222-265	203-234	234-302
Приросты максимального давления в рабочем цикле, кПа:	17	43	31	68
Приросты максимального давления относительно убранной площади, кПа/га (%)	25,7 (8,4)	45,6 (19,4)	31,1 (15,5)	52,9 (29,1)
Кратность приростов максимального давления относительно базового варианта (Дон 1500)	-	2,31	1,82	3,46

Так как, убираемая площадь за цикл заполнения бункера зависит от вместимости бункера, то и диапазон изменения максимального давления ведущих колес зависит от его вместимости. Также

при выборе комбайна и его комплектации весьма показательны приросты максимального давления относительно убранной площади и кратность приростов максимального давления относительно базового варианта (Дон 1500 - с наименьшим воздействием на почву) (см. таблицу 3).

Стандартом установлено несколько градаций допустимых максимальных давлений ходовых органов машин в зависимости от влажности почвы [11]. Наиболее вероятными при оценке комбайнов могут быть два регламентированных значения (при соответствующей влажности почвы 0,5-0,6 НВ и менее 0,5 НВ) – 180 и 210 кПа. С применением расчетов по разработанному нами способу [9, 10, 12] было определено, что при допустимом давлении 210 кПа лишь два из представленных четырех комбайнов часть рабочих проходов могут выполнять с допустимым давлением - Дон 1500Б и КЗС 3219 (рисунок 4). Комбайны Акрос 550 и Торум 780 с шинами недостаточной ширины еще до начала заполнения бункеров значительно превышают допустимое давление.

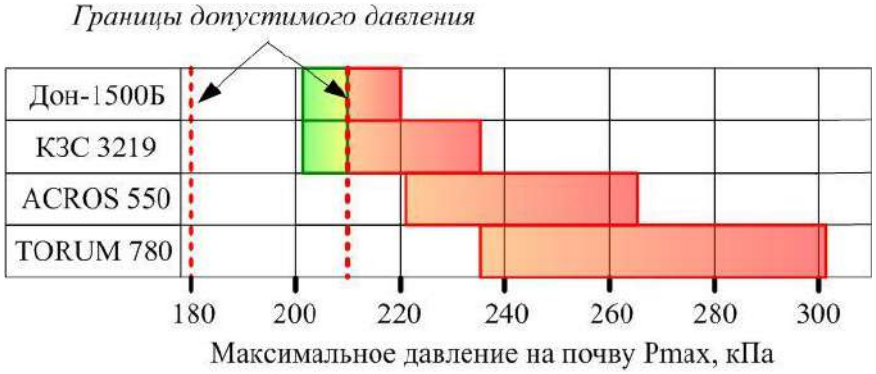


Рисунок 4 – Диапазоны изменения максимального давления ведущих колес комбайнов при заполнении бункеров зерном

Исходя из вышеизложенного при наличии информации о параметрах и комплектации комбайна, а также развесовок комбайна в варианте эксплуатационного веса, с использованием методики, представленной в [9, 10] возможно оперативное определение диапазона максимального давления наиболее нагруженных ведущих колес комбайнов. А по анализу относительных показателей приростов максимального давления в рабочих циклах (таблица 3) возможен целенаправленный выбор и комплектация комбайнов для хозяйственных условий.

Выводы.

1. Диапазоны изменения максимальных давлений на колеса передней оси комбайнов Дон 1500Б, Акрос 550, КЗС 3219 и Торум 780 в рабочих циклах заполнения бункеров составляют соответственно 203-220, 222- 265, 203-234 и 234-302 кПа. При принятом допустимом максимальном давлении (до 210 кПа) площади следов указанных комбайнов со сверхнормативными давлениями составляют соответственно 14,0, 24,0, 15,0 и 18,4 % от площади поля.

2. Приросты максимального давления ведущих колес комбайнов Дон 1500Б, Акрос 550, КЗС 3219 и Торум 780 при заполнении бункеров зерном составляют соответственно 17, 43, 31 и 68 кПа или 8,4, 19,4, 15,3 и 29,1 %.

3. Кратность приростов максимального давления колес комбайнов Акрос 550, КЗС 3219 и Торум 780 от заполнения бункеров зерном относительно базового варианта (Дон 1500Б) составляет соответственно 2,31, 1,82 и 3,46.

Список источников

1. Дьячков А. П. Возможности повышения производительности технологических агрегатов, используемых в сельском хозяйстве, при снижении отрицательных воздействий на почву / Дьячков А. П., Колесников Н. П., Семынин С. В. Следченко В.А., Шередекина Е.Е. // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4 (47). – Ч. 2. – С. 105–108.

2. Скорляков В.И., Ревенко В.Ю. Особенности воздействия на почву зерноуборочных комбайнов // Техника и оборудование для села. – 2022. – №1. – С. 25-29.

3. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. – М.: ВИМ, 1998. – 368 с.

4. Кузыченко Ю.А. Изменение структуры поверхностного слоя почвы и экологическая совместимость мобильных машин с почвой // Известия Оренбургского государственного университета. – 2019. – № 4. – С. 20-22.

5. Маслов Г.Г. Эффективные направления снижения уплотнения почвы для сохранения ее плодородия // Научный журнал КубГАУ. – 2019. – № 146 (02). – С. 1-13.

6. Жалнин Э.В. Какой комбайн выбрать? // Сельский механизатор. – 2015. – № 4. – С. 4-6.

7. Жалнин Э.В. Каким комбайном убирать российское поле? // Сельский механизатор. – 2013. – № 5. С. – 10-11.

8. Ряднов А. И., Федорова О. А., Поддубный О. И. Совершенствование методики выбора зерноуборочных комбайнов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2020. – № 2 (38). – С. 163-178.

9. Скорляков В.И., Ревенко В.Ю., Назаров А.Н. Оценка площади следов и давления на почву ведущих колес зерноуборочного комбайна в рабочем цикле заполнения бункера // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 3. – С. 27-31.

10. Скорляков В.И., Ревенко В.Ю. Совершенствование метода расчета давления движителей зерноуборочных комбайнов на почву // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. - № 6 (89). – С. 403-410.

11. ГОСТ Р 58655-2019 Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву. М.: Стандартинформ. – 2019. – 6 с.

12. Патент № 2797910 C1 Российская Федерация, МПК A01D 41/02, G01M 17/007, G06Q 50/02. Способ оценки воздействия на почву колес зерноуборочного комбайна в рабочих циклах заполнения бункера зерном: № 2022127496: заявл. 21.10.2022: опубл. 13.06.2023 / В. И. Скорляков, В. Ю. Ревенко; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса". – EDN LOOBCM.

13. Плаксин А.М., Кожемякин П.А., Власов Д.Б. Противоречие конструктивного совершенствования и практики использования зерноуборочных комбайнов. Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. – 2013. – Т. 65. – С. 41- 49.

References

1. Dyachkov A. P. The possibilities of increasing the productivity of technological units used in agriculture while reducing negative impacts on the soil / Dyachkov A. P., Kolesnikov N. P., Semynin S. V. // Bulletin of the Voronezh State Agrarian University. -2015. -No. 4 (47). -Part 2. -P. 105-108.

2. Skorlyakov V.I., Revenko V.Yu. Features of the impact on the soil of combine harvesters // Machinery and equipment for the village. -2022. – No.1. – pp. 25-29.

3. Rusanov V.A. The problem of soil re-compaction by movers and effective ways to solve it. - M.: VIM, 1998. - 368 p.

4. Kuzychenko Yu.A. Changing the structure of the surface soil layer and the ecological compatibility of mobile machines with soil // Izvestiya Orenburg State University. – 2019. – No. 4. – pp. 20-22.

5. Maslov G.G. Effective ways to reduce soil compaction to preserve its fertility // KubGAU Scientific Journal. – 2019. – № 146 (02). – P. 1-13.

6. Zhalnin E.V. Which combine should I choose? // Rural mechanic. – 2015. – No. 4.
– pp. 4-6.

7. Zhalnin E.V. What kind of combine harvester to clean the Russian field? // Rural mechanizer. – 2013. – No. 5. pp. 10-11.

8. Ryadnov A. I., Fedorova O. A., Poddubny O. I. Improvement of the method of choosing grain harvesters // Scientific journal of the Russian Research Institute of Problems of Land Reclamation. – 2020. – № 2 (38). – Pp. 163-178.

9. Skorlyakov V.I., Revenko V.Yu., Nazarov A.N. Assessment of the footprint area and pressure on the soil of the leading wheels of a combine harvester in the working cycle of filling the hopper // Machinery and equipment for the village. - 2023. – No. 3. – pp. 27-31.

10. Skorlyakov V.I., Revenko V.Yu. Improving the method of calculating the pressure of grain harvesters on the soil // Tractors and agricultural machines. – 2022. - № 6 (89). – Pp. 403-410.

11. GOST R 58655-2019 Agricultural mobile machinery. Norms of the impact of propellants on the soil. M.: Standartinform. -2019. -6 p.

12. Patent No. 2797910 C1 Russian Federation, IPC A01D 41/02, G01M 17/007, G06Q 50/02. A method for assessing the impact on the soil of combine harvester wheels in the working cycles of filling the bunker with grain: No. 2022127496: application. 10/21/2022: publ. 13.06.2023 / V. I. Skorlyakov, V. Yu. Revenko ; application Federal State Budgetary Scientific Institution "Russian Scientific Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical ensuring the agro-industrial complex". – EDN LOOBCM.

13. Plaksin A.M., Kozhemyakin P.A., Vlasov D.B. The contradiction of constructive improvement and the practice of using combine harvesters. Bulletin of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy. - 2013. – vol. 65. – pp. 41-49.

Информация об авторах

В. Ю. Ревенко – кандидат технических наук, ученый секретарь; В. И. Скорляков – кандидат технических наук; Т.А. Юрина – научный сотрудник.

Information about the authors

V. Revenko – Candidate of Technical Sciences, Scientific Secretary; V. Skorlyakov – Candidate of Technical Sciences; T. Yurina – 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): 20.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.331.85
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-66-75

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОСЕВА ДРАЖИРОВАННЫХ СЕМЯН САХАРНОЙ СВЕКЛЫ ВЫСЕВАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Алина Викторовна Бондарчук [1]***, Максим Викторович Коваль*** [2]
[1,2]*Луганский государственный университет имения Владимира Даля,*
г. Луганск, Российская Федерация
[1]akoval77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9529-7139
[2]*Луганский государственный аграрный университет имени К.Е. Ворошилова*,
г. Луганск, Российская Федерация
[2]elsola@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-0786-7813

Автор ответственный за переписку: Алина Викторовна Бондарчук, akoval77@mail.ru
Corresponding author: Alina Bondarchuk, akoval77@mail.ru

Реферат. *Перспективным направлением развития конструкций посевных машин является создание высевающих систем пневматического действия на основе струйной пневмоавтоматики. Внедрение высевающих систем с автоматическим управлением процессом позволит получить принципиально новые способы программированного посева семян, внесения удобрений. Цель исследования - определить зависимость аэродинамической подъемной силы от аэродинамических свойств и размеров семян, разрежения в присоске, ее размеров и расстояния между семенем и присоской. Представлена модель, отражающая алгоритм последовательно выполняемых операций, направленный на дозирование семян одним дозирующим элементом, включающий присоску и ячейку. Процесс дозирования обеспечивается за счет наложения алгоритмов процесса отдельных дозирующих элементов со сдвигом по времени, что отрицательно сказывается на качестве дозирования из-за жесткой связи отдельных операций между собой. Анализ временной диаграммы функционирования алгоритмов показал, что даже при постоянной скорости движения посевного агрегата равномерность дозирования семян пневмомеханическими и механическими высевающими системами зависит от изменения скольжения опорно-приводного колеса, обусловленного различными физико-механическими свойствами почвы и различными нагрузками, возникающими при преодолении сил трения в аппаратах. Объектом аналитических исследований является технологический процесс высевающей системы пневматического действия, его временные режимы функционирования, взаимосвязь их с рабочими, конструктивными и технологическими параметрами высевающего аппарата, которые главным образом определяют качество распределения семян на дне борозды. Рассматривается аэродинамическая подъемная сила в высевающей системе. Расчеты показали прямо пропорциональную зависимость аэродинамической подъемной силы от аэродинамических свойств и размеров семян, разрежения в присоске, и размеров и расстояния между семенем и присоской*.

Ключевые слова*: пневматика, пневмоавтоматика, семена, свекла, высевающий аппарат, алгоритм*.

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SOWING SUGAR BEET SEEDS WITH A PNEUMATIC SOWING SYSTEM

Alina Bondarchuk [1]***, Maxim Koval*** [2]
[1,2] *Dahl's Lugansk State University, Lugansk, Russia*
[1]akoval77@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-9529-7139
[2] *K.E. Voroshilov's Lugansk State Agrarian University, Lugansk, Russia*
[2]elsola@mail.ru, https://orcid.org/0009-0006-0786-7813

Abstract. *A promising direction in the development of seeding machine designs is the creation of pneumatic seeding systems based on jet pneumoautomatics. The introduction of seeding systems with automatic process control will allow us to obtain fundamentally new ways of programmed sowing of seeds, fertilizers, herbicides. The purpose of the study is to determine the dependence of the aerodynamic lift on the aerodynamic properties and size of the seeds, the vacuum in the suction cup, its size and the distance between the seed and the suction cup. A model is presented reflecting a program of sequentially performed operations aimed at dosing seeds with a single dosing element, including a suction cup and a cell. The continuous flow of the dosing process is ensured by superimposing the algorithms of the process of individual dosing elements with a time shift, which negatively affects the quality of dosing due to the tight connection of individual operations between the components. The analysis of the time diagram of the algorithms' functioning showed that even with a constant speed of the drill, the uniformity of seed dosing by pneumomechanical and mechanical seeding systems depends on changes in the sliding of the support and drive wheel due to different physical and mechanical properties of the soil and various loads arising when overcoming friction forces in the apparatus. The object of analytical research is the technological process of the pneumatic seeding system, its temporary modes of operation, their relationship with operational, structural and technological parameters, which mainly determine the quality of seed distribution at the bottom of the furrow. The aerodynamic lifting force in the seeding system was considered. Calculations have shown the presence of a directly proportional dependence of the aerodynamic lifting force on the aerodynamic properties and size of the seeds, the vacuum in the suction cup, and the size and distance between the seed and the suction cup.*

Keywords: *pneumatics, pneumoautomatics, seeds, beetroot, sowing machine, algorithm.*

Для цитирования: Бондарчук А.В., Коваль М.В. Теоретическое обоснование технологического процесса посева семян сахарной свеклы высевающей системой пневматического действия // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 66-75. https://doi.org/10.35887/2305- 2538-2024-1-66-75.

For citation: Bondarchuk A., Koval M. Theoretical substantiation of the technological process of sowing sugar beet seeds with a pneumatic sowing system. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 66-75. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-66-75.

Введение. Применение современных технологических решений в сельском хозяйстве играет существенную роль в повышении эффективности производства и выращивания различных сельскохозяйственных культур. Одним из таких решений является использование посевных агрегатов точного высева, которые позволяют равномерно распределить семена, оптимизировать их использование, снизить затраты. Точный высев семян посевными агрегатами является одним из наиболее современных и эффективных методов повышение качества посева. Этот подход позволяет контролировать количество семян, их состояние друг от друга и глубину посева. Оптимизация использования семян является важным аспектом в сельскохозяйственном производстве. Использование посевных агрегатов точного высева позволяет сократить расход семян и контролируется точность их размещения на поле. Кроме того, посевные агрегаты точного высева способствуют достижению более равномерного распределения растений на поле, что помогает избежать конкуренции между ними за доступ к питательным веществам, что способствует более равномерному росту и развитию растений и повышает их устойчивость к внешним факторам. Применение посевных агрегатов точного высева в сельском хозяйстве дает возможность повысить эффективность производства и позволяет оптимизировать использование семян, что ведет к увеличению урожайности и снижению затрат. Поэтому изучение зависимости аэродинамической подъемной силы от аэродинамических свойств и размеров семян, разрежения в присоске, ее размеров и расстояния между семенем и присоской в пневматической высевающей системе, является актуальной.

Материалы и методы. Для аналитического изучения технологического процесса высева семян сахарной свеклы высевающей системой пневматического действия, выбранной на основе анализа существующих дозирующих систем, необходимо разработать алгоритм модели процесса.

Целесообразно вначале представить модель технологического процесса существующих, наиболее распространенных механических и пневмомеханических высевающих аппаратов (рисунок 1). Данная модель представляет собой программу последовательно выполняемых операций, направленную на мобильное дозирование семян одним дозирующим элементом (присоской, ячейкой).

Так как время функционирования представленного алгоритма, то есть период времени высева одним дозирующим элементом, составляет 1-2 секунды, а на практике необходимая частота высева семян свеклы находится в пределах 10-30 штук в секунду, поэтому непрерывное протекание процесса дозирования осуществляется за счет суперпозиции (наложения) алгоритмов процесса отдельных дозирующих элементов со сдвигом по времени. Это отрицательно сказывается на качестве дозирования, так как суперпозиция алгоритмов образует жесткую связь отдельных операций между собой.

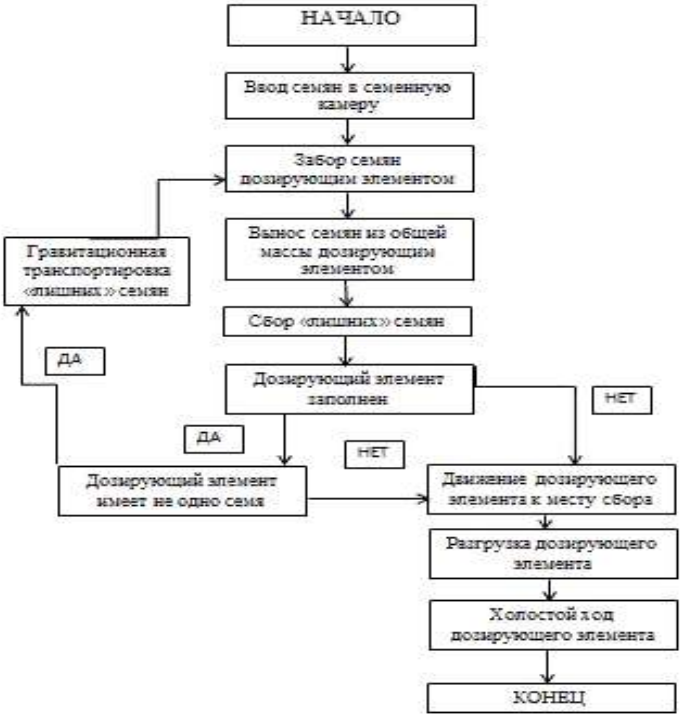


Рисунок 1 - Алгоритм модели процесса высева семян дозирующим элементом механических и пневмомеханических высевающих аппаратов

При скольжении опорно-приводного колеса [2], то есть при приводе посевного агрегата, будет наблюдаться взаимное влияние отдельных элементов алгоритма друг на друга. Это отрицательно отразится на равномерности распределения семян в борозде (рисунок 2).

Разработанная алгоритмическая модель процесса высева, осуществляемого высевающей системой пневматического действия (ВСПД) представлена на рисунке 2.

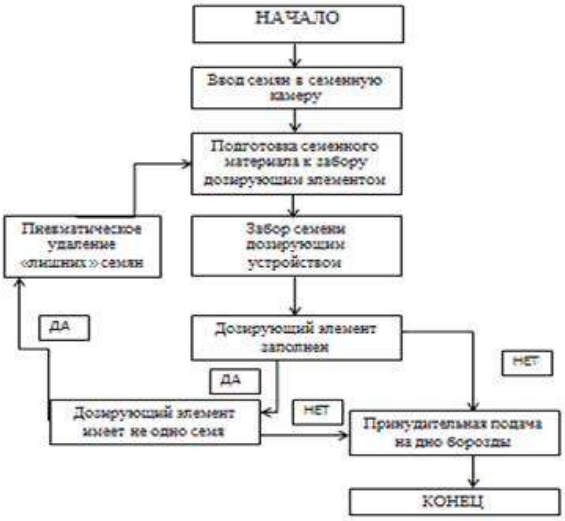


Рисунок 2 - Алгоритм модели процесса высева ВСПД

У аппаратов пневматического действия однозернового типа [4] воздушный поток, создаваемый вентилятором, приводит в псевдоожиженное состояние семена, которые поступают из бункера в питательную камеру. Одиночные семена в псевдоожиженном состоянии в короткий промежуток времени захватываются присоской, установленной в питательной камере, и принудительно направляются в семяпровод, расположенный напротив присоски, преодолевая встречный воздушный поток, препятствующий самопроизвольному выпадению семян на дно борозды. Синхронизация процесса высева со скоростью движения посевного агрегата осуществляется от струйного датчика скорости, который подает импульсы-команды для пневматического, принудительного сброса семян на дно борозды.

Разработанный авторами алгоритм позволяет каждой отдельной операции быть независимой друг от друга и быстро реагировать на изменяющиеся режимы движения посевного агрегата без ухудшения качества распределения семян в борозде.

Временная диаграмма функционирования алгоритмов показывает, что даже при постоянной скорости движения посевного агрегата равномерность дозирования семян пневмомеханическими и механическими высевающими системами сильно зависит от изменения скольжения опорно-приводного колеса, обусловленного различными физико-механическими свойствами почвы, а также различными нагрузками, возникающими при преодолении сил трения в аппаратах.

Этот существенный недостаток проявляет себя при изменении скорости движения посевного агрегата, при разгоне, остановке, при неравномерном буксовании приводных колес трактора. Полностью отсутствует вышеуказанный недостаток у ВСПД.

Результаты и их обсуждение. Объектом аналитических исследований является технологический процесс ВСПД, его временные режимы функционирования, взаимосвязь их с рабочими, конструктивными и технологическими параметрами ВСПД, которые главным образом определяют качество распределения семян на дне борозды.

Авторами разработана временная диаграмма работы пневмозахвата высевающего аппарата пневматического действия с основными технологическими параметрами процесса, к которым относятся:

$P_{вак}$ - величина разрежения в присоске, Па;

$t_{пр}$ - время присасывания семени из общей массы к присоске, с;

$P_{сбр}$ - величина давления, необходимого для сбрасывания семени на дно борозды, Па;

$t_{сбр}$ - время, необходимое для перемещения семени на дно борозды, с;

$t_{ср}$ - время срабатывания элемента, т.е. время переходного процесса в устройстве изменения абсолютного давления в присоске, с;

Т - время полного цикла присасывания и сбрасывания семени, с.

Как видно из рисунка 3, а также учитывая опыт построении логических схем промышленных роботов [1], получим:

$$T = t_{пр} + t_{сбр} + 2t_{ср} \quad (1)$$

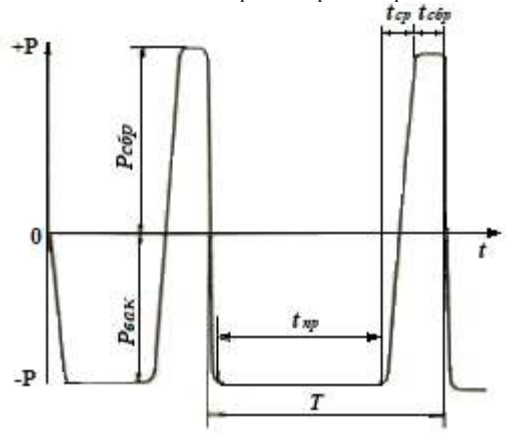


Рисунок 3 - Временна диаграмма работ пневмозахвата высевающего аппарата пневматического действия

Зная среднюю скорость движения посевного агрегата, а также норму высева, можно определить среднюю частоту высева – f:

$$f = N \cdot V_c \text{ , где} \quad (2)$$

f – частота высева, шт/с;

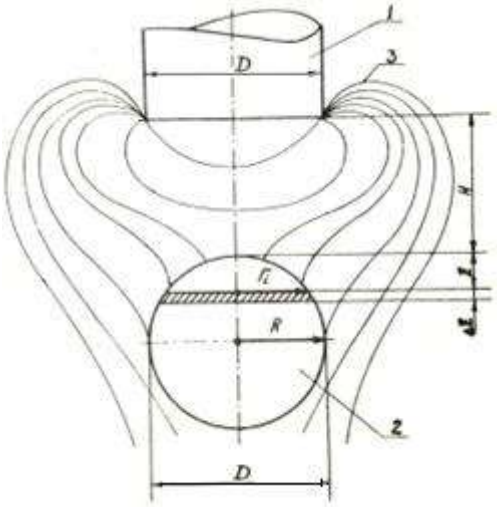
N – норма высева семян, шт/м;

V_c - скорость посевного агрегата, м/с;

Определив по формуле (2) частоту высева, можно найти Т – время полного цикла присасывания и сбрасывания семени.

Для различных скоростей движения посевного агрегата, а также при высеве семян различных норм, время полного цикла работы аппарата Т будет изменяться в широких пределах, однако, для обеспечения

качественного однозернового посева необходимо установить такие рабочие режимы аппарата, которые обеспечили бы соответствие временным параметрам диаграммы (рисунок 4).



1 – всасывающий патрубок; 2 – шарообразное тело; 3 – спектр всасывающего потока

Рисунок 4 - Схема взаимодействия всасывающего потока с телом

Время присасывания семени к присоске должно быть всегда меньше или равно предельно допустимому:

$$[t_{\text{пр}}] \geq \frac{1}{N*V_o} - t_{\text{сбр}} - 2t_{\text{ср}} \quad (3)$$

Только при соблюдении этого условие (3) будет обеспечиваться гарантированный захват семени из общей массы.

Из рисунок 3 (е) и рисунок 3 (ж), а также рисунок 2, видно, что время забора семени, то есть присасывания

$$t_{\text{пр}} = t_{\text{зах}} + t_{\text{уд}}, \quad (4),$$

где $t_{\text{пр}}$ – время присасывания семян к присоске, с;

$t_{\text{зах}}$ - время захвата семени присоской, с;

$t_{\text{уд}}$ - время удаления «лишних» семян, с.

Если предельно допустимое время захвата семени $t_{\text{зах}}$, будет равно $t_{\text{пр}}$, то в этом случае первое одиночное семя, достигшее присоски, будет немедленно сброшено по команде от датчика скорости в семяпровод. Поэтому необходимо, рассмотрев взаимодействие воздушного потока с семенами, найти зависимости между конструктивно-режимными параметрами пневматических захватывающих устройств и физико-механическими показателями семенного материала, которые позволят обеспечить гарантированный захват семян и транспортирование их на дно борозды.

Гарантированный захват семян присоской в короткий промежуток времени из псевдоожиженного слоя будет осуществляться только при наличии определенной скорости воздушного потока в нем, обеспечивающего необходимую для надежного присасывания аэродинамическую подъемную силу.

Наиболее вероятное присасывание одиночных семян присоской из псевдоожиженного слоя будет осуществляться при соизмеримости присоски и захватываемого семени. Это допущение принято на основе анализа литературных источников, а также проведения предварительного эксперимента.

Аналитическое определение аэродинамической подъемной силы, действующей на тело, помещенное во всасывающий поток, затруднительно из-за сложности гидродинамической обстановки в окрестности тела неопределенность величины скорости набегающего потока, структуры этого потока, характера распределения давлений в непосредственной близости к телу).

В основу теоретических исследований динамики движения тела в спектре всасываня были положены методы экспериментальной аэромеханики. С целью экспериментального исследования распределения давления по поверхности тела, помещенного во всасывающий поток, был поставлен предварительный эксперимент, проведено моделирование процесса присасывания семени к присоске с учетом несжимаемости воздушного потока и критериев подобия.

В спектре всасывания круглого патрубка (присоски) условия взаимодействия потока с телом несколько иные, чем в плоскопараллельном (свободном) потоке: в нем так же, как и в тяжелой жидкости или в зернистом псевдоожиженном слое, существует перепад статического давления в направлении к торцу присоски, поэтому, кроме силы лобового давления потока на тело действует дополнительно гидростатическая выталкивающая сила. Такая сила возникает в любой системе, характеризующейся перепадом давлений [5], она пропорциональна объему тела.

На тело, помещенное во всасывающий воздушный поток, кроме силы лобового сопротивления действует дополнительно выталкивающая Архимедова сила. Эта сила может быть найдена как главный вектор сил давления по аналогии с главным вектором сил давления жидкости на погруженное в нее тело. Как известно, эта величина равна силе тяжести жидкости в объеме тела и направлена в сторону, противоположную силе тяжести. Это закон Архимеда, который выражается формулой:

$$F = \int p \cdot g \cdot d \cdot Q_0 \text{ , где} \quad (5)$$

где F – главный вектор сил давления жидкости на погружаемое в нее тело, Н;

p – плотность жидкости, г/м^3;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

Q_0 – объем тела, м^3.

Тело, помещенное в спектр всасывания, испытывает со стороны потока давление, главным образом, инерционного, а не гравитационного характера. Применимость закона Архимеда в этом случае возможна, если рассматривать среду (всасывающий поток) как некую жидкость переменной плотности, которая оказывает на соответствующие точки тела такое же давление, какое наблюдается и со стороны потока. Для определения этой силы было получено экспериментальным путем распределение давления по всей поверхности тела. Распределение давления в меридиальной плоскости тела вращения позволяет получить плотность эквивалентной условной жидкости $p_э$, у которой $p_э = f(x, y, z)$.

Предположим, что шарообразное тело 2 (рисунок 4) движется в спектре всасывания по оси круглого патрубка 1 в жидкости переменной плотности, у которой:

$$p_э = f(z) = \frac{d P_z}{gdz}, \text{ где} \quad (6)$$

z – высота шарового сегмента (расстояние от верхней точки шара до уровня замера давления на его поверхности), м;

P_z – давление воздуха на шар, Н.

Значения P_z были получены экспериментально и удовлетворительно аппроксимированы следующей функцией:

$$P_z = 1{,}86\, P_{вак} \cdot \exp\left[\frac{3{,}4D + 17{,}5H}{D^2} \cdot Z - \frac{21{,}2D+109{,}4H}{D^3} \cdot Z^2 - \frac{6{,}8H}{D}\right] \quad (7),$$

где $P_{вак}$ - разрежение на оси торца высасывающего патрубка в свободном спектре всасывания, Па;

D – диаметр шара и патрубка, м;

H – расстояние от патрубка до шара, м;

Z – расстояние от верхней точки шара до уровня замера давления на его поверхности, м.

Как показали предварительные экспериментальные исследования, в случае расположения тела во всасывающем потоке круглого патрубка функция $P_z = f(z)$ - нелинейна и, поэтому, определение аэродинамической подъемной силы F_a представляет собой обратную задачу - о силе тяжести тела F, наполненного неоднородной материей, т.е. эквивалентной жидкостью переменной плотности. Эта задача решается методом тройного интегрирования [7].

Если $p = f(x, y, z)$, то

$$F = g \cdot \iiint_{\theta_0}^{0} (x, y, z)\, d\theta_0 \quad (8)$$

В цилиндрических координатах формула для выражения тройного интеграла имеет вид:

$$\iiint (r, \varphi, z) r \cdot dr \cdot d\varphi \cdot dz = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{r_1}^{r_2} r dr \int_{z_1}^{z_2} f(r, \varphi, z) dz \quad (9),$$

где

φ_1 , φ_2 – угловые координаты;

r_1 , r_2 – радиусы шарового пояса на входе и выходе;

z_1 , z_2 – аппликаты входа и выхода.

Сила тяжести тела переменной плотности шарообразной формы в общем виде определяли по формуле:

$$F = g \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{R} r \cdot dr \int_{z_1}^{z_2} f(r, \varphi, z) dz \quad (10)$$

В рассматриваемом случае плотность эквивалентной жидкости является функцией только координаты Z, поэтому:

$$\rho_э = \frac{dP_z}{gdz} = \frac{1}{g}\left[1{,}86 P_{вак} \cdot \exp\left(\frac{3{,}4D + 17{,}5H}{D^2} \cdot Z - \frac{21{,}2D+109{,}4H}{D^3} \cdot Z^2 - \frac{6{,}8H}{D}\right)\right] \cdot \left[\frac{3{,}4D + 17{,}5H}{D^2} - \frac{2(21{,}2D+109{,}4H)}{D^3} \cdot z\right], \quad (11)$$

Подставляя выражение (11) в уравнение (10) получим:

$$F = 2\pi \int_0^{R} r \cdot dr [1{,}86 P_{вак} \exp(az + bz - c)]_{R-\sqrt{R^2 - r^2}}^{R+\sqrt{R^2 - r^2}v} \quad (12)$$

где $a = \frac{3{,}4D + 17{,}5H}{D^2}$; $b = \frac{21{,}2D+109{,}4H}{D^3}$; $c = \frac{6{,}8H}{D}$.

Из уравнения шара в цилиндрических координатах следует, что

$Z_1 = R - \sqrt{R^2 - r^2}$; $Z_2 = R + \sqrt{R^2 - r^2}$.

Приведем уравнение (12) к следующему виду:

$$F = 3{,}72\pi \cdot P_{вак} \int_0^R [e^{a\left(R-\sqrt{R^2-r^2}\right)-b\left(R-\sqrt{R^2-r^2}\right)-c} - e^{a\left(R+\sqrt{R^2-r^2}\right)-b\left(R+\sqrt{R^2-r^2}\right)} \cdot rdr, \quad (13)$$

подставив значения a, b, c получим:

$$F = 3{,}72\pi \cdot P_{вак}\, e^{-\frac{6{,}8H}{D}} \int_0^R \{\exp[\frac{(3{,}4D+17{,}5H)\left(R-\sqrt{R^2-r^2}\right)}{D^2} - \frac{(21{,}2D+109{,}4H)\left(R-\sqrt{R^2-r^2}\right)}{D^3}]-$$

$$-\exp[\frac{(3{,}4D + 17{,}5H)(R-\sqrt{R^2-r^2})}{D^2} - \frac{(21{,}2D+109{,}4H)\left(R+\sqrt{R^2-r^2}\right)}{D^3}]\}\, rdr. \quad (14)$$

Решить уравнение (14) методом непосредственного интегрирования невозможно, поэтому необходимо применять численные методы решения определенных интегралов. Для вычисления главного вектора давлений F, то есть аэродинамической подъемной силы F_a применялось разбиение функции на малые участки, внутри которых она принималась линейной. Плотность эквивалентной жидкости в пределах шарового слоя на данном малом участке постоянна, и действующая на него подъемная сила определялась по закону Архимеда. Интегральная подъемная сила равна сумме сил, действующих на каждый шаровой слой с радиусом r_i Значения r_i изменялись от 0 до 0,5 D. Вычисление определенного интеграла производилось с использованием стандартной программы на ЭВМ.

Получив численные значения определенного интеграла уравнения (14) при различных фиксированных значениях расстояния между телом и всасывающим круглым патрубком H, проанализировав эти значения подъемной силы F_a можно представить F_a=f(H), которая удовлетворительно аппроксимируется показательной функцией.

$$F_a = 1{,}5\, S_0 \cdot P_{вак} \cdot e^{-6{,}62\frac{H}{D}}, \text{ где} \quad (15)$$

S_0 – площадь торца всасывающего патрубка или площадь миделева сечения тела;

H – расстояние между патрубком и телом.

В связи с тем, что зависимость (15) для аэродинамической подъемной силы F_a получена для шарообразного тела с гладкой поверхностью, необходимо эту зависимость приблизить к реальному

процессу обтекания и присасывания семян свеклы. Следовательно, надо найти такой поправочный коэффициент, который отображал бы степень несоответствия реальной, возникающей при захвате семени,

аэродинамической подъемной силы - аэродинамической силе, возникающей при подъеме шарообразного тела.

По разработанной методике были определены значения аэродинамических коэффициентов для различных фракций семян сахарной и кормовой свеклы, которые находятся в пределах 0,6 / 1,2.

Учитывая значения C_x, зависимость (15) для аэродинамической подъемной силы семени в спектре всасывающего потока будет иметь вид:

$$F_a = 1{,}5\, C_x \cdot P_{вак} \cdot S_o \cdot e^{-6{,}62\frac{H}{D}}, \quad (16)$$

Таким образом, расчеты показывают наличие прямо пропорциональной зависимости аэродинамической подъемной силы от аэродинамических свойств и размеров семян, разрежения в присоске, ее размеров и расстояния между семенем и присоской.

Заключение. Разработка высевающих систем пневматического действия на основе струйной пневмоавтоматики является одним из перспективных направлений развития конструкций посевных машин. Внедрение таких систем с автоматическим управлением процессом предоставляет новые возможности для программированного посева семян, внесения удобрений. Доказана зависимость аэродинамической подъемной силы от аэродинамических свойств и размеров семян, разрежения в присоске, а также от размеров и расстояния между семенем и

присоской. Представленная модель описывает алгоритм последовательно выполняемых операций, направленную на дозирование семян с помощью единственного дозирующего элемента, включающего присоску и ячейку. В ходе анализа временной диаграммы функционирования алгоритмов было выявлено, что равномерность дозирования семян пневмомеханическими и механическими высевающими системами зависит от изменения скольжения опорно-приводного колеса сеялки, которое обусловлено различными физико-механическими свойствами почвы и нагрузками, возникающими при преодолении силы трения. Особое внимание в исследовании уделено аэродинамической подъемной силе в высевающей системе. Проведенные расчеты демонстрируют наличие прямой пропорциональной зависимости между аэродинамической подъемной силой и аэродинамическими свойствами и размерами семян, разрежением в присоске, а также размерами и расстоянием между семенем и присоской. Использование предложенного алгоритма позволит повысить эффективность использования посевного агрегата.

Список источников

1. Дедов А.В. Несмеянова М.А. Влияние пропашных культур и паров на показатели плодородия почвы и продуктивность севооборотов // Известия ОГАУ. - 2018. - №4 (72). [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-propashnyh-kultur-i-parov-na-pokazateli-plodorodiya-pochvy-i-produktivnost-sevooborotov (дата обращения: 8.01.2024).

2. Горянин О.И., Горянина Т.А. Перспективы возделывания полевых культур в Среднем Заволжье // Успехи современного естествознания. - 2018. - № 4. - С. 49–53.

3. Денисенко В.В., Бельтюков Л.П., Кувшинова Е.К., Гордеева Ю.В. Влияние технологий возделывания на продуктивность сельскохозяйственных культур в полевом севообороте // Вестник АПК Ставрополья. - 2016. - № 1 (21). - С. 172–176.

4. Оптимизация вакуумных высевающих аппаратов пропашных сеялок: монография / А.Ю. Несмиян, В.И. Хижняк, В.В. Должиков, А.В. Яковец, Д.Е. Шаповалов. – Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2013. – 176 с.

5. Петровец, В. Р. Посев зерновых культур дисковыми сошниками с усечено-конусными бороздообразователями-уплотнителями / В. Р. Петровец, С. В. Авсюкевич, Н. И. Дудко. – Горки : БГСХА, 2015. – 217 с.

6. Хижняк В.И., Мальцев П.С., Таранов В.А., Онищенко Е.А., Каймакова А.С., Хронюк В.Б., Лаврухин П.В. Анализ конструкций пропашных сеялок // Вестник аграрной науки Дона. - 2020. - №4 (52). [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktsiy-propashnyh-seyalok (дата обращения: 09.01.2024).

7. Пат. 139767 Україна, МПК A01C 7/00, A01C 7/12. Пневматична висівна система точного висіву / В. В. Аулін, В. Я. Коваль, А. О. Панков, А. В. Гриньків, О. Д. Деркач, Т. М. Замота, А. В. Щеглов, А. А. Тихий; заявник і патентовласник Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - № u 201904667; заявл. 02.05.2019 ; опубл. 27.01.2020 ; Бюл. № 2.

References

1. Dedov A.V. Nesmeyanova M.A. The influence of row crops and fallows on soil fertility indicators and the productivity of crop rotations // Izvestia OGAU. - 2018. - No. 4 (72). [Electronic resource] – Access mode: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-propashnyh-kultur-i-parov-na-pokazateli-plodorodiya-pochvy-i-produktivnost-sevooborotov (access date: 8.01 .2024).

2. Goryanin O.I., Goryanina T.A. Prospects for the cultivation of field crops in the Middle Trans-Volga region // Advances in modern natural science. - 2018. - No. 4. - P. 49–53.

3. Denisenko V.V., Beltyukov L.P., Kuvshinova E.K., Gordeeva Yu.V. The influence of cultivation technologies on the productivity of agricultural crops in field crop rotation // Bulletin of the AIC of Stavropol. - 2016. - No. 1 (21). - pp. 172–176.

4. Optimization of vacuum sowing devices for row-crop seeders: monograph / A.Yu. Nesmiyan, V.I. Khizhnyak, V.V. Dolzhikov, A.V. Yakovets, D.E. Shapovalov. – Zernograd: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education AChGAA, 2013. – 176 p.

5. Petrovets, V. R. Sowing grain crops with disc coulters with truncated-conical furrow-forming compactors / V. R. Petrovets, S. V. Avsyukevich, N. I. Dudko. – Gorki: BGSHA, 2015. – 217 p.

6. Khizhnyak V.I., Maltsev P.S., Taranov V.A., Onishchenko E.A., Kaimakova A.S., Khronyuk V.B., Lavrukhin P.V. Analysis of the designs of row-crop seeders // Bulletin of Agrarian Science of the Don. - 2020. - No. 4 (52). [Electronic resource] – Access mode: URL: https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-konstruktsiy-propashnyh-seyalok (access date: 01/09/2024).

7. Pat. 139767 Ukraine, IPC A01C 7/00, A01C 7/12. Pneumatic hanging system for precision hanging / V. V. Aulin, V. Ya. Koval, A. O. Pankov, A. V. Grinkiv, O. D. Derkach, T. M. Zamota, A. V. Shcheglov, A. A. Quiet; applicant and patent holder of Central Ukraine. national tech. univ. - No. u 201904667; application 05/02/2019 ; publ. 01/27/2020 ; Bull. No. 2.

Информация об авторах

А.В. Бондарчук – доктор экономических наук, доцент; М.В. Коваль – аспирант.

Information about the authors

A. Bondarchuk – Full Doctor of Economics, Associate Professor; M. Koval – postgraduate 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): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.365.32: 546.214
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-76-89

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ОЧАГА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОЗОНА В ЗЕРНОВОМ ВОРОХЕ

Антон Дмитриевич Головин [1]***, Илья Алексеевич Пожидаев*** [2]***, Иван Васильевич Баскаков***[3]***, Владимир Иванович Оробинский*** [4]***, Аркадий Васильевич Химченко*** [5]
[1,2,3,4,5] *Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж, Россия*
[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. *Известно, что на современном этапе развития агропромышленного комплекса всё чаще используют процесс озонирования. Это экологически чистый метод обработки сельскохозяйственного сырья с целью его обеззараживания, дезодорации, дезинсекции, повышения ростовых качеств семян и т.д. Стоит отметить, что, несмотря на столь активное применение озона, остаётся до конца не изученный вопрос, как газ распространяется в зерне во время его обработки. В статье приведены результаты исследований по определению формы и размера очага расхождения озоновоздушной смеси в зерновом ворохе. Экспериментально установлено, что озон в зерне расходится по форме приближенной к эллипсоиду. Размер очага зависит от времени насыщения и, как следствие, полученной дозы озонной обработки. С увеличением продолжительности эксперимента в большей степени увеличивается радиус эллипсоида, чем его высота. По результатам экспериментальных исследований в программе Matlab построена модель поведения озона в зерне в зависимости от режимов его обработки. Используя регрессии на основе процессов Гаусса спрогнозированы форма и размер очага распространения озоновоздушной смеси в зерне при изменении времени озонирования. Подбор параметров модели осуществляется на основе оптимизации Байеса в приложении Regression Learner из Statistics and Machine Learning Toolbox прикладного программного пакета Matlab. Электронная программа позволяет производить оптимизацию гиперпараметров и получать доверительные интервалы для предсказанных значений. Результаты исследований позволяют прогнозировать поведение озона в зерне, что необходимо для определения количества подающих сопл газа внутри зернохранилища любого объёма.*

Ключевые слова: *озон, озоновоздушная смесь, распространение озона в зерне.*

THEORETICAL PREREQUISITES FOR DETERMINING THE SHAPE AND SIZE OF THE OZONE DISTRIBUTION CENTER IN A GRAIN HEAP

Anton Golovin [1]***, Ilya Pozhidaev*** [2]***, Ivan Baskakov*** [3]***, Vladimir Orobinsky*** [4]***, Arkady Khimchenko*** [5]
[1, 2, 3, 4, 5] *Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,Voronezh, Russia*
[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. *It is known that at the present stage of development of the agro-industrial complex, the ozonation process is increasingly being used. This is an environmentally friendly method of processing agricultural raw materials in order to disinfect, deodorize, disinsect, increase the growth qualities of seeds, etc. It is worth noting that, despite such an active use of ozone, the question remains not fully*

understood how the gas spreads in the grain during its processing. The article presents the results of research to determine the shape and size of the source of the ozone-air mixture divergence in the grain heap. It has been experimentally established that the ozone in the grain diverges in a shape close to an ellipsoid. The size of the lesion depends on the saturation time and, as a result, the received dose of ozone treatment. As the duration of the experiment increases, the radius of the ellipsoid increases more than its height. Based on the results of experimental studies in the Matlab program, a model of the behavior of ozone in grain is constructed depending on its processing modes. Using regressions based on Gauss processes, the shape and size of the distribution center of the ozone-air mixture in the grain were predicted with a change in the ozonation time. The selection of model parameters is based on Bayesian optimization in the Regression Learner application from the Statistics and Machine Learning Toolbox of the Matlab application software package. The electronic program allows you to optimize hyperparameters and obtain confidence intervals for predicted values. The research results make it possible to predict the behavior of ozone in grain, which is necessary to determine the number of gas supply nozzles inside a granary of any volume.

Keywords: *ozone, ozone-air mixture, ozone distribution in grain.*

Для цитирования: Головин А.Д., Пожидаев И.А., Баскаков И.В., Оробинский В.И., Химченко А.В. Теоритические предпосылки определения формы и размера очага распространения озона в зерновом ворохе // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 76-89. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.

For citation: Golovin A., Pozhidaev I., Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenko A. Theoretical prerequisites for determining the share and size of the ozone distribution center in a grain heap. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 76-89. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-76-89.

Введение. В последние годы в России наблюдается стабильной рост урожайности зерновых культур. Из-за этого увеличивается давление на отрасль сельского хозяйства, поскольку требуется большее количество современных зернохранилищ. Для того чтобы зерно при хранении не теряло своих свойств, необходимо своевременно и равномерно проводить его обработку. На сегодняшний день известно несколько способов поддержания качества хранящегося зернового материала. Стоит отметить, что использование некоторых методов способствует угнетению флоры и фауны, могут негативно повлиять на ростовые процессы семян или привести к ухудшению экологической ситуации, а также нанести непоправимый вред здоровью человека и сельскохозяйственных животных. На современном этапе развития человечество старается уйти от использования в технологических процессах вредных химических веществ. Решением данного вопроса может быть применение экологически чистых методов обработки сырья сельскохозяйственной продукции. К одному из безопасных способов консервации можно отнести процесс озонирования [1, 2, 3].

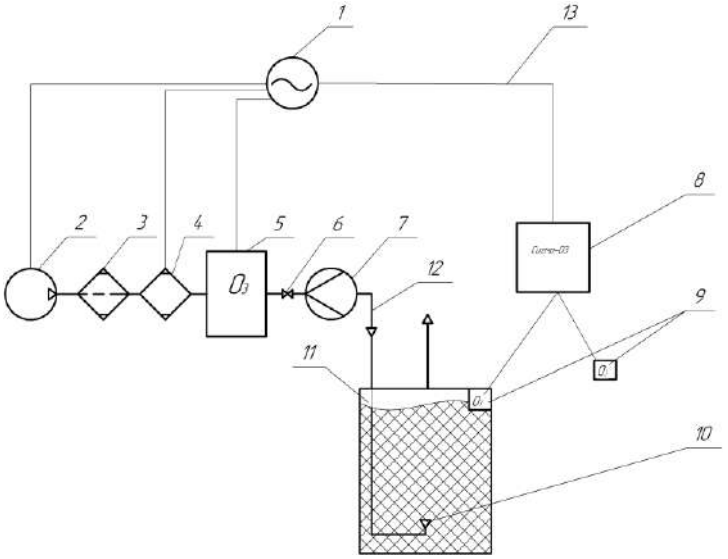
Озон имеет высокие окислительные, фунгицидные и бактерицидные свойства, которые позволяют использовать его в разных сферах деятельности [4, 5, 6]. Его применяют для обеззараживания воды, помещений, продуктов питания, а также в терапевтических целях в медицине. В сельском хозяйстве озон используют для дезинфекции складов, дезинсекции зерна, предпосевной обработки семян, полива сельскохозяйственных культур и т.д. Одним из главных преимуществ газа является то, что его избыточное количество быстро распадается до молекулярного кислорода и при воздействии на зерновой материал он не оставляет никаких вредоносных соединений [7, 8].

У озонной обработки, как и у любого другого способа, имеются свои недостатки. Главной отрицательной стороной озонирования является то, что при высоких концентрациях озон способен нанести вред здоровью человека или животных. Именно этот фактор является тормозящим при использовании данного технологического процесса в сельском хозяйстве. Однако на сегодняшний день благодаря развитию и совершенствованию инженерно-технического оборудования применение озоновоздушной смеси является достаточно безопасным.

Целью исследований является получение модели, описывающей закономерность распространения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонной обработки.

Материалы и методы.

В Воронежском госагроуниверситете были проведены экспериментальные исследования, направленные на определение зоны распространения озона в зерновом ворохе. Для этого была разработана лабораторная установка, представленная на рисунке 1.



1 – источник переменного тока; 2 – компрессор; 3 – фильтр; 4 – осушитель воздуха; 5 – озонатор; 6 – запорный вентиль; 7 – расходомер; 8 – газоанализатор; 9 – датчики концентрации газа; 10 – сопло; 11 – ёмкость; 12 – газопроводы, 13 – электрические линии

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки по озонированию зерна

Лабораторная установка состоит из источника переменного тока 1, воздушного компрессора 2, фильтра 3, осушителя воздуха 4, озонатора 5, расходомера 6, запорного вентиля 7, газоанализатора 8, датчиков 9, определяющих концентрацию озона, сопла 10, ёмкости 11 и газопроводов 12. Принцип действия следующий. Компрессор 2, осушитель воздуха 4, озонатор 5 и газоанализатор 8 по электролиниям 13 подключаются к сети переменного тока 1. При этом компрессор 2 засасывает воздух из окружающей среды и через фильтр 3 подает его в осушитель 4. Далее, обезвоженный воздушный поток поступает в озонатор 5, в котором обогащается озоном. Количество озоновоздушной смеси изменяется запорным вентилем 7. Пройдя расходомер 6, газ по газопроводу 12 поступает в ёмкость 11, в которой через сопло 10 подаётся в зерновой ворох. Концентрация озона в озоновоздушной смеси контролируется датчиками 9, связанными с газоанализатором 8, который регистрирует показания и выводит их на информационное табло.

Озон в озонаторе вырабатывается за счёт электрического разряда по схеме, представленной на рисунке 2. Из трёх молекул кислорода под действием высокочастотного тока получаются шесть атомов, которые при определённых условиях образуют две молекулы озона.

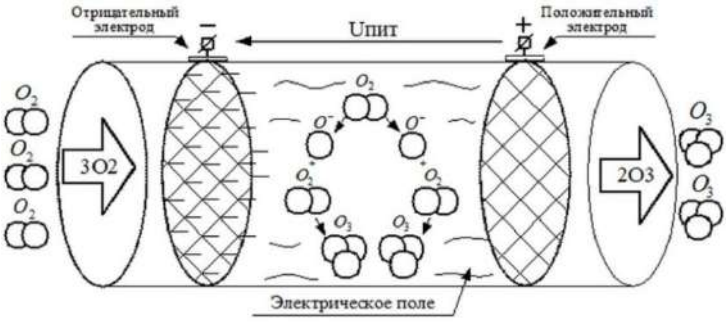


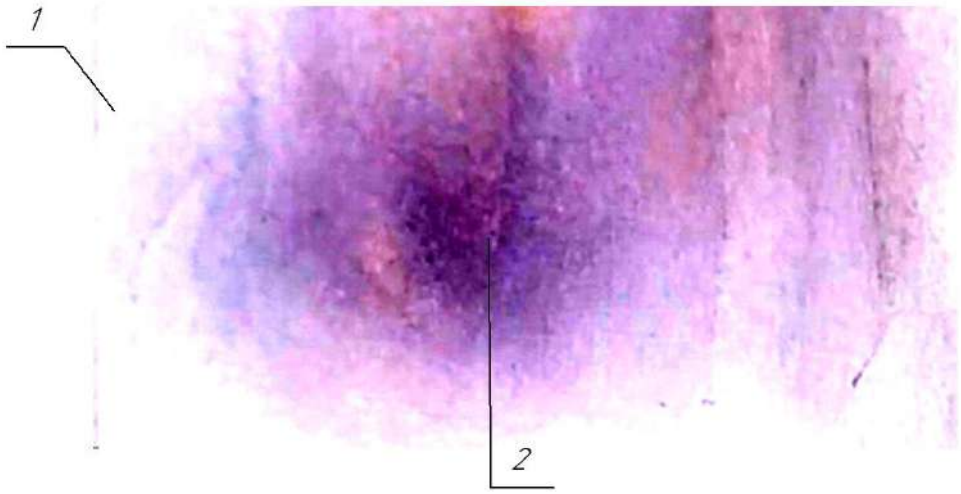
Рисунок 2 – Принцип получения озона в озонаторе

Для обнаружения озона использовали качественную йодокрахмальную реакцию

$$2KI + O_3 + H_2O = I_2 + 2KOH + O_2, \quad (1)$$

где KI – иодид калия;
O_3 – озон;
H_2O – вода;
I – молекулярный йод;
KOH – гидроксид калия;
O_2 – молекулярный кислород.

Результатом данной реакции является выделяемый йод, который окрашивает зону прохождения озона в характерный цвет. В процессе эксперимента фильтровальную бумагу пропитывали раствором крахмала с калием йодидом. Затем некоторое время подсушивали в тёмном месте, защищенном от попадания солнечных лучей. Далее, пропитанная бумага помещается в ёмкость, куда подаётся озоновоздушная смесь. При появлении озона индикатор окрашивается в фиолетовый цвет. Результат химической реакции представлен на рисунке 3.



1 – зона не подвергающаяся воздействию озона; 2 – зона качественной йодокрахмальной реакции в присутствии озона
Рисунок 3 – Результат проведения качественной йодокрахмальной реакции при взаимодействии с озоном на фильтровальной бумаге

Аналогичный эксперимент проводили в зерновом ворохе. Зерно пропитывали раствором крахмала с калия йодидом. Далее его погружали в экспериментальную ёмкость, куда подвали озоновоздушную смесь. Опыт проводили трижды, изменяя продолжительность обработки. В первом случае эксперимент длился 10 минут при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси 4,28 мг/м³. При этом доза озонной обработки составила 42,8 мин·мг/м^3, а расход рабочей смеси – 0,226 м^3. Во втором эксперименте время составило 20 минут, при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси 3,33 мг/м³. При этом доза озонной обработки равнялась 66,6 мин·мг/м^3, а расход рабочей смеси – 0,4 м^3. В третьем эксперименте опыт длился 30 минут при средней концентрации озона в озоновоздушной смеси 3,54 мг/м³. При этом доза озонной обработки составила 106,2 мин·мг/м^3, а расход рабочей смеси – 0,617 м^3.

Изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси во время экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси во время опыта

№ опыта	Время озонной обработки, мин	Концентрация озона в озоно-воздушной смеси, мг/м³	Средняя концентрация озона в озоно-воздушной смеси, мг/м³	Доза озонной обработки, мин·мг/м³	Средне-интегральная концентрация озона в озоно-воздушной смеси за опыт, мг/м³	Средне-интегральная доза озонной обработки*, мин·мг/м³
1	2	3,26	4,28	42,8	3,768	37,68
	4	3,26				
	6	4,82				
	8	5				
	10	5				
2	5	2,18	3,33	66,6	2,705	54,10
	10	3,32				
	15	2,82				
	20	5				
3	5	1,84	3,54	106,2	3,3067	99,20
	10	3,22				
	15	3,92				
	20	5				
	25	4,48				
	30	2,76				

* – среднеинтегральная доза озонной обработки определялась численным интегрированием методом трапеций.

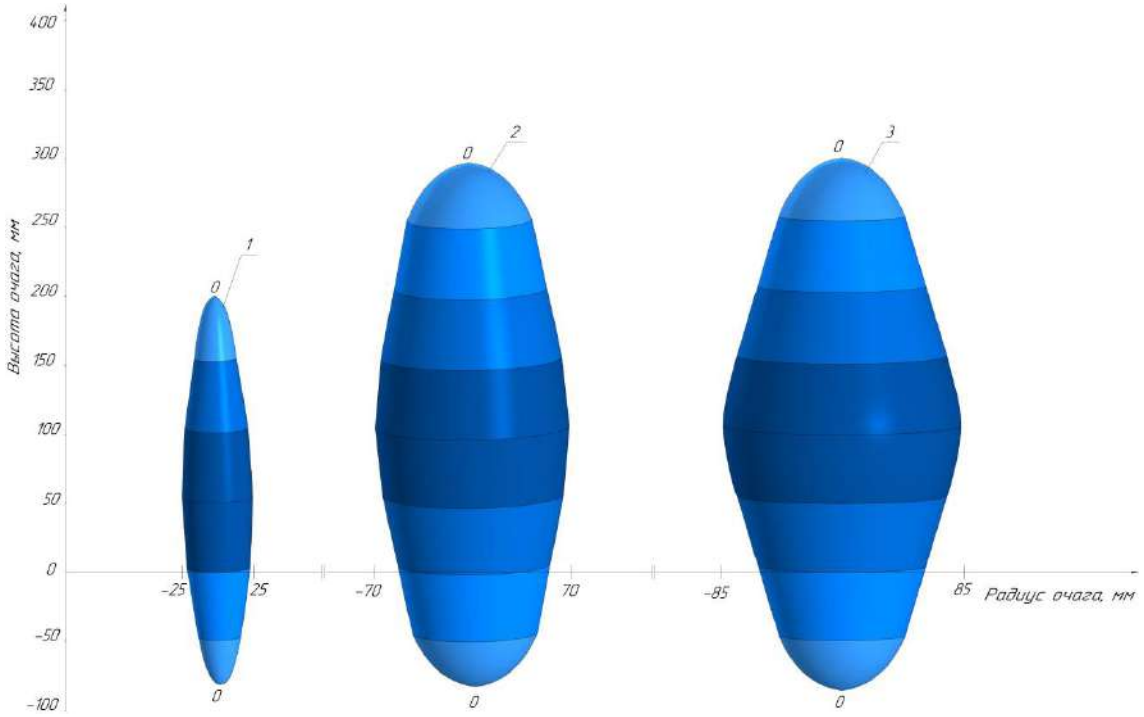
Следующим этапом экспериментов было определение зон распространения озона в зерновом ворохе, которые оценивали по появившемуся пятну, т.е. зёрен, окрашенных в фиолетовый цвет, выделившимся согласно уравнению (1) йодом. Для этого зерно изымали из ёмкости слоями с шагом 50 мм. При этом определяли радиус окрашиваемых пятен, поскольку они были приближены к окружности. Данный показатель измеряли по крайней точке окрашенного зерна с точностью до 1 мм. Изменение радиуса очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от высоты снятого слоя и времени обработки представлены в таблице 2. Слой зерна, в котором находится подающее сопло, обозначено за ноль. Нижерасположенные части имеют отрицательные значения, а выше – положительные.

Таблица 2 – Изменение радиуса очага распространения озона в зерновом ворохе в зависимости от высоты снятого слоя и времени обработки

Время опыта, мин	Высота, мм	Радиус, мм
10	-80	0
	-50	14
	0	23
	50	25
	100	22
	150	16
	200	0
20	-85	0
	-50	45
	0	55
	50	65
	100	70

20	150	65
	200	55
	250	44
	295	0
30	-90	0
	-50	47
	0	60
	50	75
	100	85
	150	75
	200	60
	250	46
	300	0

По результатам исследований посредством программы КОМПАС 3D получены зоны распространения озона в зерновом ворохе. Визуализированная 3D модель расхождения газа в слое зерна представлена на рисунке 4. Она представляет собой эллипсоид, разных размеров. Причём озон от места подачи распространяется не только вверх, но и немного вниз.



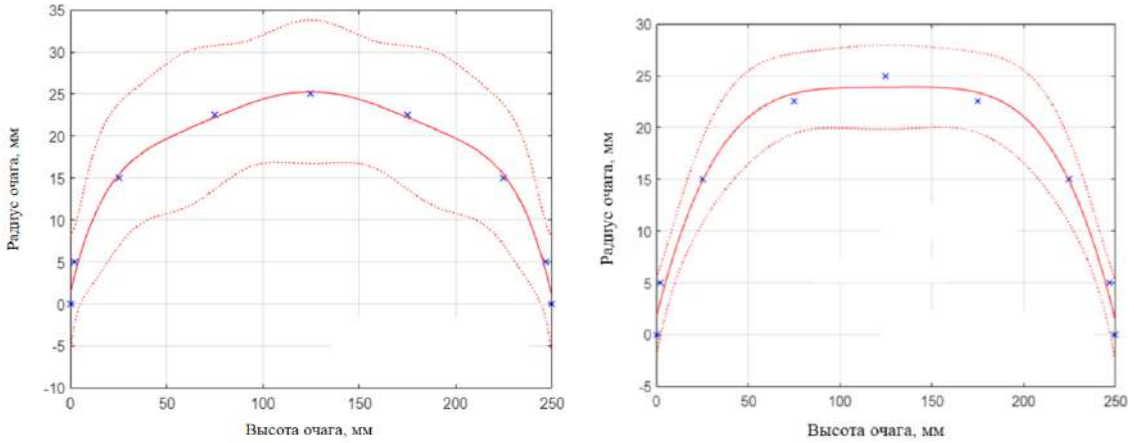
1 – 10 минут озонной обработки; 2 – 20 минут озонной обработки; 3 – 30 минут озонной обработки

Рисунок 4 – Очаги распространения озона в зерновом ворохе при разных режимах озонирования

Визуализированная 3D модель позволяет сравнить очаги распространения озона в зерновом ворохе при разных режимах озонной обработки. При помощи функций массо-центровочных характеристик (МЦХ) программы КОМПАС 3D, были получены объёмы фигур, которые соответствуют зонам распространения озона в зерне при разном времени эксперимента. Стоит отметить, что окрашенные зёрна имели разные оттенки, что говорит о различии условий протекания качественной йодокрахмальной реакции, вызванные изменяющейся концентрацией озона по зерновым слоям. Следовательно, более тёмные пятна, получали большую дозу озонной

обработки. Очевидно, что в месте подачи озоновоздушной смеси в зерновой ворох её скорость движения высокая и поэтому газ быстро проходит вверх через зерновые слои, лишь немногим увеличиваясь в диаметре. При этом в середине эллипсоида создаётся эпицентр с наивысшей концентрацией озона. Далее скорость движения газа снижается и верхние зерновые слои получают меньшую дозу озонной обработки и поэтому слабее окрашиваются. Эллипсоиды имеют максимальные диаметры в поперечном сечении в местах с наибольшей концентрацией озона в озоновоздушной смеси и по мере удаления от эпицентра уменьшаются в размерах до тех пор, пока не станут равными нулю. В конечном итоге на некотором удалении от места подачи газа действие озона прекращается.

Поиск характера изменения высоты эллипсоида в зависимости от его радиуса осуществлялся с помощью инструментов Matlab компании MathWorks. При этом линейная регрессия в виде полинома не дала удовлетворительных результатов. Как видно на рисунке 5 полиномы четвёртой и даже шестой степени, описывающие полученные экспериментальные результаты при экспозиции 10 минут имеют слишком большой доверительный интервал и не достаточно описывают математическое ожидание величины радиуса.



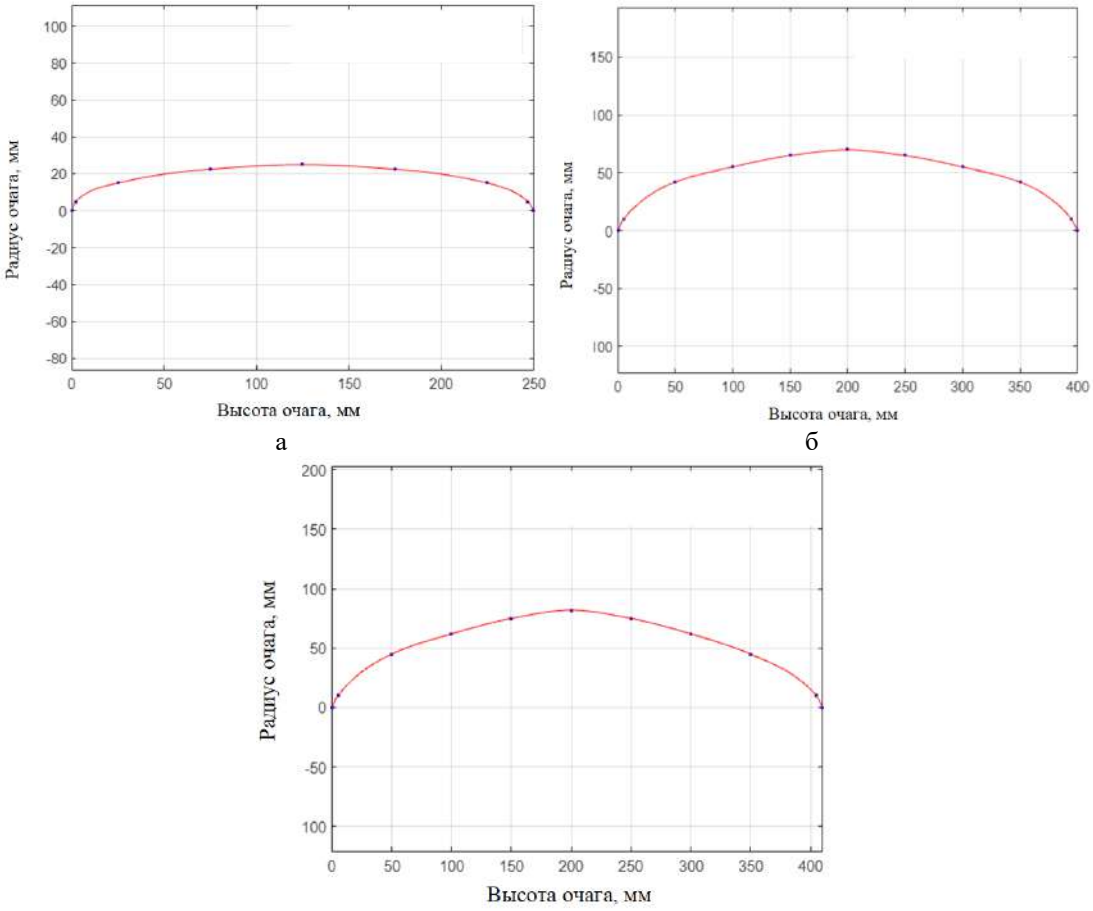
а б

а – аппроксимация полином 4 степени; б – аппроксимация полином 6 степени
····· – доверительный интервал

Рисунок 5 – Результаты аппроксимации полиномом результатов экспериментальных исследований изменения высоты эллипсоида в зависимости от его радиуса при 10 минутной озонной обработке

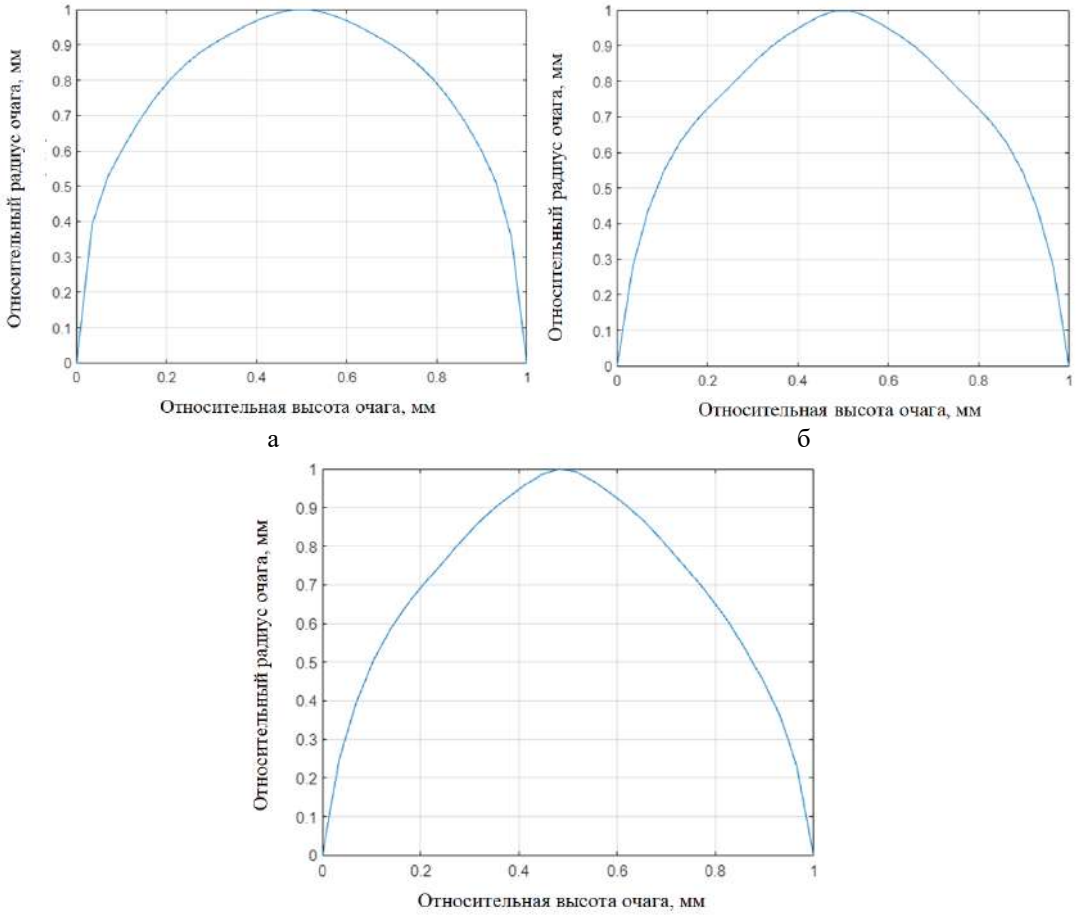
Подобный результат получен при разных степенях полинома. Аналогичная картина наблюдалась при попытке выполнить аппроксимацию разными нелинейными функциями. Поэтому на данном этапе для получения промежуточных значений с максимальной точностью, выбор был остановлен на интерполяции с максимальным соблюдением формы.

При интерполяции наилучший результат дал метод PCHIP – кусочный кубический интерполяционный полином Эрмита [9]. Применение данного инструмента позволило получить более гладкий график изменения высоты эллипсоида в зависимости от его радиуса за счёт использования кусочно-полиномиальной функции более высокого порядка. После обработки результатов получились зависимости, представленные на рисунке 6.



а – при 10 минутной обработке; б – при 20 минутной обработке; в – при 30 минутной обработке
Рисунок 6 – Результат интерполяции взаимосвязи радиуса озонного эллипсоида от его высоты методом PCHIP

На данном этапе исследования определяли форму объема обработанного зернового вороха. Она может быть описана закономерностью взаимосвязи относительных величин. Фактически мы пришли к нормированию высоты озонного эллипсоида и его радиуса. Поскольку процесс распространения озона в ворохе имеет случайные составляющие, а также на основе неудачного поиска подходящих уравнений линейной и нелинейной регрессии было принято решения о поиске модели описания формы обработанного объема на основе Гауссовых процессов [11]. Для этого желательно иметь большее количество точек. Поэтому модели на основе сплайнов использовались для получения дополнительных тридцати точек для каждого опыта с одинаковым шагом. Далее эти значения нормировались, путем деления фактического размера на максимальный параметр. В относительных (нормированных) величинах зависимости изменения радиуса эллипсоида от его высоты имеют вид, показанный на рисунке 7.



а – при 10 минутной обработке; б – при 20 минутной обработке; в – при 30 минутной обработке
Рисунок 7 – Результат интерполяции в относительных размеров очага распространения озона в зерновом ворохе

Из рисунка 7 видно, что при увеличении времени озонной обработки во всех опытах средняя часть расширяется и становится в середине вытянутой. В конечном итоге необходимо знать зависимость формы очага распространения озона от продолжительности озонирования, то есть она должна быть описана как зависимость относительного радиуса от относительной высоты и времени обработки. Предварительный анализ показал, что следует использовать регрессию на основе Гауссовых процессов. Однако данная методология достаточно обширна и важно сделать правильный выбор в отношении видов функций ядра и их взаимосвязи. То есть следует определится с гиперпараметрами модели. Результат интерполяции относительных размеров очага распространения озона в зерновом ворохе при двухфакторной зависимости представлен на рисунке 8.

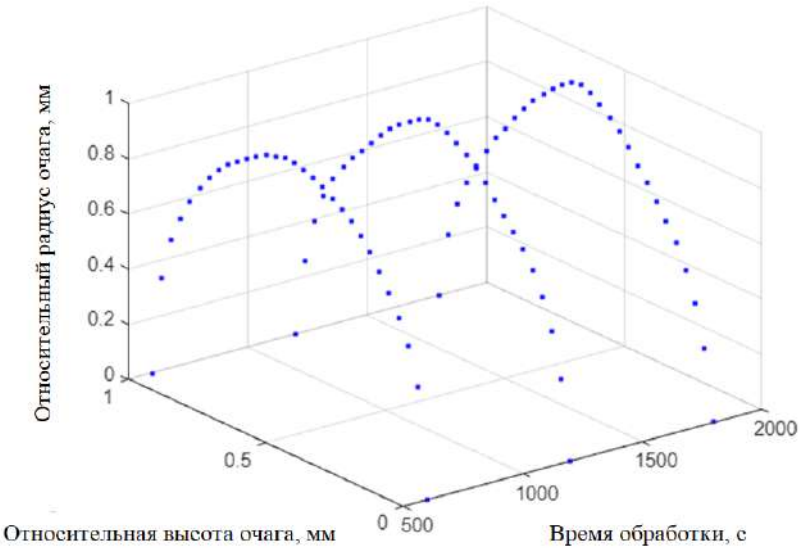


Рисунок 8 – Результат интерполяции относительных размеров очага распространения озона при двухфакторной зависимости

Анализируя рисунок 8 можно сказать, что полученная математическая модель позволяет в любом диапазоне значений оценить форму очага распространения озона в нормированных величинах в зависимости от времени обработки.

Подбор параметров модели осуществлялся на основе оптимизации Байеса в приложении Regression Learner из Statistics and Machine Learning Toolbox прикладного программного пакета Matlab [12]. По умолчанию приложение Регрессия Learner может выполнять настройку гиперпараметров с помощью байесовской оптимизации [10]. Цель байесовской оптимизации и оптимизации в целом – найти точку, которая минимизирует целевую функцию. В контексте настройки гиперпараметров в приложении точка представляет собой набор значений гиперпараметров, а целевая функция – это функция потерь или среднеквадратическая ошибка (MSE). В результате оптимизации было получено, наилучшее решение на основе экспоненциального ядра с автоматическим определением релевантности, описываемой зависимостью

$$k(x_i, x_j \,|\theta) = \sigma_f^2 e^{-r}, \tag{2}$$

где k – ядро / ковариационная функция;
x_i, x_j – переменные;
θ – вектор параметризации;
σ_f^2 – дисперсия экспериментальных данных;
e – основание натурального логарифма;
r – показатель степени.
При этом показатель степени r рассчитывается по формуле

$$r = \sqrt{\sum_{m=1}^{d} \frac{(x_{jm} - x_{jm})^2}{\sigma_m^2}}, \tag{3}$$

где d – количество описываемых участков;
m – номер точки на участке данных;
σ_m^2 – дисперсия экспериментальных данных на участке.

Тогда в общем виде функция ковариации будет выглядеть следующим образом:

$$k(x_i, x_j \,|\theta) = \sigma_f^2 e^{-\sqrt{\sum_{m=1}^{d} \frac{(x_{jm} - x_{jm})^2}{\sigma_m^2}}}. \tag{4}$$

Результаты и их обсуждение. Полученные значения гиперпараметров позволили получить достаточно точную математическую модель регрессии на основе процессов Гаусса представленной на рисунке 9.

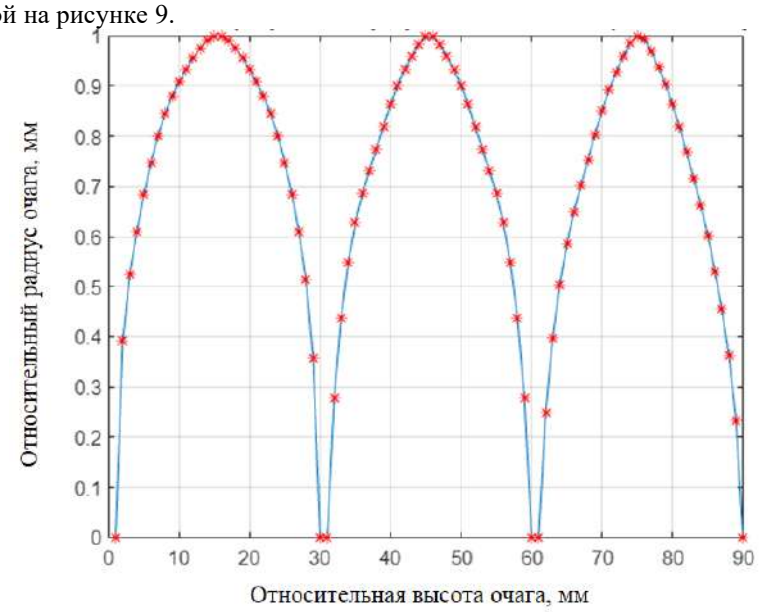


Рисунок 9 – Сопоставление результатов регрессии на основе процессов Гаусса

Для проверки корреляции предсказаний модели и исходных точек был проведен анализ на основе линейной регрессии представленной на рисунке 10.

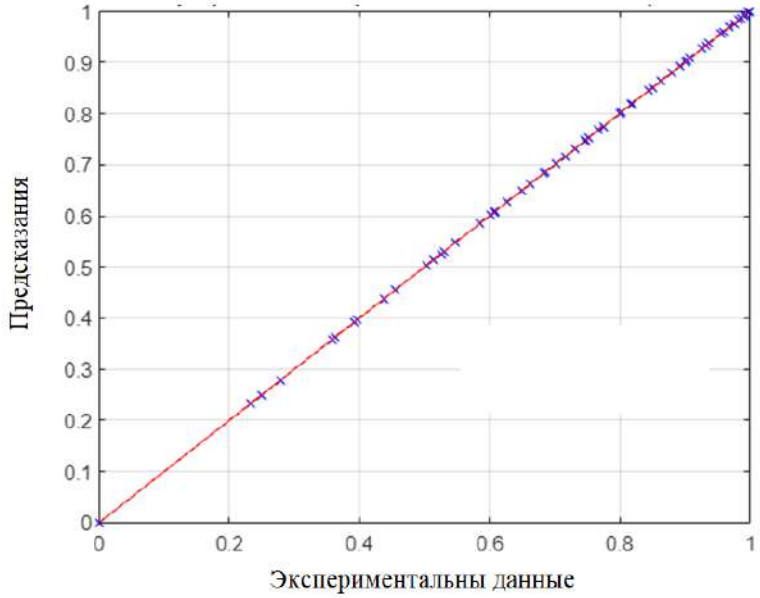


Рисунок 10 – Линейная регрессия экспериментальных данных и предсказаний

Из рисунка 10 видно, что почти все точки лежат на одной прямой. Об этом свидетельствует и коэффициент детерминации R^2, который составил 0,99998.

Для дальнейших исследований важно понимать с какой точностью модель будет предсказывать то, как меняется форма очага распространения озона при разном времени обработки. Стоит отметить, что одной из положительных черт при использовании Гауссовых процессов является возможность

получения доверительного интервала для предсказанных значений. На рисунке 11 показана поверхность в зоне эксперимента, предсказания при минимальном времени обработки и 40 минутной обработке. Точки в виде «+» показывают 95 % доверительный интервал.

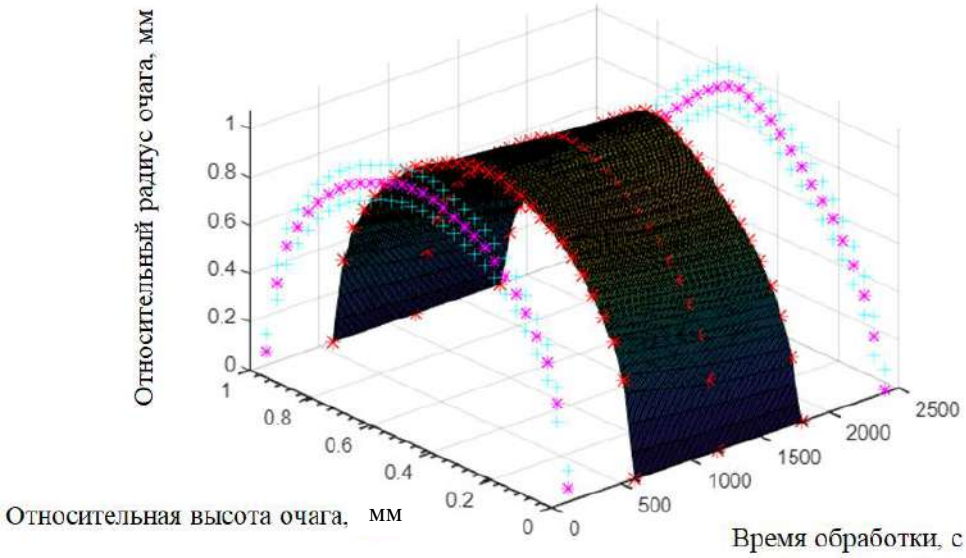


Рисунок 11 – Общий вид формы распространения очага озона в зерновом ворохе с предсказаниями и доверительным интервалом

Очевидно, что вероятность ошибки при предсказаниях невелика, о чем свидетельствует узкий доверительный интервал, а данная модель может быть использована в дальнейших исследованиях.

Заключение. Таким образом, можно сделать вывод о том, что на данном этапе поставленная цель достигнута. В результате исследований удалось получить форму очага распространения озона в зерновом ворохе при разной продолжительности операции. Получена математическая модель изменения его формы в зависимости от времени обработки в виде регрессии на основе Гауссовых процессов. Данный алгоритм позволит прогнозировать зону расхождения озона в зерновом ворохе при различных режимах озонирования, что послужит основой для расчёта количества подающих газ сопл в зернохранилище любого объёма, а также оптимизации их расположения.

Список источников

1. Aboltins A., Palabinskis J., Lauva A. Grain active ventilation using ozonized air // Acta Horticulturae – 2010. – Vol. 858(69). – Pp. 449-455. DOI:10.17660/ActaHortic.2010.858.69.

2. Kells S.A., Mason L.J., Mayer D.E., Voloshuk K.P. Efficiency and fumigation characteristics of ozone in stored corn // Journal of Stored Products Research. – 2001. – Vol. 37(4). – Pp. 371-382. DOI: 10.1016/s0022-474x(00)00040-0.

3. Mendes F., Mayer D.E., Mason L.J., Voloshuk K.P. The penetration of ozone into the columns of stored grain and the effect on the chemical composition and processing performance // Journal of Stored Products Research. – 2003. – Vol. 39(1) – Pp. 33-44. DOI:10.1016/s0022-474x(02)00015-2.

4. Tiwari B.K., Brennan C.S., Curran T., Gallagher E., Cullen P.J., O' Donnell C.P. Application of ozone in grain processing // Journal of Cereal Science. – 2010. – Vol. 51(3). – Pp. 248-255. DOI: 10.1016/j.jcs.2010.01.007.

5. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.V., Chernyshov A.V. Studies of the ozonation process when drying grain // 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.

6. 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.

7. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., Chernyshov A.V., Gulevsky V.A. Modes of treating pre-sowing grain seeds with ozone // 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: 10.1088/17551315/954/1/012009.

8. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Ozone pest control of grain // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Advanced Agriculture for Sustainable Future (Uzbekistan, Tashkent, 23-25 February, 2022). – IOP Publishing Ltd, 2023. – Vol. 1138. – №012026. – 5 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012026.

9. 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.

10. Neal R.M. Bayesian Learning for Neural Networks. – London: Springer Limited London, 2012. – 204 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0745-0.

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

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

References

1. Aboltins A., Palabinskis J., Lauva A. Grain active ventilation using ozonized air // Acta Horticulturae – 2010. – Vol. 858(69). – Pp. 449-455. DOI:10.17660/ActaHortic.2010.858.69.

2. Kells S.A., Mason L.J., Mayer D.E., Voloshuk K.P. Efficiency and fumigation characteristics of ozone in stored corn // Journal of Stored Products Research. – 2001. – Vol. 37(4). – Pp. 371-382. DOI: 10.1016/**s**0022-474x(00)00040-0.

3. Mendes F., Mayer D.E., Mason L.J., Voloshuk K.P. The penetration of ozone into the columns of stored grain and the effect on the chemical composition and processing performance // Journal of Stored Products Research. – 2003. – Vol. 39(1). – Pp. 33-44. DOI:10.1016/s0022-474x(02)00015-2.

4. Tiwari B.K., Brennan C.S., Curran T., Gallagher E., Cullen P.J., O' Donnell C.P. Application of ozone in grain processing // Journal of Cereal Science. – 2010. – Vol. 51(3). – Pp. 248-255. DOI: 10.1016/j.jcs.2010.01.007.

5. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gulevsky V.A., Gievsky A.V., Chernyshov A.V. Studies of the ozonation process when drying grain // 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.

6. 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.

7. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., Chernyshov A.V., Gulevsky V.A. Modes of treating pre-sowing grain seeds with ozone // 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: 10.1088/17551315/954/1/012009.

8. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.V., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Ozone pest control of grain // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Advanced Agriculture for Sustainable Future (Uzbekistan, Tashkent, 23-25 February, 2022). – IOP Publishing Ltd, 2023. – Vol. 1138. – №012026. – 5 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012026.

9. 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.

10. Neal R.M. Bayesian Learning for Neural Networks. London: Springer Limited London, 2012. – 204 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-0745-0.

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

12. 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, доцент; 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, Associate 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): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.365.32: 546.214
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-90-101

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОЗОНА С ЗЕРНОМ

Илья Алексеевич Пожидаев [1], ***Антон Дмитриевич Головин*** [2], ***Иван Васильевич Баскаков***[3], ***Владимир Иванович Оробинский*** [4], ***Аркадий Васильевич Химченко*** [5]
[1,2,3,4,5] *Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, г. Воронеж, Россия*
[1] proda_48@mail.ru, [2] gton_02@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: Илья Алексеевич Пожидаев, proda_48@mail.ru
Corresponding author: Ilya Pozhidaev, proda_48@mail.ru

Реферат. *Несмотря на популяризацию озонных технологий в сельском хозяйстве, теоретические аспекты взаимодействия озоновоздушной смеси с зерновым материалом остаются на стадии изучения. Упрощённое предположение, что изменение количества поглощённого озона зерном пропорционально начальной концентрации газа недостаточно точно описывает данный процесс. Попытки аналитическим путём определить некую константу скорости поглощения озона единицей объёма зерна также не увенчались успехом. Полученное выражение на тот момент являлось трансцендентным. Его решение было возможно только при выполнении многократно повторяющихся расчётов, то есть с применением метода итерации на персональном компьютере. Использование современного прикладного программного пакета Matlab позволило установить константу скорости поглощения озона единицей объёма зерна. Однако проведённые эксперименты показали, что в процессе опыта данная константа существенно меняется, в том числе и в зависимости от условий, поэтому данный теоретический подход требует уточнения. Известные в физике законы, описывающие процесс диффузии, были адаптированы к процессу озонной обработки. Применение уравнения Ленгмюра-Шефера для количества молекул озона, адсорбированных на поверхности зерна, и второго закона Фика позволило определить скорость озонной диффузии и изменение концентрации озона во времени, с учетом особенностей зернового вороха. Получена зависимость для коэффициента озонной диффузии, которая характеризует способность зёрен поглощать озон через клеточные мембраны, и константы разложения озона. При нормальных условиях хранения данные величины, зависящие от температуры, могут считаться постоянными. Аналитически полученные зависимости позволят определить коэффициент озонной диффузии и константу разложения озона экспериментальным путём.*

Ключевые слова: *озон, зерно, озоновоздушная смесь, коэффициент озонной диффузии.*

THEORETICAL ASPECTS OF OZONE-GRAIN INTERACTION

Ilya Pozhidaev [1], ***Anton Golovin*** [2], ***Ivan Baskakov*** [3], ***Vladimir Orobinsky*** [4], ***Arkady Khimchenko*** [5]
[1, 2, 3, 4, 5] *Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great,Voronezh, Russia*
[1] proda_48@mail.ru, [2] gton_02@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. *Despite the popularization of ozone technologies in agriculture, the theoretical aspects of the interaction of an ozone-air mixture with grain material remain under study. The simplified assumption that the change in the amount of ozone absorbed by the grain is proportional to the initial gas concentration does not accurately describe this process. Attempts to analytically determine a certain*

constant of the rate of ozone absorption by a unit of grain volume were also unsuccessful. The resulting expression was transcendental at that time. Its solution was possible only when performing repetitive calculations, that is, using the iteration method on a personal computer. The use of the modern Matlab application software package made it possible to establish a constant rate of ozone absorption per unit grain volume. However, the experiments have shown that during the experiment this constant changes significantly, including depending on the conditions, therefore this theoretical approach requires clarification. The laws known in physics describing the diffusion process have been adapted to the ozone treatment process. The application of the Langmuir-Schaefer equation for the number of ozone molecules adsorbed on the grain surface and Fick's second law made it possible to determine the rate of ozone diffusion and the change in ozone concentration over time, taking into account the characteristics of the grain pile. A dependence was obtained for the ozone diffusion coefficient, which characterizes the ability of grains to absorb ozone through cell membranes, and the ozone decomposition constants. Under normal storage conditions, these temperature-dependent values can be considered constant. The analytically obtained dependences will allow us to determine the ozone diffusion coefficient and the ozone decomposition constant experimentally.

Keywords: *ozone, grain, ozone-air mixture, ozone diffusion coefficient.*

Для цитирования: Пожидаев И. А., Головин А. Д., Баскаков И. В., Оробинский В. И., Химченко А.В. Теоритические аспекты взаимодействия озона с зерном // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 90-101. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-90-101.

For citation: Pozhidaev I., Golovin A., Baskakov I., Orobinsky V., Khimchenko A. Theoretical aspects of ozone-grain interaction. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 90-101. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-90-101.

Введение. Благодаря успешному развитию озонных технологий наметилась устойчивая тенденция к применению процесса озонирования при обработке зерна [9, 10]. Использование озона в сельском хозяйстве расширило круг научных исследований. Это связано с уникальными антибактериальными свойствами газа, его экологической чистотой, экономичностью и простотой применения. Несмотря на значительное число работ по озонной обработке, вопрос взаимодействия озоновоздушной смеси с зерновым материалом находится в стадии изучения.

Смирнов А.А. изучал процесс прохождения озоновоздушной смеси через слой зернового материала [1]. Изменение концентрации озона C_i в зерне автор представил в следующем выражении:

$$C_i = C_o - \frac{\left(g_{адс} + g_{разл} + g_{обм.} + g_{хим.р}\right)\cdot t}{W}, \quad (1)$$

где C_o – начальная концентрация озона;
$g_{адс.}$ – количество адсорбированного озона;
$g_{разл.}$ – количество разложившегося озона на поверхности;
$g_{обм.}$ – количество разложившегося озона в обрабатываемом объеме;
$g_{хим.р}$ – количество озона, вступившего в химические реакции;
t – время контакта с зерновым слоем;
W – расход озоновоздушной смеси через слой зернового материала.

А.А. Смирнов утверждает [1], что при прохождении озоновоздушной смеси через зерновую насыпь, каждый его слой поглощает определенную величину поступающего озона. С увеличением толщины будет происходить уменьшение количества озона на величину dp, равное количеству поглощенного и разложившегося озона в этом слое за время t. Следовательно, для описания уменьшения содержания озона, при некоторых допущениях, можно использовать уравнение органического роста, т.е. в первом приближении пропорциональность начальному количеству газа:

$$\frac{dp}{dt} = -Kx\ , \tag{2}$$

где K – коэффициент пропорциональности расходования озона по высоте слоя; x – количество озона в момент t.

Фактически данная зависимость упрощает и обобщает взаимосвязь расхода озона на различных этапах прохождения через зерновые слои. Физическое значение приведенного коэффициента пропорциональности в дальнейших расчетах остается неизвестным. Следовательно, зависимости, представленные в работе [1], могут быть недостаточно точными.

Д.А. Нормов в своих исследованиях предположил, что изменение скорости поглощения озона зерном определяется сорбционной активностью и значением концентрации озона [2]. Данную зависимость он представил в следующем виде:

$$\frac{dC}{dt} = -K_C C_{\text{озон}} S\ , \tag{3}$$

где dC/dt – скорость поглощения озона зерном;
$C_{\text{озон}}$ – концентрация озона в озоновоздушной смеси, мг/м^3;
K_C – константа скорости поглощения озона единицей объёма зерна, мг/(м^3·с);
S – площадь обрабатываемого зернового материала, м^2.

К данному выражению есть вопросы со стороны теории размерностей. Очевидно, размерности правой и левой частей выражения должны быть одинаковы, а в данном случае это не так. Возможно, присутствуют опечатки.

С другой стороны, скорость поглощения озона семенами может быть описана следующим выражением

$$\frac{dC}{dt} = \frac{S}{V}\left[v\left(C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}\right) - K_C C_{\text{вых}} V\right], \tag{4}$$

где V – объём обрабатываемого зернового материала, м^3;
v – скорость движения озоновоздушной смеси, м/с;
$C_{\text{вх}}$ – концентрация озона на входе в зерновой материал, мг/м^3;
$C_{\text{вых}}$ – концентрация озона на выходе из зернового материала, мг/м^3.

Решение представленного уравнения выражено в следующем виде:

$$C_{\text{вых}} = \frac{C_{\text{вх}} v}{v + K_C S V}\left[1 - \mathrm{e}^{-\frac{v + K_C S V}{V}}\right] \cdot t\ , \tag{5}$$

где t – время обработки.

В результате проведенных расчётов определить константу скорости поглощения озона единицей объёма зерна (K_C), аналитическим путём автору не удалось. Он утверждает, что полученное выражением является трансцендентным и его решение возможно только многократными повторяющимися расчётами, то есть методом итерации посредством специальной программы ЭВМ.

Нами было получено решение данного уравнения в виде:

$$K_C = -\frac{v - \dfrac{C_{\text{вх}} tv + C_{\text{вых}} V W_1\left(\dfrac{C_{\text{вх}} tve^{-\frac{C_{\text{вх}} tv}{C_{\text{вых}} V}}}{C_{\text{вых}} V}\right)}{C_{\text{вых}}}}{SV}\ , \tag{6}$$

где W_1 – функция Ламберта.

Однако, проведенные эксперименты для получения константы не дали точного результата. В процессе опыта константа существенно менялась, в том числе и в зависимости от условий, поэтому данный теоретический подход требует уточнения.

Очевидно, на данный момент нет качественной теории, позволяющей описать изменение концентрации озона в смеси при озонировании и определить необходимые константы, для использования в дальнейших расчетах.

Целью статьи является получение аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать и прогнозировать скорость поглощения озона зерном, и включающие в себя показатели и константы, которые возможно определить экспериментальным путем.

Материалы и методы.

При выполнении данной работы использовались аналитические методы, основанные на применении известных в физике законов, описывающих процесс диффузии. Эти закономерности можно адаптировать к процессу озонирования с учетом особенностей зернового материала.

Применительно к процессу обработки зернового вороха озоновоздушной смесью накопленное количество молекул, адсорбированных на поверхности зерна, можно описать уравнением Ленгмюра-Шефера [5]:

$$\Gamma = 2AC\sqrt{\frac{K_D t}{\pi}}, \tag{7}$$

где Γ – количество молекул в единице массы, адсорбированных или абсорбированных за определённое время t, мг/с;

A – площадь поверхности, м^2;

C – концентрация молекул озона в объеме, мг/м^3;

K_D – коэффициент диффузии абсорбера, м^2/с;

t – затраченное время, с.

Обычно на краткосрочном пределе путем дифференцирования по времени получают уравнение скорости озонной диффузии, которое имеет следующий вид:

$$v_{\text{д}} = \frac{d\Gamma}{dt} = 2dC\sqrt{\frac{K_D}{dt\pi}}, \tag{8}$$

где $v_{\text{д}}$ – удельная скорость озонной диффузии через площадь поверхности зерен (диффузионный поток), мг/м^{2}с.

Сравнение единиц измерения в правой и левой части уравнения показывает, что они одинаковы:

$$\frac{\text{мг}}{\text{м}^2\text{с}} = \frac{\text{мг}}{\text{м}^3}\sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}.$$

В таком варианте модель корректна.

Адсорбция и скорость поглощения (абсорбции) разбавленного растворенного вещества поверхностью или границей раздела в (газообразном или жидком) растворе может быть рассчитана с использованием законов диффузии Фика.

Первый закон Фика количественно описывает процесс диффузии и отражает тот факт, что поток вещества в направлении оси X пропорционален градиенту концентрации dC/dx [3].

Уравнение для диффузионного потока или скорости диффузии в количестве вещества на единицу площади в единицу времени [7, 8], в таком случае, имеет следующий вид:

$$v_{\text{д}} = -K_D \frac{dC}{dx}. \tag{9}$$

Анализ единиц измерения показывает, что они в правой и левой частях уравнения также одинаковы

$$\frac{\text{мг}}{\text{м}^2\text{с}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \frac{\frac{\text{мг}}{\text{м}^3}}{\text{м}} .$$

Движущей силой одномерной диффузии при проникновении в поры зерна озона будет являться градиент концентрации ($-dC_{\text{пор}}$), отражающий изменение концентрации озона в порах зерна.

Величина $-dC_{\text{пор}}/dx$ для идеальных смесей считается градиентом концентрации при изменении вдоль оси X. Она же движущая сила проникновения озона в зерновой материал, если направление X считать от поверхности зерна к центру, и зависит от размеров зерен и их пористости.

В данном случае при переходе к конечным величинам $dC_{\text{пор}} \approx \Delta C_{\text{пор}}$ – это разница концентрации в порах зернового материла и в озоновоздушной смеси. Также можно отметить, что проникновение осуществляется с разных сторон, и среднее расстояние проникновения зернового материала составит:

$$dx = \frac{d_{\text{ср}}}{4}, \tag{10}$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр зерна.

Следовательно, разница концентраций в озоновоздушной смеси и в порах в данный момент времени

$$\Delta C_{\text{пор}} = C - C_{\text{пор}}, \tag{11}$$

где C – концентрация озона в озоновоздушной смеси, мг/м^3;
$C_{\text{пор}}$ – концентрация молекул озона в порах зерна, мг/м^3.

Таким образом, уравнение скорости на всем промежутке проникновения

$$v_{\text{Д}} = -K_D \frac{dC_{\text{пор}}}{dx} \tag{12}$$

в конечных величинах примет следующий вид:

$$v_{\text{Д}} = 4K_D \frac{C - C_{\text{пор}}}{d_{\text{ср}}} . \tag{13}$$

Используя второй закон Фика возможно предсказать, как диффузия вызывает изменение концентрации озона во времени.

Второй закон Фика имеет ту же математическую форму, что и уравнение теплопроводности, а его фундаментальное решение такое же, как у теплового ядра, за исключением замены теплопроводности k коэффициентом диффузии K_D [3]:

$$C(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi K_D t}} e^{-\frac{x^2}{4K_D t}} . \tag{14}$$

Проведем проверку полученного уравнения с точки зрения размерности:

$$\frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \neq \frac{1}{\sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}}\text{с}}} \Leftrightarrow \frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \neq \frac{1}{\text{м}} .$$

Из размерности не хватает мг/м^3, так как концентрация не в молях, а в миллиграммах.

Пусть ρ_o – парциальная плотность озона, мг/м^3.

Тогда

$$C(x,t) = \frac{\rho_o \frac{V}{S}}{\sqrt{4\pi K_D t}} e^{-\frac{x^2}{4K_D t}}, \quad (15)$$

где V – объём обрабатываемого зерна, м^3;

S – площадь поверхности зерна, м^2.

Тогда уравнение в размерностях будет иметь корректный вид:

$$\frac{\text{мг}}{\text{м}^3} = \frac{\frac{\text{мгм}^3}{\text{м}^3\text{м}^2}}{\sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}}\text{с}}}.$$

К тому же не сложно доказать взаимосвязь парциальной плотности и количества вещества озона в озоновоздушной смеси.

Концентрация в смеси при $x = 0$ зависит только от времени и равна

$$C(t) = \frac{\rho_o \frac{V}{S}}{\sqrt{4\pi K_D t}}, \quad (16)$$

а концентрация в порах при $x = \frac{d_{\text{ср}}}{4}$:

$$C_{\text{пор}}(t) = \frac{\rho_o \frac{V}{S}}{\sqrt{4\pi K_D t}} e^{-\frac{(\frac{d_{\text{ср}}}{4})^2}{4K_D t}}. \quad (17)$$

Если исходить из положения, что в месте контакта с зерном диссоциация только начинается, а концентрация озона в озоновоздушной смеси около зерна C, что справедливо из-за малых объемов пустот в зерновом ворохе, то:

$$C_{\text{пор}}(t) = C(t) e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{ср}}}{4}\right)^2}{4K_D t}}. \quad (18)$$

Таким образом, уравнение скорости диффузии будет иметь следующий вид:

$$v_{\text{Д}}(t) = 4K_D \frac{C(t) - C_{\text{пор}}(t)}{d_{\text{ср}}} = 4K_D \frac{C(t) - C(t) e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{ср}}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{\text{ср}}} = 4K_D \frac{C(t)\left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{ср}}}{4}\right)^2}{4K_D t}}\right)}{d_{\text{ср}}}. \quad (19)$$

Здесь мы получили скорость заполнения пор относительно площади поверхности зёрен. Нам более рационально оперировать скоростью, которая характеризует изменение концентрации при заполнении пор в объёме:

$$v_{V_{\text{Д}}}(t) = v_{\text{Д}}(t) \frac{S}{V}. \quad (20)$$

Если исходить из понятия скважистости зерна, можно ввести понятие коэффициента скважистости $k_{\text{скв}}=V_{\text{зм}}/V$, который представляет отношение объема зерновой массы к объему, занимаемому зерном с учетом наличия пространств между отдельными зернами. Коэффициент $k_{\text{скв}}$ всегда имеет значение меньше 1. Тогда

$$\frac{V}{S} = \frac{V_{\text{зм}}}{k_{\text{скв}} S} . \tag{21}$$

Назовем соотношение $\frac{S}{V_{\text{зм}}}$ коэффициентом формы:

$$k_f = \frac{S}{V_{\text{зм}}} . \tag{22}$$

Коэффициент представляет собой среднее отношение площади поверхности зёрнышка к его объёму. Измеряется в м$^{-1}$. Исходя из этого, получим следующее выражение:

$$\frac{V}{S} = \frac{V_{\text{зм}}}{k_{\text{скв}} k_f V_{\text{зм}}} = \frac{1}{k_f k_{\text{скв}}} . \tag{23}$$

И как следствие

$$\frac{S}{V} = k_f k_{\text{скв}} . \tag{24}$$

Тогда

$$v_{V_{\text{Д}}}(t) = v_{\text{Д}}(t) k_f k_{\text{скв}} . \tag{25}$$

В результате проведенных операций получаем следующее уравнение

$$v_{V_{\text{Д}}}(t) = 4 k_f k_{\text{скв}} K_D \frac{C(t)\left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{\text{ср}}}{4}\right)^2}{4K_D t}}\right)}{d_{\text{ср}}} . \tag{26}$$

Таким образом, фактическая скорость диссоциации, отнесённая к объёму зерна, с учётом скважистости и соотношения площади поверхности к объёму одного зёрнышка, зависит от концентрации озоновоздушной смеси, которая может меняться во времени, коэффициента диффузии K_D и средних размеров зёрен или семян. Эти размеры известны и для некоторых культур приведены в таблице 1 [4].

Таблица 1 – Средние размеры зерен и семян [4]

Наименование растений	Размеры зерен и семян, мм		
	Длина	Ширина	Толщина
Пшеница	4,2–8,6	1,6–4,0	1,5–3,8
Рожь	5,0–10,0	1,4–3,6	1,2–3,5
Кукуруза	5,5–13,5	5,0–11,5	2,5–8,0
Ячмень	7,0–14,6	2,0–5,0	1,4–4,5
Овес	8,0–16,6	1,4–4,0	1,2–3,6
Рис	5,0–12,0	2,5–4,3	1,2–2,8
Просо	1,8–3,2	1,2–3,0	1,0–2,2
Чумиза	1,3–2,5	1,3–2,3	0,9–1,8
Гречиха	4,4–8,0	3,0–5,2	2,0–4,2
Горох	4,0–10,0	3,7–10,0	3,5–10,0
Чечевица	4,0–8,8	4,0–8,0	2,0–3,3
Фасоль	7,2–18,5	4,7–11,0	2,7–10,0
Соя	5,0–10,5	4,5–8,0	4,0–7,0
Подсолнечник	7,5–15,0	3,5–8,6	1,7–6,0
Клещевина	10,0–16,5	6,5–11,5	4,6–8,4
Рыжик	1,5–2,5	0,8–1,5	0,6–1,3

Коэффициент диффузии K_D характеризует способность зерен поглощать озон через поверхность, т.е. поры. При нормальных условиях хранения зёрен и семян в зернохранилище данная величина, зависящая от температуры, может считаться постоянной.

Однако, способность зёрен поглощать озон не бесконечна и может зависеть, как минимум, от количества пор и химического состава зерна, что может характеризоваться условной константой поглощения или её остаточной величиной, а также от площади поверхности зерна. Принятая авторами [1, 2] константа поглощения K является постоянной величиной для необработанных зёрен и измеряется в мг/м^3. Константа определяет количество поглощённого озона, которое может определяться обратимыми ($K_о$) и необратимыми ($K_н$) процессами. То есть имеет как минимум две составляющие $K = K_о + K_н$.

В случае поглощения зёрнами озона способность поглощать теряется. Очевидно, это величина будет зависеть от дозы озона, которая уже принята при обработке. То есть в некоторых предельных условиях K будет равно нулю. Однако, с течением времени обратимые процессы снова восстанавливают константу поглощения до значения $K_о$. Текущее (остаточное) значение возможного количества поглощения озона семенами обозначим $K_{ост} = K - \Delta K$

Если на данном этапе рассмотрения задачи пренебречь химическими процессами, то константа поглощения фактически представляет собой среднюю концентрацию озона на единицу объёма зерна. Считать её постоянной можно только относительно, так как она зависит от внешней концентрации озона. Возможно, именно этот факт и препятствует ее достоверному определению опытным путем. Кроме того, озон внутри семян может разлагаться со временем и таким образом освобождать место для поглощения новой порции озона.

Фактически и есть максимальная концентрация озона, приходящаяся на весь объем зерна.

$$KV = C_{порmax} V_{пор}. \quad (27)$$

Таким образом, получаем некоторую связь с максимальной концентрацией в порах $C_{порmax}$

$$K = C_{порmax} \frac{V_{пор}}{V}, \quad (28)$$

где $C_{порmax}$ – максимальная концентрация в порах, мг/м^3.

Учитывая, что максимальная концентрация в порах зависит от концентрации озоновоздушной смеси вне зерна

$$K = C \frac{V_{пор}}{V}. \quad (29)$$

Введём понятие коэффициента пористости зерна. Данный коэффициент является аналогом скважистости, однако, скважистость характеризует пустоты между зернами, а коэффициент пористости учитывает наличие пор в зернах. Тогда, коэффициент пористости зернового материала может быть описан в следующем выражении:

$$k_{пор} = \frac{V_{пор}}{V_{зм}}. \quad (30)$$

Следовательно, объём, который должен быть заполнен в зерне при обработке озоном:

$$V_{пор} = k_{пор} V_{зм}. \quad (31)$$

Тогда с учетом изменения во времени

$$K(t) = C(t) \frac{V_{пор}}{V} = C(t) \frac{k_{пор} V_{зм}}{V} = C(t) \frac{k_{пор} k_{скв} V}{V} = k_{пор} k_{скв} C(t). \quad (32)$$

Фактически объёмная скорость заполнения пор является скоростью изменения остаточного значения константы поглощения:

$$K_{ост} = K - dK, \quad (33)$$

$$\frac{dK}{dt} = -v_{V_д} = -4k_f k_{скв} K_D \frac{C\left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{ср}}{4}\right)^2}{4K_D t}}\right)}{d_{ср}}, \quad (34)$$

Скорость при полном заполнении пор в семенах не будет равна нулю, так как присутствует процесс разложения озона. Допустим, известна скорость разложения озона $v_{ор}$, измеряемая в миллиграммах в секунду мг/с. Тогда зависимость (34) примет вид:

$$\frac{dK}{dt} = -v_{V_д} + v_{op} = -4k_f k_{скв} K_D \frac{C\left(1 - e^{-\frac{\left(\frac{d_{ср}}{4}\right)^2}{4K_D t}}\right)}{d_{ср}} + v_{ор}. \quad (35)$$

Очевидно, скорость разложения также будет зависеть от концентрации озона в порах зернового материала и с течением времени стремиться к 0. Это обычно описывают экспоненциальным законом, который запишем в виде

$$v_{ор} = C_{пор}(t)\left(1 - e^{-K_{ор} dt}\right) \quad (36)$$

или

$$v_{ор} = 4k_f k_{скв} K_D \frac{Ce^{-\frac{\left(\frac{d_{ср}}{4}\right)^2}{4K_D t}}}{d_{ср}}\left(1 - e^{-K_{ор} t}\right), \quad (37)$$

где $K_{ор}$ – константа разложения озона.

После преобразования уравнение будет иметь вид:

$$\frac{dK}{dt} = -4k_f k_{скв} K_D \frac{Ce^{-K_{ор} t} e^{-\frac{d_{ср}^2}{4K_D t}}\left(e^{K_{ор} t} e^{\frac{d_{ср}^2}{4K_D t}} - 2e^{K_{ор} t} + 1\right)}{d_{ср}}. \quad (38)$$

Так как диффузия прекращается, когда $\frac{dK}{dt} = 0$, то

$$\frac{dK}{dt} = -4k_f k_{скв} K_D \frac{Ce^{-K_{ор} t} e^{-\frac{d_{ср}^2}{4K_D t}}\left(e^{K_{ор} t} e^{\frac{d_{ср}^2}{4K_D t}} - 2e^{K_{ор} t} + 1\right)}{d_{ср}} = 0 \quad (39)$$

или

$$e^{K_{ор} t} e^{\frac{d_{ср}^2}{4K_D t}} - 2e^{K_{ор} t} + 1 = 0. \quad (40)$$

Отсюда после преобразований получаем следующее решение для коэффициента диффузии:

$$K_D = -\frac{d_{ср}^2}{4t \ln\left(2 - e^{-K_{ор} t}\right)}. \quad (41)$$

Результаты и их обсуждение. Коэффициент диффузии может быть получен экспериментальным путем. Для этого должен быть известен коэффициент разложения озона.

Эксперимент может заключаться в том, что при известных параметрах зерновой массы ёмкость заполняется озоновоздушной смесью определённой концентрации. Через некоторое время, после того как скорость изменения концентрации становится постоянной, по полученной концентрации и известному времени возможно определить K_D .

Данный эксперимент провести достаточно сложно. Необходимо иметь точные датчики с достаточно высокой чувствительностью и скоростью обработки данных. Кроме того, необходимо знать константу разложения.

Если исходить из введённого понятия скорости разложения, то константу разложения с размерностью $с^{-1}$, можно определить в некотором конечном объеме по уравнениям в дифференциальной форме

$$v_{\text{ор}} = \frac{dC}{dt} = -C(t)\left(1 - e^{-K_{\text{ор}}t}\right) \tag{42}$$

или при переходе к конечным величинам

$$v_{\text{ор}} = \frac{\Delta C}{\Delta t} = -C_{\text{ср}}\left(1 - e^{-K_{\text{ор}}t}\right), \tag{43}$$

где $C_{ср}$ – среднее значение концентрации за время *t*.

Тогда

$$\Delta C = -C_{\text{ср}}\Delta t\left(1 - e^{-K_{\text{ор}}t}\right). \tag{44}$$

Отсюда

$$K_{\text{ор}} = -\frac{\ln\left(1 + \dfrac{\Delta C}{C_{\text{ср}}\Delta t}\right)}{t}. \tag{45}$$

Данная зависимость позволяет рассмотреть определение константы разложения на основе эксперимента, который может заключаться в следующем. Некоторый сосуд заполняется озоном. Концентрация озона в сосуде контролируется датчиком. Засекается время и изменение концентрации озона в озоновоздушной смеси в сосуде. Необходимо знать начальные и конечные значения концентрации и её изменение за время *t*.

Заключение. Проведенный анализ работ, предлагающих аналитическое описание процесса поглощения озона зерном, показал, что известные исследования недостаточно точно описывают данный процесс. В результате проведенных аналитических исследований на основе законов диффузии и с учетом особенностей геометрии зерновой массы получены зависимости, характеризующие процесс озонирования с учетом разложения озона.

Введены коэффициенты пористости, формы и скважистости, которые характеризуют особенности зерновой массы и могут быть получены экспериментальным путем. Особенностью полученных зависимостей для коэффициента диффузии и коэффициента разложения озона является возможность их применения для экспериментального определения значений коэффициентов.

Список источников

1. Смирнов А.А. Электротехнологическая озонаторная установка для обеззараживания кормовых смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. – М., 2014. – 23 с.

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. Рубин А.Б. Теоретическая биофизика: учебник. – М.: Медицина, 1983. – 272 с.

4. Волошин Е.В. Зерноведение с основами растениеводства: учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 97 с.

5. Langmuir I., Schaefer V.J. The Effect of Dissolved Salts on Insoluble Monolayers // Journal of the American Chemical Society. – 1937. – Vol. 59 (11). – Pp. 2400-2414. DOI:10.1021/ja01290a091.

6. Лобанов М.Л., Зорина М.А. Методы определения коэффициентов диффузии: учебное пособие. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. – 100 с.

7. Atkins P.W., Julio de Paula. Physical Chemistry for the Life Sciences. – 2006. – New York. – 642 p.

8. Conlisk A.T. Essentials of Micro- and Nanofluidics: With Applications to the Biological and Chemical Sciences. – 2013. – New York: Cambridge University Press. – 572 p.

9. Пожидаев И.А., Баскаков И.В., Оробинский В.И. Озоновоздушная смесь как средство дезинсекции зерна // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 25 февраля 2022 г.). – Ч.I. – Воронеж: Воронежский ГАУ, 2022. – С. 255-263.

10. Steponavičienė A., Steponavičius D., Raila A., Kemzūraitė A. Modelling the ozone penetration in a grain layer // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. – 2012. – Vol. 20(4). Pp. 292-300. DOI: 10.3846/16486897.2011.645826 .

11. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Ozone pest control of grain // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on Advanced Agriculture for Sustainable Future (Uzbekistan, Tashkent, 23-25 February, 2022). – IOP Publishing Ltd, 2023. – Vol. 1138. – №012026. – 5 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012026.

References

1. Smirnov A.A. Electrotechnological ozonation plant for disinfection of feed mixtures: abstract. dis. ... candidate of technical Sciences: 05.20.02. – M., 2014. – 23 p.

2. Normov D.A., Pozhidaev D.V., Volkov R.V., Chizhov D.S., Timofeev V.P. Investigation of the effect of electrozoning on seed germination // Polythematic online electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. – 2015. – Vol. 112. – Pp.1438-1451.

3. Rubin A.B. Theoretical biophysics: textbook. – M.: Medicine, 1983. – 272 p.

4. Voloshin E.V. Grain science with the basics of crop production: a study guide. – Orenburg: OSU, 2019. – 97 p.

5. Langmuir I., Schaefer V.J. (1937). The Effect of Dissolved Salts on Insoluble Monolayers // Journal of the American Chemical Society. – 1937. – Vol. 59 (11). Pp. 2400-2414. DOI:10.1021/ja01290a091.

6. Lobanov M.L., Zorina M.A. Methods for determining diffusion coefficients: a study guide. – Yekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 2017. – 100 p.

7. Atkins P.W., Julio de Paula. Physical Chemistry for the Life Sciences. – 2006. – New York. – 642 p.

8. Conlisk A.T. Essentials of Micro- and Nanofluidics: With Applications to the Biological and Chemical Sciences. – 2013. – New York: Cambridge University Press. – 572 p.

9. Pozhidaev I.A., Baskakov I.V., Orobinsky V.I. Ozone-air mixture as a means of grain disinfection // Trends in the development of technical means and technologies in agriculture: materials of the International Scientific and practical conference (Voronezh, February 25, 2022). – Part I. – Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022. – Pp. 255-263.

10. Steponavičienė A., Steponavičius D., Raila A., Kemzūraitė A. (). Modelling the ozone penetration in a grain layer // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. – 2012. – Vol. 20(4). Pp. 292-300. DOI: 10.3846/16486897.2011.645826 .

11. Baskakov I.V., Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Gulevsky V.A., Chernyshov A.V. Ozone pest control of grain // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference on

Advanced Agriculture for Sustainable Future (Uzbekistan, Tashkent, 23-25 February, 2022). – IOP Publishing Ltd, 2023. – Vol. 1138. – №012026. – 5 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1138/1/012026.

Информация об авторах

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

Information about the authors

I. Pozhidaev – Leading Engineer; A. Golovin – Leading Engineer; I. Baskakov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor; V. Orobinsky – 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): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 22.02.2024

УДК 636.084:636.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-102-109

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ КОРМЛЕНИЯ ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ КОРОВ

Владимир Иванович Доровских [1], ***Геннадий Михайлович Шулаев*** [2],
Ринат Келимулович Милушев [3], ***Вадим Сергеевич Жариков*** [4]
[1,2,3,4] *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация*
[1]dorovskih50@mail.ru, [2]tniij@yandex.ru, [3]july55@yandex.ru,

Автор, ответственный за переписку: Владимир Иванович Доворских, dorovskih50@mail.ru
Corresponding author: Vladimir Dorovskikh, dorovskih50@mail.ru

Реферат. *С целью повышения эффективности функционирования биотехнической системы в молочном скотоводстве разработаны алгоритмы управления качеством кормления животных. Предложены базовые структуры рационов, в составе которых использованы корма высокого качества для коров с живой массой 600 кг и суточным удоем 20 и 30 кг. В них использованы корма высокого качества. Для этого наиболее предпочтительны сенаж и сено из люцерны 1 класса, кукурузный силос 1 класса, а также высококачественные «адресные» комбикорма, сухой жом и свекловичная патока. Это обеспечивает потребности животных в нормативных элементах питания, сокращает затраты концентрированных кормов на 1,5-2,0 кг в сутки на голову. Такой подход соответствует физиологии рубцового пищеварения. Он дает возможность получить годовой экономический эффект на корову в пределах 13,6-18,2 тыс. руб. Установлена эффективность кормовой добавки гепатопртекторного действия. Она создана на основе зерна расторопши, пробиотика «профорт», бетаина и витамина Е. Использование ее в рационе высокопродуктивных сухостойных коров в количестве 0,4 кг в сутки на голову повысило молочную продуктивность на 4,3%. Применение добавки дало возможность сократить на 2,4 часа время отделения последа. У животных, получавших с кормом добавку, улучшилась воспроизводительная способность: они осеменены после отела через 44 дня. Коровы из контрольной группы были осеменены только через 79 дней, или на 35 дней позднее.*

Ключевые слова: *алгоритм, управление, рацион, корма, кормовая добавка, семена расторопши.*

ALGORITHM FOR MANAGING THE QUALITY OF FEEDING FOR HIGH-YIELDING COWS

Vladimir Dorovskikh [1], ***Gennady Shulaev*** [2], ***Rinat Milushev*** [3], ***Vadim Zharikov*** [4]
[1,2,3,4]*All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov, Russia*
[1]dorovskih50@mail.ru, [2]tniij@yandex.ru, [3]july55@yandex.ru

Abstract. *In order to increase the efficiency of the biological link of biomachinery systems used in dairy cattle breeding, an algorithm for managing the quality of animal feeding is developed. The optimal structures of typical rations intended for feeding animals used in modern biomachinery systems are proposed. They use high quality forages for cows with a live weight of 600 kg and daily milk yield of 20 and 30 kg. For this purpose the most preferable are haylage and hay from alfalfa of 1 class, corn silage of 1 class, as well as high quality "address" mixed fodder, dry cake and beet molasses. An experimental sample of feed additive of the following composition, in % by weight: thistle seed - 92,76; probiotic "profort" - 6,00; betaine hydrochloride (97%) - 1,20; vitamin E (50%) - 0,04 (the activity of the preparation is indicated in brackets). The use of this feed additive in the diet of highly productive dry cows in the amount of 0.4 kg per day per head increases the milk productivity of animals by 4.3%. The*

use of this feed additive contributed to the reduction of time for separation of the afterbirth in comparison with control animals by 2.4 hours. Animals from the group that received the feed additive were characterised by better reproductive ability. After 44 days they were inseminated after calving, while the control group were inseminated after 79 days, or 35 days later.

Keywords: *algorithm, management, ration, feed, feed additive, milk thistle seeds.*

Для цитирования: Доровских В.И., Шулаев Г.М., Милушев Р.К., Жариков В.С. Алгоритм управления качеством кормления высокопродуктивных коров // Наука в центральной России. 2024. Т. 67, № 1. С. 102-109. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-102-109.

For citation: Dorovskikh V., Shulaev G., Milushev R., Zharikov V. Algorithm for managing the quality of feeding for high-yielding cows. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 102-109. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-102-109.

Введение. Для реализации Программы продовольственной безопасности и решения проблемы производства молока в стране взят курс на расширение использования молочных пород скота. В результате продуктивность дойного стада возросла и составила во многих предприятиях более 7,0 тыс. кг молока. Однако при этом наблюдается негативная тенденция - сокращение сроков хозяйственного использования высокопродуктивных коров, большое количество их выбывает из стада на 2-3 периоде лактации, что экономически ущербно для предприятий.

Основная причина преждевременной выбраковки коров – несбалансированное кормление и высококонцентратный тип кормления, который не отвечает физиологии пищеварения жвачных животных с многокамерным желудком, закисляет рубец, вызывает массу заболеваний (ацидоз, кетоз, гепатоз, мастит, болезни конечностей и нарушение воспроизводительной функции) [1, 2, 3].

Современные научные знания о процессах рубцового пищеварения, детализированные нормы потребности в питательных веществах обеспечивают высокоэффективное кормлению жвачных животных. Нормальное функционирование рубца у высокопродуктивных коров дает организму 80% энергии - за счёт синтеза летучих жирных кислот, из них 2/3 – в результате расщепления клетчатки, и 60-80 % протеина (за счёт выработки микробного белка) [4, 5].

Процессы пищеварения в рубце происходят за счёт жизнедеятельности микроорганизмов, при этом наибольшее значение имеют целлюлозолитические бактерии. Их интенсивное развитие происходит при наличии в рационе достаточного количества клетчатки и углеводов при значении pH от 6,2 до 6,8 [5].

Поэтому обеспечение высокой продуктивности коров в биотехнической системе должно основываться на алгоритмах регулирования микробиоты рубцового пищеварения методами кормления: оптимизации структуры рационов, балансированию их не менее чем по 27 элементам питания, качества заготавливаемых кормов, использования функциональных кормовых добавок нового поколения.

Цель исследований – повышение эффективности функционирования биотехнических систем, используемых в молочном скотоводстве, за счет разработки алгоритма управления качеством кормления животных.

Материалы и методы. В основу методологии этой работы положены результаты современных исследований по технологии кормления крупного рогатого скота молочного направления продуктивности [1, 6, 7].

Разработка научно-обоснованной усовершенствованной системы кормления для высокопродуктивных коров проводилась на основе детализированных норм кормления животных по 27 важнейшим элементам питания [4, 7].

Структура рациона, которая может обеспечивать высокий статус здоровья и полную реализацию потенциала продуктивности животных, разрабатывалась с использованием кормов, широко применяющихся в Центрально – Черноземном регионе России.

В работе использовались экспериментальный, аналитический и расчетно-конструктивный методы исследований. Первичные данные обрабатывались методами биометрии [8].

Результаты и их обсуждение. Одним из основных критериев эффективности молочного скотоводства в современных условиях является срок хозяйственного использования коров [9, 10].

Однако с ростом молочной продуктивности происходит его снижение. В основу решения этой проблемы должна быть положена система, основывающаяся на точной оценке состояния поголовья животных и кормовой базы хозяйства. Затем, на основании этих данных выстраивается максимально эффективный алгоритм управления этой системой. Она должна охватывать весь цикл технологических процессов от производства и подготовки кормов, определения их качества, составления рационов, до мониторинга основных показателей здоровья животных, которые удовлетворяют физиологические и функциональные потребности коров и поддерживают их продуктивность на высоком уровне [7, 9, 10].

В современной научной литературе есть примеры новых подходов к кормлению современного высокопродуктивного молочного скота [2, 7, 11-14]. С учетом этих фактов нами были разработаны оптимальные структуры типовых рационов, предназначенных для кормления животных, используемых в современных биотехнических системах.

В примерных рационах использованы наиболее перспективные корма высокого качества для коров с живой массой 600 кг и суточным удоем 20 и 30 кг. Для этого наиболее предпочтительными будут следующие корма: сенаж и сено из люцерны 1 класса, кукурузный силос 1 класса, сухой жом и свекловичная патока, а также высококачественные «адресные» комбикорма, которые используются для балансирования рациона по протеину, легкопереваримым углеводам, макро и микроэлементам, биологически активным веществам (таблица 1).

Таблица 1 - Структура рационов коров - живая масса 600 кг, удой 20 и 30 кг

Состав компонетов и структура рацина	Ед. изм	Корма 1 класса		Корма 3 класса	
		Удой 20 кг	Удой 30 кг	Удой 20 кг	Удой 30 кг
Сено люцерновое	кг	3	4	4	4
Сенаж люцерновый	кг	24	25	25	25
Силос кукурузный	кг	18	18	14	20
Комбикорм	кг	2,5	4	4	6
Жом сухой	кг	1	3	1	1
Мелясса	кг	1	1	1	1,5
В структуре рациона по питательности, в %:					
грубые и сочные корма		75,6	63,5	65,4	59,2
концентрированные корма		24,4	36,5	34,6	40,8

Определено, что использование в рационах кормов 1 класса качества обеспечивает потребности животных в требуемых по современным нормам элементах питания. Такой прием сокращает затраты концентрированных кормов на 1,5 – 2,0 кг в сутки на голову, что обеспечивает годовой экономический эффект на корову в пределах 13,6 – 18,2 тыс. рублей.

Использование в рационе кормов 3 класса снижет в нем содержание питательных веществ по следующему алгоритму, в %: обменной энергии на 25,0; сырого протеина – 27,0; сырого жира - 13,0; крахмала – 16,0; сахара – 20,0 и каротина -19,2. Поэтому оптимальная структура рациона для высокопродуктивных коров должна формироваться только из кормов 1 класса качества.

Недостаток сахара в рационе можно восполнять за счет использования свекловичной патоки. Высокопродуктивные коровы в фазе раздоя и разгара лактации (первые 2-3 месяца после отела) остро нуждаются в концентрированных кормах. Высоко концентратный тип кормления жвачных животных нецелесообразен. Тем не менее, одни объемистые корма даже высокого качества не могут обеспечить животных адекватным их потребностям количеством энергии и питательных веществ. Из-за этого в этот период у коров, в связи с выработкой молока, наблюдаются большие потери живой массы.

Для высокопродуктивных коров, с удоем 20 кг и выше необходимо вводить в рацион концентраты в количестве 24,4 - 40,8%. При этом такие корма следует скармливать в виде

«адресных» комбикормов - концентратов. Рецепты таких комбикормов должны разрабатываться на основе учета фактического химического состава их компонентов, а также структуры рациона. Баланс показателей протеиновой составляющей, минеральных веществ и витаминов обеспечивается либо посредством ввода в рецепты комбикормов белково-минерально-витаминных концентратов и добавок**,** либо современных премиксов, состав которых необходимо разрабатывать с учетом региональных особенностей [6, 11, 15, 16, 17].

В алгоритм кормления коров можно включать использование рационов, в которых содержатся функциональные добавки, обеспечивающие продуктивность животных, а также оптимальный состав молока, специфический набор питательных элементов в нем, которые необходимы и полезны в питании людей [18-20]. Теоретической основой такого предложения является положение о том, что, используя инжиниринг рационов кормления животных можно управлять их продуктивными качествами. Такой прием позволяет также повышать содержание в продукции полезных веществ и обогащать ее биологически активными компонентами [21]. Его преимущество по сравнению с технологическим обогащением пищевых продуктов очевидно, так как добавляемые в корм биологически активные вещества в организме животного через обмен веществ трансформируются, превращаясь в натуральные [18, 22].

Анализ современной научной литературы, а также опыт практиков показывают, что расторопша и продукты ее переработки могут хорошо сочетаться с рядом биологически активных веществ как природного, так и искусственного происхождения. Может быть эффективным сочетание зерна расторопши с пробиотиками, витамином Е и донором метильных групп и гепатопротектором — бетаином [19, 20, 21]. Поэтому, в рамках алгоритма управления кормлением коров, был разработан рецепт новой кормовой добавки. Получены результаты ее влияния на профилактику гепатоза и продуктивность сухостойных коров. Ее применение в течении 58 дней положительно сказалось на их продуктивности. После отела качество приплода в этой группе было выше, а именно живая масса новорожденных телят превосходила таковой показатель контрольных животных на 5,0 % (38,0 кг против 36,2), а среднесуточные приросты у них в дальнейшем были выше на 3,86 % (619 г против 596). Коровы, получавшие добавку, легче телились и быстрее восстанавливались к норме. Об этом свидетельствовало сокращение времени на отделение последа, по сравнению с контрольными коровами на 2,4 часа. Функция воспроизводства коров из опытной группы характеризовалась лучшими показателями: они были осеменены через 44 дня, а из контрольной — только через 79 дней, на 35 дней позднее. Контрольным доением установлено повышение удоя животных (24 кг молока в опыте против 23 кг в контроле).

Современный подход к управлению кормлением жвачных животных основан на детализированных нормах потребности в питательных веществах и результатах научных исследований процессов функционирования рубца и его микробиома. Отечественной наукой установлены оптимальные показатели микробиома рубца здоровых коров [5, 6, 11]. В его составе, в %: целлюлозолитики – 20; в том числе лахноспиры, руминококки, эубактерии, клостридии, термоанаэробные бактерии – 9,5; лактатферментирующие бактерии – 3; бациллы – 7; бифидобактерии – 0,5; лактобактерии – 2; энтеробактерии – 10; патогенные микроорганизмы (стафилококки, камилобактерии, микоплазмы, фузобактерии, пентококки) – 10. Реализация вышеизложенных положений позволит обеспечить нормальное функционирование микробиома рубца коровы, который удовлетворяет все ее потребности в основных питательных веществах. Контроль и управление качеством кормления целесообразно проводить по следующему алгоритму (рисунок 1).

Система управления качеством кормления коров функционирует следующим образом. На основе бонитировки скота определяются характеристики стада, проводится зоотехнический анализ кормов, данные заносятся в базу данных системы.

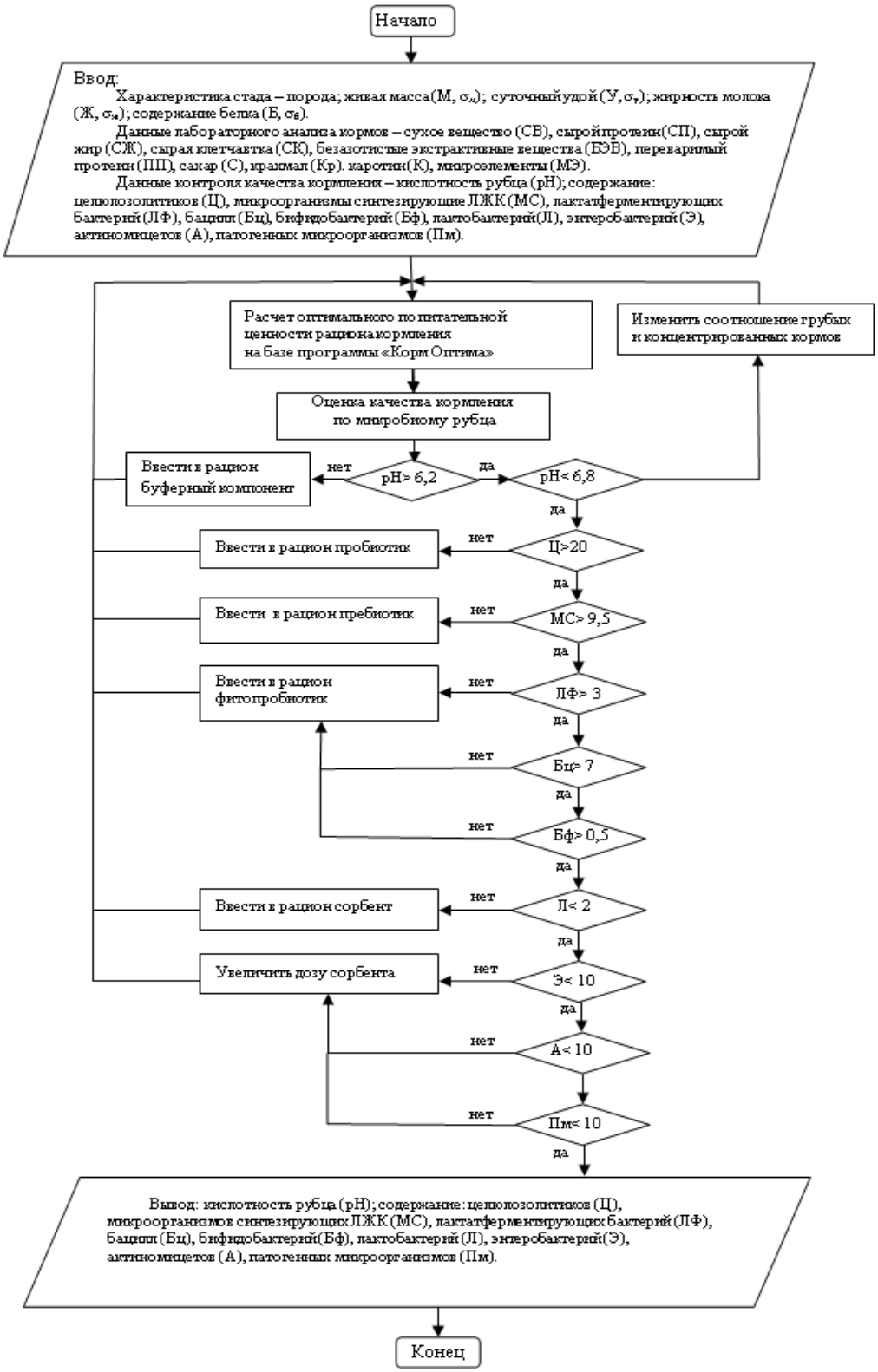


Рисунок 1 - Алгоритм управления качеством кормления коров

Заключение. Установлено, что наиболее перспективным для природно-климатической зоны ЦЧЗ является сено - сенажно – силосно - концентратный тип рациона как биологически самый полноценный, экономически выгодный, обеспечивающий наибольшую молочную продуктивность и длительность хозяйственного использования коров при наименьших затратах.

Исследования показали, что использование в рационах кормов 1 класса качества обеспечивает в большей степени потребности животных в нормативных элементах питания. Это сокращает расход концентрированных кормов на 1,5 – 2,0 кг в сутки на голову, что обеспечивает годовой экономический эффект на корову в пределах 13,6 – 18,2 тыс. рублей. Оптимальное количество концентратов в рационах высокопродуктивных коров должно составлять 24,4 - 40,8%. Скармливать концентрированные корма необходимо только как полноценные «адресные» комбикорма.

Управление качеством кормления животных следует осуществлять на основе разработанного алгоритма, включающего: характеристики стада, данные лабораторного анализа кормов, показатели микробиома рубцовой жидкости, оптимизацию рациона кормления с помощью программы «Корм Оптима», корректировку рациона на основе анализа состояния микробиома рубца.

Список источников

1. Буряков Н.П., Бурякова М.А. Рациональное кормление молочного скота. – М.: РГАУ - МСХА, 2015. – 314 с.

2. Сысуев В.А., Василенко Т.Ф., Русаков Р.В. Проблемы развития молочного животноводства в России и современные подходы к их решению // Достижения науки и техники АПК. - 2017. - Т. 31. - № 3. – С. 20 – 24.

3. Алексеев А.А., Лукичев Д.Л., Лукичев В.Л. Ключевые элементы эффективной системы производства молока // АгроЗооТехника. - 2018. - № 2 (2). - С. 1 – 12.

4. Нормы потребностей молочного скота и свиней в питательных веществах: Монография / Под ред. Р.В. Некрасова, А.В. Головина, Е.А. – Москва, 2018. – 290 с.

5. Лаптев Г., Ильина Л., Солдатова В. Микробиом рубца жвачных: современные представления // Животноводство. – 2018. - №10. – С. 38 – 41.

6. Рекомендации по детализированному кормлению молочного скота / А.В. Головин, А.С. Аникин, Н.Г. Первов и др. – Дубровицы. – 2016. – С.66 – 68**.**

7. Иванов А. Кормоинжиниринг: управляем кормлением комплексно // Животноводство России. – 2019. - №4. – С. 55 – 57.

8. Плохинский Н. А. Руководство по биометрии для зоотехников. – М.: Колос, 1969. – 256 с.

9. Суровцев В., Никулина Ю. Продуктивное долголетие коров: помогут инновации // Животноводство России. – 2017. – Тематический выпуск. – С. 21 – 22.

10. Казанцева Е.С. Продуктивное долголетие коров черно-пестрой породы // Молочнохозяйственный вестник. – 2018. - №2 (30), II кв. – С. 36 – 43.

11. Влияние разработанного рациона на качественный и количественный состав микрофлоры рубца / А. И. Саханчук, Е. Г. Кот, М. Г. Каллаур, Т. А. Буракевич, Ж. В. Романович // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. – 2020. - № 23-1. - С. 145 - 153.

12. Муратов Н.С., Танифа В.В., Муратов В.И. Усовершенствованная система кормления коров ярославской породы – основной фактор в реализации генетического потенциала молочной продуктивности // Вестник АПК Верхневолжья. – 2013. - №1(21). – С. 88 – 92.

13. Любин Н.А., Дежаткина С.В., Ахметова В.В. Разработка и внедрение нетрадиционных БАД на основе натуральных компонентов в животноводство. — Ульяновск, 2017. — 336 с.

14. Совершенствование системы кормопроизводства и кормления высокопродуктивных молочных коров / Г.А.Вяйзенен, М.Ю.Копейкин, Э.Н.Бабаев, Я.С.Ковальчук // Вестник Новгородского государственного университета. – 2014. - №76. – С. 25 – 27.

15. Романенко Л.В., Волгин В.И., Федорова З.Л. Стратегия питания высокопродуктивных голштинизированных коров черно-пестрой породы // Молочное и мясное скотоводство. - 2014. - № 6. - С. 34 - 36.

16. Аристов А.В., Есаулова Л.А., Ионов В.В. Система кормления, повышающая биоресурсный потенциал коров на животноводческих комплексах ООО «Эконивагро» в условиях Воронежской области // Вестник РГАТУ. – 2019. - № 4 (44). – С. 5 – 12.

17. Алексеев А.А., Лукичев Д.Л., Лукичев В.Л. Ключевые элементы эффективной системы производства молока // АгроЗооТехника. - 2018. - № 2 (2). - С. 1 – 12.

18. Комплексный препарат силимарина увеличивает удой, содержание жира и белка в молоке коров в период раздоя / Д.Ю. Григорьев, Е.А. Жмаев, А.А. Лебедев, Д.А. Пирогов // Молочное и мясное скотоводство. - 2019. - №6. – С. 47 – 50

19. Шемуранова Н. А., Гарифуллина Н. А. Растения как основа для создания экологически безопасных высокофункциональных биодобавок для животных // Аграрная наука Евро – Северо - Востока. - 2020. - №21(5. – С. 483 - 502.

20. Калугина Л. Расторопша в Коелге: сезон третий // Комбикорма. - 2019.- № 6.- С.6 - 8.

21. Сурай П.Ф., Фисинин В.И., Кочиш И.И. Концепция витагенов в молочном и мясном скотоводстве // Молочное и мясное скотоводство. — 2020. — № 5. — С. 11–17.

22. Горлов, И.Ф. Инновационные технологии управления живыми системами в производстве высококачественной экологически безопасной продукции животноводства // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2014. - №3, (35). - С.1-12.

References

1. Buryakov N.P., Buryakova M.A. Rational feeding of dairy cattle . - M.: RGAU - MSHA, 2015. - 314 c.

2. Sysuev V.A., Vasilenko T.F., Rusakov R.V. Problems of development of dairy cattle breeding in Russia and modern approaches to their solution // Achievements of science and technology APK. - 2017. - T. 31. - № 3. - C. 20 - 24.

3. Alekseev A.A., Lukichev D.L., Lukichev V.L. Key elements of an effective milk production system // AgroZooTekhnika. - 2018. - № 2 (2). - C. 1 - 12.

4. Norms of needs of dairy cattle and pigs in nutrients: Monograph / Edited by R.V. Nekrasov, A.V. Golovin, E.A. - Moscow, 2018. - 290 c.

5. Laptev G., Ilyina L., Soldatova V. Ruminant rumen microbiome: co-modern views // Livestock. - 2018. - №10. - C. 38 - 41.

6. Recommendations on detailed feeding of dairy cattle / A.V. Golovin, A.S. Anikin, N.G. Pervov et al. - Dubrovitsy. - 2016. - C.66 - 68.

7. Ivanov A. Kormoengineering: we manage feeding comprehensively // Livestock of Russia. - 2019. - №4. - C. 55 - 57.

8. Plokhinsky N. A. Manual on biometrics for zootechnicians. - Moscow: Kolos, 1969. - 256 c.

9. Surovtsev V., Nikulina Y. Productive longevity of cows: innovations will help // Livestock of Russia. - 2017. - Thematic issue. - C. 21 - 22.

10. Kazantseva E.S. Productive longevity of black-and-breed cows // Molochnokhozyaystvennyi vestnik. - 2018. - No. 2 (30), II quarter. - P. 36 - 43.

11. Influence of the developed ration on the qualitative and quantitative composition of rumen microflora / A. I. Sakhanchuk, E. G. Kot, M. G. Kallaur, T. A. Burakevich, J. V. Romanovich // Actual problems of intensive development of animal breeding. - 2020. - № 23-1. - C. 145 - 153.

12. Muratov N.S., Tanifa V.V., Muratov V.I. Improved feeding system for cows of Yaroslavl breed - the main factor in the realisation of the genetic potential of dairy productivity // Vestnik AIC Verkhnevolzhye. - 2013. - №1(21). - C. 88 - 92.

13. Lyubin N.A., Dezhatkina S.V., Akhmetova V.V.. Development and implementation of non-traditional BAD on the basis of natural components in animal husbandry . - Ulyanovsk, 2017. - 336 c.

14. Improvement of the system of fodder production and feeding of high-yielding dairy cows / G.A.Vyaizenen, M.Y.Kopeikin, E.N.Babaev, Y.S.Kovalchuk // Bulletin of Novgorod State University. - 2014. - №76. - C. 25 - 27.

15. Romanenko L.V., Volgin V.I., Fedorova Z.L. Nutrition strategy of high-yielding Holsteinised cows of the black-and-brown breed // Dairy and beef cattle breeding. - 2014. - № 6. - C. 34 - 36.

16. Aristov A.V., Esaulova L.A., Ionov V.V.. Feeding system, increasing the bioresource potential of cows at livestock complexes of LLC "Econivagro" in the conditions of Voronezh region // Vestnik RSATU. - 2019. - № 4 (44). - C. 5 - 12.

17. Alekseev A.A., Lukichev D.L., Lukichev V.L. Key elements of an effective system of milk production // AgroZooTekhnika. - 2018. - № 2 (2). - C. 1 – 12.

18. Complex preparation of silymarin increases milk yield, fat and protein content in the milk of cows during the milking period / D.Yu. Grigoriev, E.A. Zhmaev, A.A. Lebedev, D.A. Pirogov // Dairy and beef cattle breeding. - 2019. - №6. - C. 47 - 50

19. Shemuranova N. A., Garifullina N. A. Plants as a basis for co-creation of ecologically safe highly functional bioadditives for animals // Agrarnaya nauka Euro - North - East.- 2020. - №21(5. - C. 483 - 502.

20. Kalugina L. Thistle in Koelga: season three // Combikorma.- 2019.- № 6.- P. 6 - 8.

21. Surai P.F., Fisinin V.I., Kochish I.I. Concept of vitagens in dairy and beef cattle breeding // Dairy and beef cattle breeding. - 2020. - № 5. - C. 11-17.

22. Gorlov, I.F. Innovative technologies of living systems management in the production of high-quality environmentally safe livestock production // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agro-university complex. - 2014. - №3, (35). - C.1-12.

Информация об авторах

В.И. Доровских – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник; Г.М. Шулаев – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник; Р.К. Милушев – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник; В.С. Жариков – младший научный сотрудник.

Information about the authors

V. Dorovskih – Candidate of Technical Sciences, leading researcher; G. Shulaev – Candidate of Agricultural Sciences, leading researcher; R. Milushev – Doctor of Agricultural Sciences general researcher; V. Zharikov – 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): 12.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 23.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 631.356.46
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-110-117

РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ КАРТОФЕЛЯ

Парвиз Имранович Гаджиев [1], ***Гюльбике Гудретдиновна Рамазанова*** [2], ***Имран Парвизович Гаджиев*** [3]
[1,2,3] *РГУНХ Минсельхоза России (Университет Вернадского), г. Балашиха, Российская Федерация*
[1]pgadjiev@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6877-6126
[2]gulbike@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-2758-9479
[3]imgadjiev@mail.ru

Автор, ответственный за переписку: Рамазанова Гюльбике Гудретдиновна, gulbike@yandex.ru
Corresponding author: Ramazanova Gulbike, gulbike@yandex.ru

Реферат. *Значительная доля картофеля возделывается в тяжелых почвенно-климатических условиях, что негативно сказывается на качестве убираемого картофеля из-за последствий соприкосновения клубней с почвенными комками. С целью повышения эффективности возделывания картофеля для стабилизации накопления органического вещества, разуплотнение почвы и подпахотного горизонта предложена технология возделывания картофеля с чередующими грядками. Способ включает основную обработку почвы, предпосадочную обработку почвы с нарезанием гребней, посадку картофеля в гребни, междурядную обработку, поддержание влажности и плотности почвы, выкапывание клубней и маркировку рядов. Способ отличается тем, что при последующей посадке в следующем году* **почву обрабатывают так**, *чтобы дно гребней чередовалось с клубнем картофеля. Результаты исследований показали, что наибольшее влияние на разрушение почвенных комков оказывает их влажность и скорость соударения комков с битерным барабаном. Показано, что разрушение до 80% почвенных комков происходит при падении с высоты 1 - 1,5 м и разрушающиеся сила глины влажностью 17 - 22% при статическом сжатии составляет 0,1-0,2 кН. В конечном итоге технология возделывания картофеля с чередующими гребнями помогает в борьбе с сорняками и минимизирует поражаемость болезнями и вредителями.*

Ключевые слова: *почва, клубень картофеля, технология возделывания картофеля, чередующиеся гребни, разуплотнение почвы.*

DEVELOPMENT OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY AND TECHNICAL MEANS FOR POTATO CULTIVATION

Parviz Hadzhiev [1], ***Gulbike Ramazanova*** [2], ***Imran Hadzhiev*** [3]
[1,2,3] *Vernadsky University RSUNE of The Ministry of Agriculture of Russia, Balashikha, Russia*
[1]pgadjiev@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6877-6126
[2]gulbike@yandex.ru,https://orcid.org/0000-0003-2758-9479
[3]imgadjiev@mail.ru

Abstract. *A significant proportion of potatoes are cultivated in difficult soil and climatic conditions, which negatively affects the quality of harvested potatoes due to the consequences of contact of tubers with soil lumps. The technology for cultivating potatoes with alternating beds is proposed to increase the efficiency of potato cultivation to stabilize the accumulation of organic matter, decompact the soil and the subsoil horizon. The method includes basic tillage, pre-planting tillage with cutting ridges, planting potatoes in ridges, inter-row cultivation, maintenance soil moisture and density, digging up tubers and marking rows. The method differs in that during subsequent planting next year, the soil is cultivated so*

that the bottom of the ridges alternates with potato tubers. The research results showed that the greatest influence on the destruction of soil lumps is their moisture content and the speed at which the lumps collide with the beater drum. It has been shown that destruction of up to 80% of soil lumps occurs when falling from a height of 1 - 1.5 m and the destructive force of clay with a moisture content of 17 - 22% under static compression is 0.1-0.2 kN. Ultimately, the technology of growing potatoes with alternating ridges helps control weeds and minimizes the incidence of diseases and pests.

Keywords: *soil, potato tuber, potato cultivation technology, alternating ridges, soil decompaction*.

Для цитирования: Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П. Разработка ресурсосберегающей технологии и технических средств для возделывания картофеля // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 110-117. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-110-117.

For citation: Gadzhiev P., Ramazanova G., Gadzhiev I. Development of resource-saving technology and technical means for potato cultivation. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 110-117. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-110-117.

Введение. Задачами интенсивной технологии возделывания картофеля, являются увеличить производство картофеля, улучшить его качество, на основе совершенствования, имеющихся технологий, значительно снизить затраты труда в картофелеводстве. Успешное решение этих сложных задач неразрывно связано с внедрением новых технологий и созданием принципиально новых машин, с целью улучшения рыхления почвы, а также исключения ее уплотнения и разрушения структурных агрегатов. В противном случае потребуется дополнительное рыхление в процессе роста и развития картофеля, что повышает затраты на себестоимость продукции [1-3].

Таким образом, в настоящее время особую актуальность приобретает вопрос удовлетворения агротехнических требований при возделывании картофеля, которая включает обработку почвы и уход за растениями весь вегетационный период. После подготовки почвы под посадку картофеля с применением специальных грядобразователей формируются гряды. К основным недостаткам таких технологий относятся излишнее уплотнение почвы ходовыми колесами трактора и рабочих агрегатов, что приводит к дополнительным затратам энергетических средств, для образования рыхлой почвы. Излишняя деформация почвы приводит к разрушению ее структуры, нарушению скважности почвы и отрицательному влиянию на рост урожайности культур [4].

Это приводит к тому, что разработка эффективных технологий и технических средств, для получения высококачественного урожая и снижения себестоимости возделывания картофеля является актуальной задачей и посей день.

Цель исследования – повышение эффективности возделывания картофеля путем разработки технологии чередования нарезанных гребней.

Материалы и методы. Технологии для производства картофеля зависят от его сортовых особенностей, потребительских и столовых качеств продовольственного картофеля и целевого использования собранного урожая. Требования, предъявляемые к получаемой продукции, такие как урожайность, форма и размеры клубней, сроки созревания, приспособленность к машинным технологиям и технике выращивания, и механизированной уборке картофеля в этой части играет существенную роль.

Для осуществления задач вытекающих от поставленной цели, необходимо обратить внимание к разработке постиндустриальных методов, отличающихся высокотехнологичными изменениями операций подготовки почвы и посадки клубней картофеля. Для решения данной проблемы с применением ресурсосберегающей технологии и учитывая, что площади под картофель сократились нами предложена технология возделывания картофеля с чередующими грядками (рисунок 1) [5].

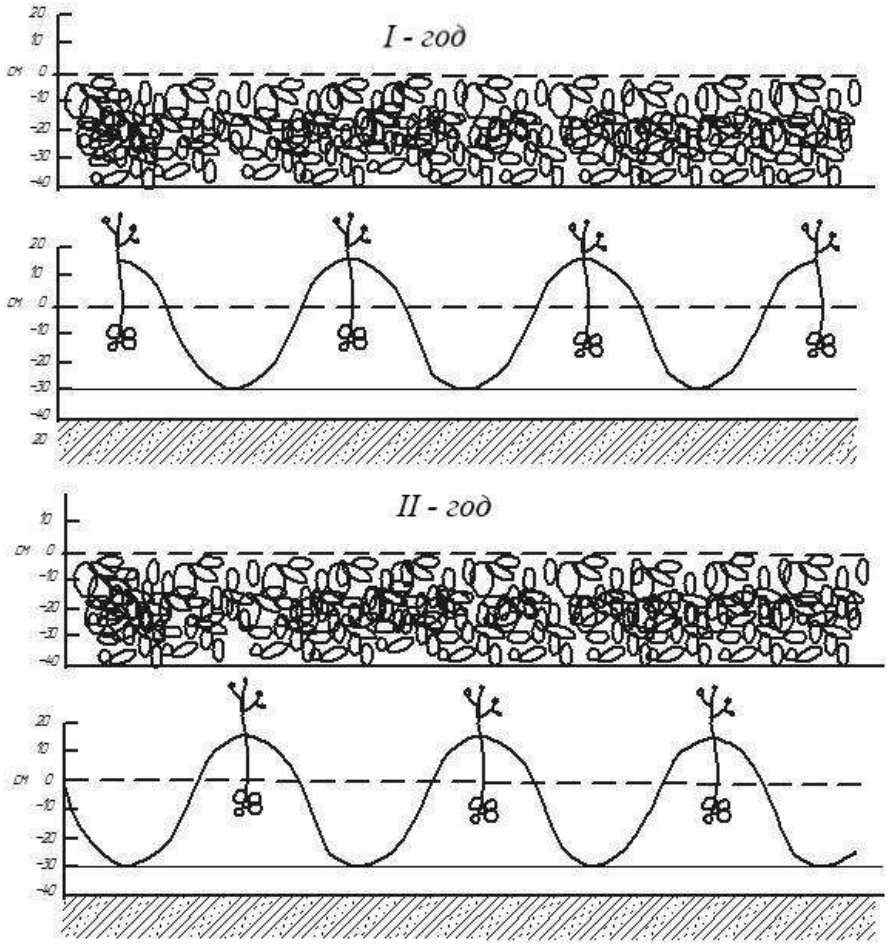


Рисунок 1 – Схема возделывания картофеля с чередующими гребнями

Предложенная технология выполняется в следующей последовательности: проводится основная обработка и предпосадочной подготовка почвы с нарезанием грядок и формированием гребней для посадки картофеля. В период созревания картофеля проводится междурядная обработка, выкапывание клубней и маркировка рядов.

Соблюдение правильного чередования нарезанных гребней на том же поле для стабилизации накопления органического вещества, разуплотнения почвы и подпахотного горизонта, помогает в борьбе с сорняками и минимизирует поражаемость болезнями и вредителями. При последующей посадке в следующем году данные операции смещаются поперек борозды на половину ее ширины, таким образом, чтобы дно гребней чередовались с клубнем картофеля.

Выбор рационального типа технических средств и его конструктивных параметров для выполнения сельскохозяйственного технологического процесса по возделыванию картофеля, должен отвечать почвенно-климатическим условиям региона. Предварительная подготовка почв, где выращивается картофель, в том числе тяжелых черноземных почвах с недостаточным увлажнением, подверженным ветровой эрозии с почвообрабатывающими фрезами, специальными машинами и глубокорыхлителями [6].

Вместе с тем, ранее разработанные задние навесные машины, в том числе техника зарубежного производства, включая картофелесажалки и картофелекопатели, не отработаны под ресурсосберегающую технологию на основе комбинированных машинотракторных агрегатов и не полностью учитывают почвенно-климатические условия регионов России.

Результаты и обсуждение. Предпосадочная подготовка почвы в зависимости от типа почвы проводится следующим образом:

На суглинистых почвах проводится культивация с боронованием, безотвальная перепашка на глубину 25…27 см, нарезка гребней. Или же можно проводит фрезерование на глубину 12…14 см, после чего можно произвести нарезку гребней для посадки клубней.

На супесчаных, средних и легких почвах проводится культивация на глубину 15 см и нарезаются овальной формы гребни высотой 14…16 см.

В настоящее время для возделывания картофеля на дерново-подзолистых почвах Нечерноземных зонах России применяется интенсивная технология с междурядьями посадки 70 и 90 см и грядово-ленточная 110+30 см, которая предусматривает получение высоких урожаев и экологической чистоты клубней при комбайновой уборке картофеля [7-9].

Использование современных технологий подготовки почвы к посадке картофеля может упростить применение уборочных машин в сложных почвенно-климатических условиях и повысить производительность труда с имеющимися уборочными машинами и уменьшить эксплуатационные затраты в виде простоев на ремонт.

Один из вариантов подготовки почвы предусматривает рыхление с почвообрабатывающими фрезами. Для снижения энергоемкости процесса рыхления почвы был выбран волнистый рабочий орган фрезы. Применение волнистого рабочего органа фрезы позволило увеличить качество подготовки почвы, уменьшение энергоемкости фрезерования, что позволило нам, при уборке отказаться от сложных сепарирующих рабочих органов картофелеуборочных машин для уменьшения повреждений клубней [10].

Наилучшие условия выращивания культуры картофеля при объемной массе:

- на дерново- подзолистой суглинистой почве 1,1…1,2 г/см²;
- на дерново- подзолистой связнопесчаной 1,3…1,5 г/см²;
- на черноземах 0,9…1,1 г/см².

Таким образом, наиболее приемлемым и отвечающим агротехническим требованиям выращивания картофеля является обеспечение разрушения прочных комков, динамическим способом, с помощью комкоразрущающего битерного барабана, который устанавливается в машинах для подготовки почвы после подкапывающего рабочего органа. Применение на тяжелых почвах обычных технологий приводит к снижению надежности техники, то есть частые поломки, к увеличению повреждения клубней и доли ручного труда на переборки картофеля. В этой части предложенная технология возделывания картофеля предоставляет интерес возделывания картофеля в тяжелых почвенно-климатических условиях.

Степень крошения почвенных комков во многом зависит от свойства самих комков, к основным характеристикам которых можно отнести их фракционный состав и прочностные свойства с изменением влажности почвы.

Показатели статистической прочности почвенных комков при переменной влажности являются основами динамического крошения почвенных комков.

Таблица 1 – Показатели статистической прочности почвенных комков в зависимости от влажности

Тип почвы и место испытания					
Легкая глина (опытное поле ВИСХОМа)		Легкая глина (Московская область)		Тяжелый суглинок (Московская область)	
Влажность, %	Разрушающ ее усилие, Н	Влажность, %	Разрушающ ее усилие, Н	Влажность, %	Разрушающее усилие, Н
16,0	117	17,5	129	9,11	206
19,4	118	30,7	142	13,15	133
22,0	120	23,9	163	17,19	140
25,5	140	26,4	168	21,23	145
29,0	197			25,27	245

Анализ полученных данных показывает, что разрушение почвенных комков (до 80%), происходит при падении с высоты 1-1,5м и разрушающиеся сила глины влажностью 17-22% при статическом сжатии составляет 0,1-0,2 кН.

Предпосадочная технология возделывания картофеля включает себе следующие операции:

1. Нарезка гряд;
2. Разрушение и сепарация почвенных комков с укладкой их в глубокие борозды;
3. Посадка картофеля в гребни;
4. Комбайновая уборка картофеля.

Технологию ударного разрушения почвенных комков исследовали многие ученые: Ф. Кик, В.Л. Кирпичев, П.А. Ребиндер, Н.А. Кильчевский, И.М. Панов, которые за основу брали степень дробления, определяемую по формуле

$$i = \frac{D}{d},$$

где D – первоначальный диаметр частица; d- средневзвешенный диаметр частиц после разрушения.

Результаты некоторых исследований показали, что наибольшее влияние на разрушение почвенных комков оказывает их влажность и скорость соударения битера с комками.

С уменьшением влажности возрастает степень дробления, а энергоемкость снижается. С повышением скорости удара степень дробления несколько снижается, а удельная энергоемкость возрастает. Минимальная скорость соударения, при которой происходит разрушение почвенного комка, равна 6-8 м/с [11, 12].

Для выполнения второй операции, предложенной интенсивной технологии применяется модернизированный сепаратор-укладчик СУ-1,4, который после комкоразрущающего битерного барабана оборудован металлическим экраном в виде сита, что позволяет дробление комков на более мелкие частицы.

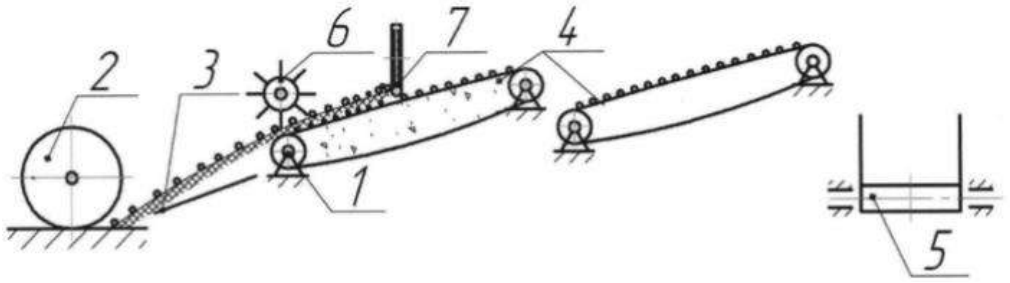


Рисунок 2 – Схема модернизированного сепаратора-укладчика СУ-1,4

Модернизированный сепаратор-укладчик СУ-1,4 (рисунок 2) является полунавесным и агрегатируется тракторами типа МТЗ-80, МТЗ-82, привод от ВОМ и гидросистема трактора, рабочая скорость 2,5-3,6 км/ч, ширина захвата 1,4 м, глубина обработки гряди до 25см. Сепаратор-укладчик СУ-1,4 работает следующим образом, подкапывающий рабочий орган 3, закрепленный на раме 1, соединенный с опорно-копирующими катками 2, подрезает гряды с высотой 25-26 см, который образовывал гребнеобразователь и передает его на сепарирующий элеватор 4, где осуществляется разрушение комков комкоразрушающим устройством 6 и экраном 7 и сепарация почвы с укладкой не разрушенных комков в глубокие борозды.

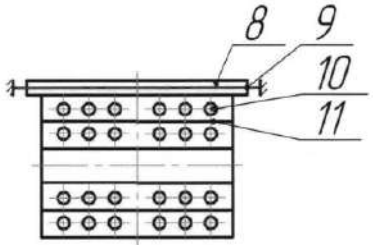


Рисунок 3 – Металлический экран

Металлический экран (рисунок 3), состоит из стойки 8, закрепленной на оси 9, также возможно регулирование угла наклона экрана в вертикальной плоскости и в нем имеются отверстия 10 диаметром d=25 мм и наклонные выступы 11 для более эффективного разрушения почвенных комков.

Особенностью модернизированного сепаратора-укладчика СУ-1,4 является то, что качество крошения почвы по фракциям до 25мм составляют примерно 97,8-98,4% [13].

Выводы. При подготовке почв под посадку картофеля проводят следующие операции. Основная подготовка почв: фрезерование на глубине 12…15 см, безотвальное рыхление плоскорезами в почвах подверженных ветровой эрозии, нарезка гребней. Предложенная технология возделывания картофеля с чередующими гребнями повышает эффективность возделывания картофеля при соблюдении правильного чередования нарезанных гребней на том же поле для стабилизации накопления органического вещества, разуплотняется почва и подпахотный горизонт, что помогает в борьбе с сорняками и минимизирует поражаемость болезнями и вредителями. Данная технология особенно привлекательна тем производителям, чьи площади под посадку картофеля ограничены.

Список источников

1. Костенко М.Ю. Технология уборки картофеля в тяжелых полевых условиях с применением инновационных решений в конструкции и обслуживании уборочных машин: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / Михаил Юрьевич Костенко. Рязань, 2011. 462 с.

2. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. Метод комплексной оценки качества выполнения технологических операций энергоресурсосберегающей технологии уборки корнеплодов и картофеля // Агроинженерия. 2022. Т.24. № 1. С.12-16. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-1-12-16.

3. Борычев С.Н. Машинные технологии уборки картофеля с использованием усовершенствованных копателей, копателей-погрузчиков и комбайнов: дис. … докт. техн. наук: 05.20.01 / Борычев Сергей Николаевич. – Рязань, 2008. 484 с.

4. Старовойтова О.А. Разработка и совершенствование элементов технологии возделывания картофеля применительно к условиям изменяющегося климата Нечерноземной зоны России: дис. ... докт. с.-х. наук: 05.20.01 / Старовойтова Оксана Анатольевна. – Москва, 2020. 317 с.

5. Патент на изобретение № 2809984 C1 Российская Федерация, МПК A01B 79/02. Способ возделывания картофеля с чередующимися гребнями / Гаджиев П.И., Шестакова Е.В., Рамазанова Г.Г., Махмутов М.М., Гаджиев И.П., Хисматуллина Ю.Р., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Министерства Сельского хозяйства РФ Российский государственный университет народного хозяйства имени В.И. Вернадского // № 2023106045; заявл. 15.03.2023. – опубл. 20.12.2023., Бюл. №35

6. Гаджиев П.И., Шестакова Е.В., Рамазанова Г.Г. Теоретическое исследование подкапывающего лемеха картофелеуборочного агрегата для снижения потерь урожая и эрозии почвы // Инженерные технологии и системы. 2022. Т.32. № 2. С. 263-278. – DOI 10.15507/2658-4123.032.202202.263-278

7. Успенский И.А., Юхин И.А., Мачнев А.В., Голиков А.А. Формирование комплекса картофелеуборочных и транспортных машин // Техника и оборудование для села. 2021. № 2 (284). С.27-31. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31

8. Борычев С.Н. Совершенствование технологий и машин для уборки картофеля // Вестник КрасГАУ. 2007. № 5. С.179-185.

9. Гаджиев П.И., Башкиров А.П., Рамазанова Г.Г., Гаджиев И.П., Шершнев Н.С. Влияние технологических приемов на урожайность картофеля // Наука в центральной России. 2022. № 3(57). С.41-47.

10. Рамазанова Г.Г. Параметры и режимы работы фрезы для предпосадочной обработки почвы под картофель: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Рамазанова Гюльбике Гудретдиновна. – Москва, 2016. 132 с.

11. Дорохов А.С., Аксенов А.Г., Сибирев А.В. Теоретические исследования повышения качества уборки корнеплодов и картофеля сепарирующей системой, использующей теплоту

отработавших газов // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 1(57). С.12-17. – DOI 10.18286/1816-4501-2022-1-12-17

12. Abedi G., Abdollahpour S., Bakhtiari M. R. Aerodynamic properties of potato tubers to airflow separation from stones and clods // International Journal of Vegetable Science. 2019. Vol. 25, no. 1. P. 87–94. – DOI: https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1478920.

13. Гаджиев П.И., Рамазанова Г.Г., Шикалов М.С., Алексеев А.И. Исследование крошения почвы при её предпосадочной подготовке к последующей комбайновой уборке картофеля // Техника и оборудование для села. 2019. № 4. С. 20 –23. – https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-20-23.

References

1. Kostenko M.Yu. Technology of harvesting potatoes in difficult field conditions using innovative solutions in the design and maintenance of harvesting machines: dis. ... doc. tech. Sciences: 05.20.01 / Mikhail Yurievich Kostenko. Ryazan, 2011. 462 p.

2. Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Aksenov A.G., Mosyakov M.A. Method for a comprehensive assessment of the quality of technological operations of energy-resource-saving technology for harvesting root crops and potatoes // Agroengineering. 2022. T.24. No. 1. P.12-16. – DOI 10.26897/2687-1149-2022-1-12-16.

3. Borychev S.N. Machine technologies for harvesting potatoes using improved diggers, digger-loaders and combines: dis. ... doc. tech. Sciences: 05.20.01 / Borychev Sergey Nikolaevich. – Ryazan, 2008. 484 p.

4. Starovoitova O.A. Development and improvement of elements of potato cultivation technology in relation to the conditions of the changing climate of the Non-Black Earth Zone of Russia: dis. ... doc. agricultural Sciences: 05.20.01 / Starovoitova Oksana Anatolevna. – Moscow, 2020. 317 p.

5. Patent for invention No. 2809984 C1 Russian Federation, IPC A01B 79/02. Method of cultivating potatoes with alternating ridges / Gadzhiev P.I., Shestakova E.V., Ramazanova G.G., Makhmutov M.M., Gadzhiev I.P., Khismatullina Yu.R., applicant and patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Ministry of Agriculture Economy of the Russian Federation Russian State University of National Economy named after V.I. Vernadsky // No. 2023106045; application 03/15/2023. – publ. 12/20/2023, Bulletin. No. 35

6. Gadzhiev P.I., Shestakova E.V., Ramazanova G.G. Theoretical study of the digging ploughshare of a potato harvesting unit to reduce crop losses and soil erosion // Engineering technologies and systems. 2022. T.32. No. 2. pp. 263-278. – DOI 10.15507/2658-4123.032.202202.263-278

7. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Machnev A.V., Golikov A.A. Formation of a complex of potato harvesting and transport machines // Equipment and equipment for rural areas. 2021. No. 2 (284). P.27-31. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-2-27-31

8. Borychev S.N. Improving technologies and machines for potato harvesting // Bulletin of KrasGAU. 2007. No. 5. P.179-185.

9. Gadzhiev P.I., Bashkirov A.P., Ramazanova G.G., Gadzhiev I.P., Shershnev N.S. The influence of technological methods on potato yield // Science in Central Russia. 2022. No. 3(57). P.41-47.

10. Ramazanova G.G. Parameters and operating modes of a cutter for pre-planting soil cultivation for potatoes: dis. ...cand. tech. Sciences: 05.20.01 / Ramazanova Gyulbike Gudretdinovna. – Moscow, 2016. 132 p.

11. Dorokhov A.S., Aksenov A.G., Sibirev A.V. Theoretical studies of improving the quality of harvesting root crops and potatoes using a separating system using the heat of exhaust gases // Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2022. No. 1(57). P.12-17. – DOI 10.18286/1816-4501-2022-1-12-17

12. Abedi G., Abdollahpour S., Bakhtiari M. R. Aerodynamic properties of potato tubers to airflow separation from stones and clods // International Journal of Vegetable Science. 2019. Vol. 25, no. 1. P. 87–94. – DOI: https://doi.org/10.1080/19315260.2018.1478920.

13. Gadzhiev P.I., Ramazanova G.G., Shikalov M.S., Alekseev A.I. Study of soil crumbling during its pre-planting preparation for subsequent combine harvesting of potatoes // Equipment and equipment for the village. 2019. No. 4. pp. 20–23. – https://doi.org/10.33267/2072-9642-2019-4-20-23.

Информация об авторах

П.И. Гаджиев – доктор технических наук; Г.Г. Рамазанова – кандидат технических наук; И.П. Гаджиев – кандидат технических наук.

Information about the authors

P. Hadzhiev – Doctor of Technical Science; G. Ramazanova – Candidate of Technical Science; I. Hadzhiev – Candidate of Technical Science.

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): 20.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 21.02.2024

Тип статьи: научная
УДК 547.326
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-118-127

РАЗРАБОТКА МЕТОДА СИНТЕЗА ТРИГЛИЦЕРИДА КАПРОНОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ БИОДИЗЕЛЯ

Ленар Инарикович Мусин [1]***, Карим Ринатович Гизутдинов*** [2]***,***
Ренат Маратович Ахмадуллин [3]***, Лилия Шайхнуровна Нигматуллина*** [4]***,***
Леонид Валентинович Лопухов [5]***, Валерий Викторович Спирягин*** [6]
[1,2,3] *ООО НТЦ «Ахмадуллины», г. Казань, Российская Федерация*
[1]777lenar@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-8318-8293
[2]ahmadullinr@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3215-275X
[4,5] *Казанский Федеральный Университет, Институт фундаментальной медицины и биологии, г. Казань, Российская Федерация*
[4]https://orcid.org/0000-0002-3635-3057
[6] *ООО «Сария-Био Индастрис-Волга», г. Елабуга, Российская Федерация*

Автор, ответственный за переписку: Мусин Ленар Инарикович, 777lenar@list.ru
Corresponding author: Musin Lenar, 777lenar@list.ru

Реферат. *Среди известных триглицеридов - низкомолекулярные триацилглицеролы, в частности трикапроины, являются внутренним маркером растительных масел и жиров животного происхождения, направляемых для получения биодизеля для нужд сельского хозяйства. Однако в литературе отсутствуют простые и доступные методы синтеза трикапроинов с высокими выходами, так как получение этого соединения часто сопровождается следующими проблемами: осмолением реакционной массы, дезактивацией катализатора, низкой конверсией исходных реагентов, потерей исходных реагентов ввиду образования эмульсий и побочных соединений. Разработан доступный селективный метод получения триглицерида капроновой кислоты с высоким выходом, изучены основные и побочные реакции синтеза, определены параметры реакции и оптимальные условия синтеза целевого продукта. В работе изучены различные температурные, концентрационные, временные факторы и катализаторы, влияющие на выход триглицерида капроновой кислоты посредством реакции этерификации глицерина с капроновой кислотой. Наибольший выход и конверсия целевого продукта был достигнут на основе каталитического взаимодействия капроновой кислоты с глицерином в присутствии 3 мас% 85%-ой ортофосфорной кислоты и 5 мас% сокатализатора триполифосфата кремния под вакуумом. Структура полученного трикапроина была подтверждена методами ЯМР, масс-спектрометрии и ИК спектроскопии. Чистый продукт получен в виде прозрачной густой жидкости светло-оранжевого или слегка красного цвета. Выход конечного целевого продукта 95%.*

Ключевые слова: *трикапроин, фосфат кремния, фосфорная кислота, капроновая кислота, этерификация.*

DEVELOPMENT METHOD OF THE SYNTHESIS OF CAPROIC ACID TRIGLYCERIDE FOR BIODISEL

Lenar Musin [1]***, Karim Gizutdinov*** [2]***, Renat Akhmadullin*** [3]***,***
Lilya Nigmatullina [4]***, Leonid Lopukhov*** [5]***, Valery Spiryagin*** [6]
[1,2,3] *LLC R&D center "AhmadullinS", Kazan, Russia*
[1]777lenar@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-8318-8293
[2]ahmadullinr@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3215-275X
[4,5] *Kazan Federal University, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan, Russia*
[4]https://orcid.org/0000-0002-3635-3057

[6] *LLC "Saria-BIO Industries-Volga", Yelabuga, Russia*

Abstract. *Among the known triglycerides are low molecular weight triacylglycerols, in particular tricaproins, which are an internal marker of vegetable oils and animal fats used to produce biodiesel for agricultural needs. However, there are no simple and accessible methods for the synthesis of tricaproins in high yields in the literature, since the preparation of this compound is often accompanied by the following problems: tarring of the reaction mass, deactivation of the catalyst, low conversion of the starting reagents, loss of the starting reagents due to the formation of emulsions and side compounds. An accessible selective method for producing caproic acid triglyceride with high yield has been developed, the main and side reactions of the synthesis have been studied, the reaction parameters and optimal conditions for the synthesis of the target product have been determined. The work studied various temperature, concentration, time factors and catalysts that affect the yield of caproic acid triglyceride through the esterification reaction of glycerol with caproic acid. The highest yield and conversion of the target product was achieved based on the catalytic interaction of caproic acid with glycerol in the presence of 3 wt% 85% orthophosphoric acid and 5 wt% silicon tripolyphosphate cocatalyst under vacuum. The structure of the resulting tricaproin was confirmed by NMR, mass spectrometry and IR spectroscopy. The pure product is obtained in the form of a transparent thick liquid of light orange or slightly red color. The yield of the final target product is 95%.*

Keywords: *tricaproin, silicon phosphate, phosphoric acid, caproic acid, catalysis, esterification.*

Для цитирования: Мусин Л.И., Гизутдинов К.Р., Ахмадуллин Р.М., Нигматуллина Л.Ш., Лопухов Л.В., Спирягин В.В. Разработка метода синтеза триглицерида капроновой кислоты для биодизеля // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 118-127. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-118-127.

For citation: Musin L., Gizutdinov K., Akhmadullin R., Nigmatullina L., Lopukhov L., Spiryagin V. Development method of the synthesis of caproic acid triglyceride for biodisel. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 118-127. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-118-127.

Введение. Биотопливо, полученное на основе триглицеридов, находит все большее применение в промышленности и сельском хозяйстве (рисунок 1).

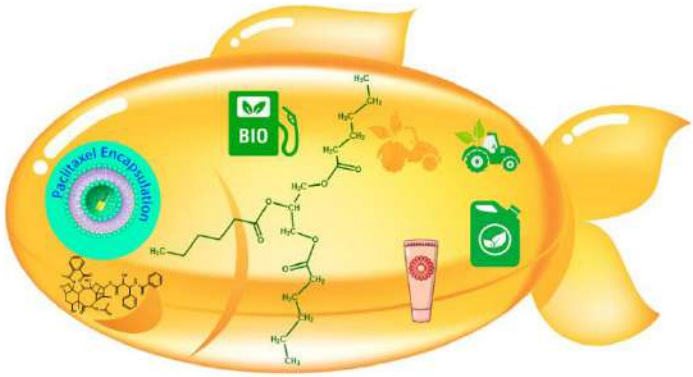


Рисунок 1 – Использование триглицеридов

Среди известных триглицеридов - низкомолекулярные триацилглицеролы, в частности трикапроины, относятся к востребованным и необходимым соединениям в химической и аграрной промышленности, используются в качестве аналитических стандартов для изучения термического распада простых триглицеридов [1, 2] и продуктов радиолитической фрагментации [3], являются внутренним маркером растительных масел и жиров животного происхождения, направляемых для

получения биодизеля [4]. Было найдено, что трикапроины сопоставимы с компонентами биодизеля благодаря своей термоемкости и высокой окислительной способности [5, 6]. Трикапроины являются компонентами наноэмульсии противоракового препарата с паклитакселем Captex@ 8000 [7], составным компонентом репеллента и косметических средств [8].

Интерес к трикапроин триглицериду и его область применения растут, что требует простого и доступного способа его получения. Большинство известных способов сводится к реакции этерификации глицерина и капроновой кислоты. Однако, получение триглицеридов среднемолекулярных карбоновых кислот часто сопровождается проблемами: осмолением реакционной массы, дезактивацией катализатора, низкими выходами продуктов реакции и конверсией исходных реагентов, потерей исходных реагентов ввиду образования эмульсий и побочных соединений. Решение этих проблем является необходимой задачей для синтеза трикапроина. Основными катализаторами синтеза трикапроина являются различные сульфированные соединения [9], оксиды железа [8] и ферменты [10]. Все эти методы характеризуются либо длительностью процесса, либо специфичностью и недоступностью катализатора, в частности ферментов, либо особыми условиями.

В последнее десятилетие наиболее актуальными и перспективными соединениями для реакции этерификации используются различные полиоксометаллаты, представляющие собой полиядерные комплексы, в основе молекулярной структуры которых лежат переходные металлы вольфрама, молибдена, ванадия, тантала и др. и неметаллы – кремний, фосфор, бор и мышъяк. Эти соединения по структуре, в основном, состоят из 12 и 24 октаэдров (структура Кеггина и Доуссона) [11], в центре которых расположены атомы неметалла, в основном, атомы фосфора и кремния.

Наиболее перспективными и простыми катализаторами по типу полиоксометаллатов являются иммобилизованные на пористый уголь и оксид кремния фосфорные кислоты [12]. Известны также исследования по использованию сульфированного или фосфорилированного оксида кремния в реакциях этерификации [13]. Большинство исследований полиоксометаллов сводится к существенной роли фосфатных и силикатных групп, что требует более глубокого их изучения и понимания механизма их действия. Каталитическая способность фосфорной кислоты в реакции этерификации намного превышает таковую, чем у серной кислоты, снижая долю побочных процессов и в то же время повышая конверсию реакции. Кроме того, известны многочисленные исследования по использованию высокоактивных твердых кислотных катализаторов на основе различных полимерных молекул с сульфо-, карбокси-, фосфоновыми и другими группами, а также различные сульфатированные оксиды металлов («суперкислоты») или же основные катализаторы на основе силикатных производных (цеолитов, оксиды кремния, гидротальциты и т.д.) для синтеза различных триглицеридов в качестве биотоплива [14]. Однако ввиду труднодоступности, специфичности или же регенерации гетерогенных твердых кислот и оснований применение этих катализаторов в больших масштабах является сложной задачей.

Таким образом, поиск оптимального и эффективного катализатора для реакции получения трикапроина и других реакций этерификации является актуальным.

Цель работы – разработка доступного способа получения триглицерида капроновой кислоты с высоким выходом, изучение основных и побочных реакций синтеза, определение параметров реакции и оптимальных условий синтеза целевого продукта.

Экспериментальная часть. Масс-спектрометрические исследования проводили на приборе Sciex QTrap 6500 с ионным источником Turbo V Source с ESI-зондом (TurboIonSpray Probe) или APCI-зондом (APCI probe) в режиме прямого ввода. Режим - положительная ионизация. Напряжение +5200 Вольт. Давление газ 1 - 15 psi, газ 2 - 15 psi. Массовый диапазон (m/z): 5 – 2000 Да (в режиме тройного квадруполя); 50 – 2000 Да (в режиме линейной ионной ловушки). Тип детектора – Ion Drive High Energy Detector+.

Спектры ЯМР регистрировали при 25°С на ЯМР-спектрометре Bruker Avance-400 (400.0 МГц, ^{1}H; 100.6 МГц). Химические сдвиги относили к пику остаточного растворителя.

Съемку ИК-спектров продуктов реакции проводили на спектрофотометре Vector-22 (Bruker) в диапазоне от 4000-400 см$^{-1}$ с разрешением 4 см$^{-1}$.

Определение индукционного периода некаталитического окисления отдельно капронового масла и с добавкой триполифосфата кремния проводили методом дифференциально-сканирующей калориметрии на приборе DSC 214 Polyma. Термограммы ДСК были зарегистрированы в атмосфере кислорода при температуре 150°С и потоке кислорода 60 мл/мин. Для измерения использовались алюминиевые тигли объемом 25 мкл, масса навески 1.5-2.5 мг.

Тонкослойную хроматографию проводили на алюминиевых пластинках Sorbfil ПТСХ-АФ-А 100×150 мм в системе бензол - этанол (9:1), хроматограммы проявляли реактивом Драгендорфа.

Для всех реакций использовали капроновую кислоту CAS 142-62-1, СА, ООО «Вектон», глицерин по ГОСТ 6259-75, ООО «Химреактив».

Подбор катализатора и его количества осуществлялся на основе известных аналогов в литературе для реакций этерификации [15].

Amberlite IR120 H (USA, DuPont, CAS 39389-20-3), пара-толуолсульфокислота (х.ч., ≥98.5%, Sigma-Aldrich, CAS 6192-52-5), H_3PO_4 (85 мас%, ч.д.а, ООО «НПФ Невский химик»), KOH (х.ч., ООО «НПФ Невский химик»), Al_2O_3 (х.ч., безводный, ООО «НПФ Невский химик»), H_2SO_4 (контактная улучшенная, ГОСТ 2184-2013, ООО «Татхимпродукт»), триполифосфат (Fengchen Group Co., Ltd, China).

Схема получения трикапроина представлена на рисунке 2.

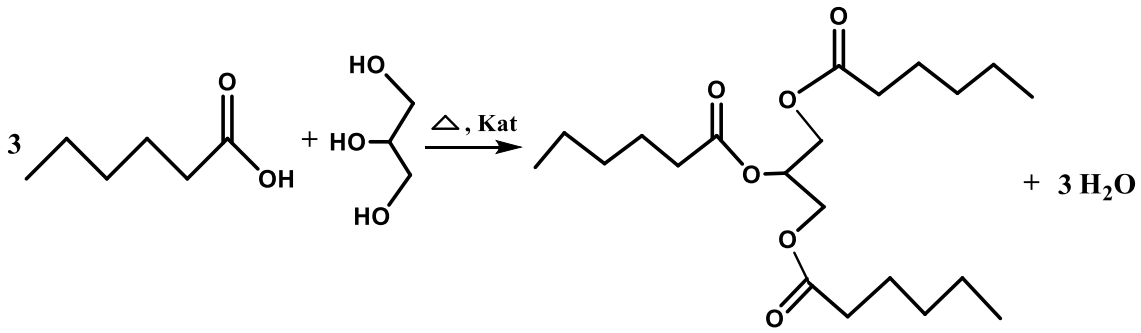


Рисунок 2 - Схема синтеза трикапроина

Общая методика синтеза трикапроина для всех использованных гетерогенных и гомогенных катализаторов*:* В двухгорлую круглодонную колбу на 100 мл загружали 82 г (0,7 моль) капроновой кислоты и 22 г (0,23 моль) глицерина. Далее добавляли в реакционную смесь различное количество катализатора (от 0,1 до 8 г). Далее нагревали реакционную смесь до определенной температуры (от 120 до 220°С) и собирали отгон воды в приемной колбе. При необходимости использовали вакуум 400-500 мм.рт.ст.

Оптимизированная методика синтеза трикапроина: В двухгорлую круглодонную колбу на 100 мл загружали 82 г (0,7 моль) капроновой кислоты и 22 г (0,23 моль) глицерина. Далее добавляли в реакционную смесь триполифосфат кремния и 85% фосфорной кислоты 5 г и 3 г соответственно. Далее реакционную смесь нагревали до заданной температуры (190°С) и собирали отгон воды в приемной колбе. Общее время реакции составило 8 часов при 190°С (6 часов без вакуума и при использовании вакуума 400-500 мм.рт.ст в течении 2 часов) .

Трикапроин (пропан-1,2,3-триил тригексаноат). Чистый продукт получали в виде прозрачной густой жидкости светло-оранжевого или слегка красного цвета. Выход конечного целевого продукта 95%. ^{1}H (DMSO-d6, Hz) 0.86 (9H, тр, CH_3); 1.26 (12H, м, CH_2); 1.52 (6H, м, CH_2); 2.28 (6H, тр, CH_2); 4.12-4.25 (4H, м, CH_2); 5.18 (1H, м, CH). Ionic pic (Da) product $[M]^+$ (327.7), $[M\text{-}C_5H_{11}CO_2]^+$ проп-2-ен-1,2-диил дигексаноат (271.3), пентен (99.1). ИК (пленка, см$^{-1}$) C=O (1745); CH_3; CH_2 (2863-2958; 1460); -CH_2- (1099, 1165, 734).

Обсуждение результатов. В современной химии для этерификации глицерола и алкилкарбоновых кислот используют различные минеральные кислоты и твердые кислотные катализаторы. Однако большинство гомогенных кислотных катализаторов обладают сильными

коррозионными свойствами, требуют нейтрализации после окончания реакции и приводят к различным побочным продуктам. В настоящей работе проведено сравнительное исследование с простыми известными и доступными катализаторами, а также приведены данные по использованию модифицированного типа катализатора на основе смеси триполифосфата кремния и фосфорной кислоты.

В результате проведенной работы были использованы следующие гетерогенные и гомогенные катализаторы кислотного или щелочного типа (рисунок 3):

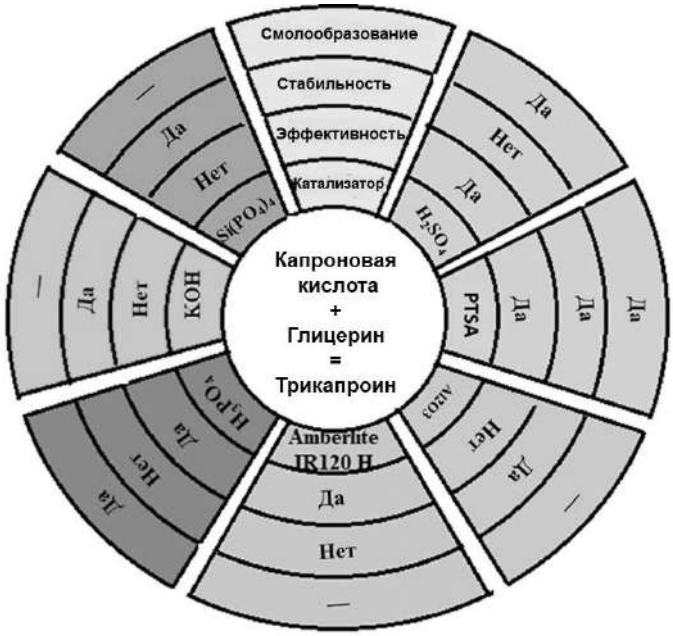


Рисунок 3 - Используемые катализаторы в синтезе триглицерида капроновой кислоты

Согласно диаграмме, многие катализаторы, а именно минеральные кислоты в виде фосфорной и серной кислот, твердой пара-толуолсульфокислоты, приводят к различным побочным процессам и осмолению конечного продукта. Твердый кислотный катализатор Amberlite IR120 H дезактивируется и разрушается, а основные катализаторы в виде твердых гидроксида калия и оксида алюминия не эффективны в реакциях получения трикапроина.

При проведении синтеза триглицерида капроновой кислоты с катализаторами, представленными на рисунке 3, выявлены следующие особенности:

1. Образование азеотропной смеси вода/гексановая кислота при отгонке.
2. Образование эмульсионной воды в реакционной массе.
3. Осмоление реакционной массы.
4. Потеря эффективности или полная дезактивация катализатора.
5. Протекание реакции в температурном диапазоне от 130°C до 190°C.
6. Необходимость использования вакуума для увеличения конверсии.

Диаграмма кинетических кривых реакции образования триглицерида капроновой кислоты представлена на рисунке 4.

Конверсию реакции расчитывали по формуле:

$X=(V_{Separated\ water}/V_{Theory\ water})\cdot 100\%$

Расчет других параметров кинетического контроля реакции не проводился для упрощения поиска оптимального метода синтеза и экономии времени.

Как видно из диаграммы пониженная температура (ниже 160°С) и меньшее количество твердого кислотного катализатора влияют на скорость реакции незначительно. Малые количества твердого кислотного катализатора быстро дезактивируются, что связано с легкой окисляемостью капроновой кислоты и образованием различных продуктов его распада и их взаимодействия с поверхностью твердого катализатора. Сульфированная катионобменная смола Amberlite IR120 H в процессе реакции быстро дезактивируется и разрушается.

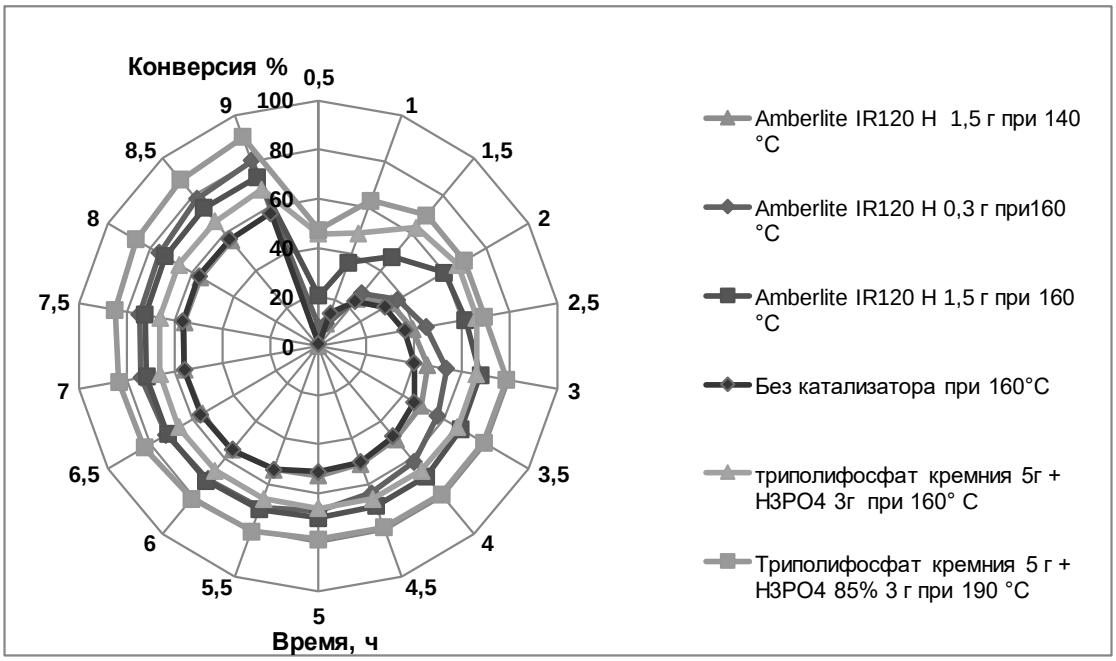


Рисунок 4 - Диаграмма кинетических кривых реакции образования триглицерида капроновой кислоты при 140-190°С в зависимости от количества и вида катализатора (Amberlite IR120 H – сульфированная катионобменная смола, ПТСК – пара-толуолсульфокислота).

В исследовании [16] показана возможность активации карбоксильной группы различными оксидами и оксипроизводными кремния, фосфора и металлов. Во всех этих работах показана активация карбоксильной группы на поверхности различных оксидов, что предполагает образование резонансного гибрида или резонансной стабилизации карбоксилат иона.

Согласно патенту [17] структура триполифосфата кремния может состоять из октаэдров различного строения, что вполне сопоставимо с молекулярными структурами различных полиоксометаллатов, однако кислотные центры данного соединения, в отличие от последних, не активны. Поэтому активация центров триполифосфата кремния небольшим количеством водного раствора фосфорной кислоты позволяет рассчитывать на синергизм каталитического действия их смеси. При использовании большего количества фосфорной кислоты, чем экспериментально найденное количество 3 г, реакционная масса осмоляется, что, возможно, происходит за счет образования полифосфорных кислот. Использование же меньшего количества фосфорной кислоты малоэффективно. Ввиду большого массива данных проведенных экспериментов с различными соотношениями катализаторов и температурных режимов в данной работе приводятся лишь наиболее эффективные опыты и приведена их сравнительная характеристика.

Согласно исследованию [18], механизм действия полиоксометаллатов в реакции этерификации заключается в активации карбоксилатной группы с образованием карбоний катиона с последующим элиминированием молекулы воды

Таким образом, применение триполифосфата кремния и его активация небольшим количеством водного раствора фосфорной кислоты позволило получить высокий выход трикапроина, при этом конечный продукт не обладает кислотными свойствами, что было подтверждено исследованием водной экстракции продукта реакции и измерением его pH.

Процесс активации триполифосфата кремния капроновой кислоты был подтвержден на примере исследования ее индукционного периода окисления на дифференциальной сканирующей калориметрии в сравнении с исходной капроновой кислоты и ее смеси с триполифосфатом кремния. Согласно полученным данным период индукционного окисления в смеси фосфата кремния в два раза ниже в сравнении с исходной кислотой без добавки триполифосфата кремния. (рисунок 5).

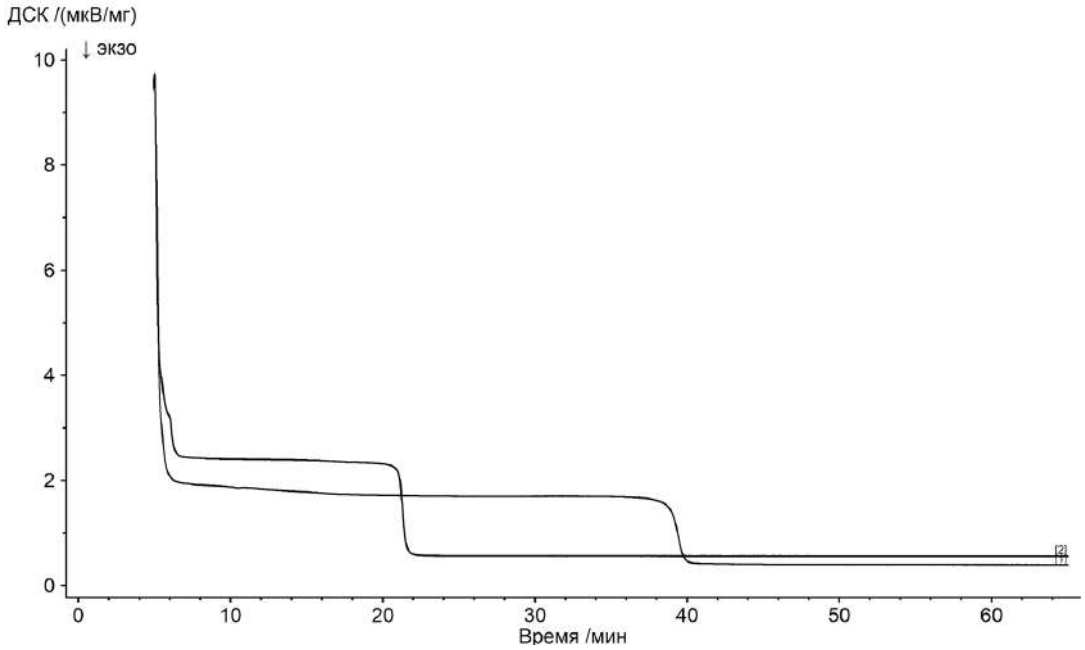


Рисунок 4 - ДСК кривые определения периода индукционного окисления для капроновой кислоты (кривая 1) и ее смеси с триполифосфатом кремния (кривая 2)

Строение конечного продукта и отсутствие возможных побочных продуктов реакции было подтверждено спектрами ЯМР, ИК и масс-спектрометрии, а также экспериментами тонкослойной хроматографии. В спектрах ЯМР отсутствуют сигналы химических сдвигов для возможных моно- и диглицеридов капроновой кислоты, а также сигналы исходных молекул глицерина и капроновой кислоты. Согласно данным масс-спектрометрии зарегистрирован молекулярный пик иона 327.4 Да и его производного 271.3 Да после элиминирования 1 молекулы гексаналя (99.1 Да) и молекулы пентена (70.9 Да) в процессе его дальнейшей ионизации. Все физико-химические параметры совпадают с данными, представленными в статье [17].

Использование вакуума (40-50 мм. рт. ст.) в течение 2 часов при 190°C после 6 часов нагрева при той же температуре позволило достигнуть выхода и селективности 95%.

На предприятии ООО «Сария-Био Индастрис-Волга» была успешно реализована апробация опытной партии трикапроина в количестве 50 кг, используемого в качестве внутреннего маркера растительных масел и жиров животного происхождения.

Выводы.

1. Разработан доступный способ синтеза триглицерида гексановой кислоты в присутствии смесевого кислотного катализатора в соотношении 3:5 85% ортофосфорной кислоты и

триполифосфата кремния. Достигнут выход реакции 95% в условиях вакуумной отгонки эмульсионной воды и нагрева смеси до 190°С.

2. Наработана и апробирована опытная партия продукта, используемого в качестве внутреннего маркера растительных масел и жиров животного происхождения.

Список источников

1. Lien Y.C., Wassef N.W. Thermal decomposition of tricaproin // J. Am. Oil. Chem. Soc.,1973, V. 50, P. 76–78. https://doi.org/10.1007/BF02671107

2. Czamara K., Majzne K., Pilarczyk M., Kochan K., Kaczor A., Baranska M. Raman spectroscopy of lipids: A review // J. Raman Spectrosc., 2014, V. 46; P. 4– 20, https://doi.org/10.1002/jrs.4607.

3. Letellier P.R., Wassef N.W. Secondary Products from the Radiolysis of Tricaproin // J. Agr. Food Chern., 1974, V. 22, N. 4, P. 693-696. https://doi.org/10.1021/JF60194A012.

4. Fan X., Burton, Austic G. R. Preparation and characterization of biodiesel produced from fish oil // Chem. Technol. Fuels Oils, 2010, 46, 287–293. https://doi.org/10.1007/s10553-010-0225-4

5. Goodrum J. W., Eiteman M. A. Physical properties of low molecular weight triglycerides for the development of bio-diesel fuel models // Bioresource Technology, 1996, V. 56, № 1, P. 55–60. https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00167-0

6. Goodrum J.W. Rapid measurements of boiling point and vapor pressure of short-chain triglycerides by thermogravimetric analysis // J. Amer. Oil Chem. Soc., 1997, V. 74, P. 947–950. https://doi.org/10.1007/s11746-997-0009-0

7. Ogawara K., Fukuoka Y., Yoshizawa Y., Kimura T., Higaki K. Development of safe and potent O/W emulsion of paclitaxel to treat peritoneal dissemination // Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, V. 106, N. 4, P.1143-1148. https://doi.org/10.1016/j.xphs.2016.12.029.

8. Kaur K., Sobti A., Wanchoo R. K., Toor A.P. Studies on glycerol conversion to tricaproin over sulfate promoted iron oxide as catalyst using response surface methodology // Chem. Engin. Research and Design, 2018, V. 132, P. 276-284. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.12.040.

9. Bhaskar J. H., Annapure U. Sonication pre-treatment for the intensified synthesis of tricaproin using acid-resin catalyst // Chemical Engineering Science, 2022, V. 247, P. 1-8, https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116909.

10. Fomuso L.B. and Akoh, C.C. Structured lipids: Lipase-catalyzed interesterification of tricaproin and trilinolein // J. Amer . Oil Chem. Soc, 1998, V. 75, P. 405-410. https://doi.org/10.1007/s11746-998-0059-y.

11. García-López E.I., Marcì G., Krivtsov I., Casado Espina J., Liotta L. F., Serrano A. Local Structure of Supported Keggin and Wells–Dawson Heteropolyacids and Its Influence on the Catalytic Activity // J. Phys. Chem. C., 2019, V. 123, № 32, P. 19513–19527, https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03659.

12. Bhaduri K., Chatterjee R., Bhaumik A., Chowdhury B. Metal-Free Phosphate Modified Hierarchically Porous Carbon–Silica Nanocomposites for Solvent-Free Glycerol Carbonylation and Esterification Reactions // ACS Sustainable Chem. Eng., 2022, V. 10, № 34, P. 11242–11256. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c03022.

13. Ghoreishi K.B., Asim N., Yarmo M.A., Samsudin M.W. Mesoporous phosphated and sulphated silica as solid acid catalysts for glycerol acetylation // Chem. Pap., 2014, V. 68, P. 1194–1204. https://doi.org/10.2478/s11696-014-0550-x.

14. Lee D.-W., Lee K.-Y. Heterogeneous Solid Acid Catalysts for Esterification of Free Fatty Acids // Catal. Surv. Asia., 2014, V. 18, P. 55–74 https://doi.org/10.1007/s10563-014-9166-y

15. Otera J. and Nishikido J. Esterification: Methods, Reactions, and Applications. Second, Completely Revised, and Enlarged Edition. / WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010, P. 1-374.

16. Alves N.F., Santiago N.A.D.B., Bessa B.D.S., Oliveira A.C., Mendes F. J., Campos A.F., Oliveira A.C. Binary Oxides with Defined Hierarchy of Pores in the Esterification of Glycerol // Catalysts, 2016, V. 6, P. 151. https://doi.org/10.3390/catal6100151

17. Пат. WO 2004/ 028 969 A1 (publ. 2013). Silikat-Phosphat-Materialien (SiPOs) - Verfahren zu deren Herstellung und Anwendungen.

18. Hoo P., Zuhairi A. A. Kinetics Modeling and Mechanism Study for Selective Esterification of Glycerol with Lauric Acid Using 12-Tungstophosphoric Acid Post-Impregnated SBA-15 // Ind. Eng. Chem. Res., 2015, V. 54, № 32, P. 7852–7858. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02304

19. Jose A., Chaitanya M.V.N.L., Kannan E., Madhunapantula S.V. Tricaproin Isolated From Simarouba glauca Inhibits the Growth of Human Colorectal Carcinoma Cell Lines by Targeting Class-1 Histone Deacetylases // Front. Pharmacol. 2018, V. 9, № 127.https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00127.

References

1. Lien Y.C., Wassef N.W. Thermal decomposition of tricaproin // J. Am. Oil. Chem. Soc.,1973, V. 50, P. 76–78. https://doi.org/10.1007/BF02671107

2. Czamara K., Majzne K., Pilarczyk M., Kochan K., Kaczor A., Baranska M. Raman spectroscopy of lipids: A review // J. Raman Spectrosc., 2014, V. 46; P. 4– 20, https://doi.org/10.1002/jrs.4607.

3. Letellier P.R., Wassef N.W. Secondary Products from the Radiolysis of Tricaproin // J. Agr. Food Chern., 1974, V. 22, N. 4, P. 693-696. https://doi.org/10.1021/JF60194A012.

4. Fan X., Burton, Austic G. R. Preparation and characterization of biodiesel produced from fish oil // Chem. Technol. Fuels Oils, 2010, 46, 287–293. https://doi.org/10.1007/s10553-010-0225-4

5. Goodrum J. W., Eiteman M. A. Physical properties of low molecular weight triglycerides for the development of bio-diesel fuel models // Bioresource Technology, 1996, V. 56, № 1, P. 55–60. https://doi.org/10.1016/0960-8524(95)00167-0

6. Goodrum J.W. Rapid measurements of boiling point and vapor pressure of short-chain triglycerides by thermogravimetric analysis // J. Amer. Oil Chem. Soc., 1997, V. 74, P. 947–950. https://doi.org/10.1007/s11746-997-0009-0

7. Ogawara K., Fukuoka Y., Yoshizawa Y., Kimura T., Higaki K. Development of safe and potent O/W emulsion of paclitaxel to treat peritoneal dissemination // Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, V. 106, N. 4, P.1143-1148. https://doi.org/10.1016/j.xphs.2016.12.029.

8. Kaur K., Sobti A., Wanchoo R. K., Toor A.P. Studies on glycerol conversion to tricaproin over sulfate promoted iron oxide as catalyst using response surface methodology // Chem. Engin. Research and Design, 2018, V. 132, P. 276-284. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.12.040.

9. Bhaskar J. H., Annapure U. Sonication pre-treatment for the intensified synthesis of tricaproin using acid-resin catalyst // Chemical Engineering Science, 2022, V. 247, P. 1-8, https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116909.

10. Fomuso L.B. and Akoh, C.C. Structured lipids: Lipase-catalyzed interesterification of tricaproin and trilinolein // J. Amer . Oil Chem. Soc, 1998, V. 75, P. 405-410. https://doi.org/10.1007/s11746-998-0059-y.

11. García-López E.I., Marcì G., Krivtsov I., Casado Espina J., Liotta L. F., Serrano A. Local Structure of Supported Keggin and Wells–Dawson Heteropolyacids and Its Influence on the Catalytic Activity // J. Phys. Chem. C., 2019, V. 123, № 32, P. 19513–19527, https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b03659.

12. Bhaduri K., Chatterjee R., Bhaumik A., Chowdhury B. Metal-Free Phosphate Modified Hierarchically Porous Carbon–Silica Nanocomposites for Solvent-Free Glycerol Carbonylation and Esterification Reactions // ACS Sustainable Chem. Eng., 2022, V. 10, № 34, P. 11242–11256. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c03022.

13. Ghoreishi K.B., Asim N., Yarmo M.A., Samsudin M.W. Mesoporous phosphated and sulphated silica as solid acid catalysts for glycerol acetylation // Chem. Pap., 2014, V. 68, P. 1194–1204. https://doi.org/10.2478/s11696-014-0550-x.

14. Lee D.-W., Lee K.-Y. Heterogeneous Solid Acid Catalysts for Esterification of Free Fatty Acids // Catal. Surv. Asia., 2014, V. 18, P. 55–74 https://doi.org/10.1007/s10563-014-9166-y

15. Otera J. and Nishikido J. Esterification: Methods, Reactions, and Applications. Second, Completely Revised, and Enlarged Edition. / WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2010, P. 1-374.

16. Alves N.F., Santiago N.A.D.B., Bessa B.D.S., Oliveira A.C., Mendes F. J., Campos A.F., Oliveira A.C. Binary Oxides with Defined Hierarchy of Pores in the Esterification of Glycerol // Catalysts, 2016, V. 6, P. 151. https://doi.org/10.3390/catal6100151

17. Pat. WO 2004/ 028 969 A1 (publ. 2013). Silikat-Phosphat-Materialien (SiPOs) - Verfahren zu deren Herstellung und Anwendungen.

18. Hoo P., Zuhairi A. A. Kinetics Modeling and Mechanism Study for Selective Esterification of Glycerol with Lauric Acid Using 12-Tungstophosphoric Acid Post-Impregnated SBA-15 // Ind. Eng. Chem. Res., 2015, V. 54, № 32, P. 7852–7858. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02304

19. Jose A., Chaitanya M.V.N.L., Kannan E., Madhunapantula S.V. Tricaproin Isolated From Simarouba glauca Inhibits the Growth of Human Colorectal Carcinoma Cell Lines by Targeting Class-1 Histone Deacetylases // Front. Pharmacol. 2018, V. 9, № 127.https://doi.org/10.3389/fphar.2018.00127.

Информация об авторах

Л.И. Мусин – кандадит химических наук; Р.М. Ахмадуллин – кандадит химических наук; К.Р. Гизутдинов – ученик; Л.Ш. Нигматуллина – научный сотрудник; Л.В. Лопухов – кандадит химических наук; В.В. Спирягин – директор ООО«Сария-Био Индастрис-Волга».

Information about the authors

L. Musin – Candidate of Chemical Science; R. Akhmadullin – Candidate of Chemical Science; K. Gizutdinov - student; L. Nigmatullina – research; L. Lopukhov – Candidate of Chemical Science; V. Spiryagin – Director of Saria-Bio Industries-Volga LLC.

Вклад авторов: Мусин Ленар Инарикович – написание и оформление рукописи, анализ литературы, общее руководство работой; Ахмадуллин Ренат Маратович – разработка концепции статьи, формулирование целей и задач; Гизутдинов Карим Ринатович – проведение синтезов, выделение и характеристика продуктов реакции; Нигматуллина Лилия Шайхнуровна – проведение анализов ЯМР и ИК-спектроскопии; Лопухов Леонид Валентинович – проведение анализа масс-спектрометрии; Спирягин Валерий Викторович – проведение опытно-промышленных испытаний по получению целевого продукта.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Musin Lenar – writing and design of the manuscript, literature analysis, general supervision of the work; Akhmadullin Renat – development of the concept of the article, formulation of goals and objectives; Gizutdinov Karim – carrying out syntheses, isolating and characterizing reaction products; Nigmatullina Liliya – conducting NMR and IR spectroscopy analyses; Lopukhov Leonid – conducting mass spectrometry analysis; Spiryagin Valery - conducting pilot tests to obtain the target product..

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 09.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2024

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 29.02.2024. Заказ № 20.
Формат 84x108/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Гарнитура Times. Объем – 13,44 усл. печ. л. Тираж 100 экз.