«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ» «SCIENCE IN THE CENTRAL RUSSIA» **12+**

Научно-производственный периодический журнал **The research-production periodic magazine**

Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в международную базу данных Agris

№ 2 (44), 2020 г.

Основанв 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

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА

«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ»

АКИМОВ Михаил Юрьевич – директор ФГБНУ «Федеральный научный центр им. И.В. Мичурина», кандидат сельскохозяйственных наук

ГУЛЕВСКИЙ Вячеслав Анатольевич – проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доктор технических наук, доцент

ДЕРКАНОСОВА Наталья Митрофановна – проректор по учебной работе, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доктор технических наук, профессор

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

КОСТЮЧЕНКОВ Николай Васильевич – профессор кафедры «Аграрная техника и технологии» Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина, действительный член Академии сельскохозяйственных наук Республики Казахстан, доктор технических наук, профессор

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

ЛАЧУГА Юрий Федорович – академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, академик РАН, доктор технических наук, профессор

НИКИТИН Александр Валерьевич – председатель попечительского совета Мичуринского государственного аграрного университета, профессор кафедры управления и делового администрирования ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», доктор экономических наук, профессор.

ОСТРИКОВ Валерий Васильевич – председатель редакционного совета, главный редактор журнала, врио директора ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук

ЦОЙ Юрий Алексеевич – генеральный директор научно-производственного предприятия «Фемакс» (Москва), член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации

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

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: Остриков В.В; заместители главного редактора: Корнев А.Ю., Сазонов С.Н.

№ 2 (44). Дата выхода в свет 30.04.2020. Тираж - 100 экз. Свободная цена. Подписной индекс 25196.

Адрес редакции и издателя: 392022, Тамбовская область, 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 область, г. Тамбов, ул. Кленовая, д. 24. e-mail: studiapechati@bk.ru.

Печатное издание журнал «Наука в Центральной России» зарегистрировано в Федеральной службе 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», 2020

«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ» «SCIENCE IN THE CENTRAL RUSSIA»

Научно-производственный периодический журнал **The research-production periodic magazine**
Включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в международную базу данных Agris
№ 2 (44), 2020 г.

Основанв 2012 г. **It is based in 2012.**
Выходит 6 раз в год **There are 6 times a year**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА
«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ»

05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства

АНАШКИН Александр Витальевич – заведующий лабораторией управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве ФГБНУ ВНИИТиН, кандидат технических наук

ВЕДИЩЕВ Сергей Михайлович – заведующий кафедрой «Агроинженерия» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент

ДОРОВСКИХ Владимир Иванович – заведующий лабораторией управления качеством технологических процессов в животноводстве ФГБНУ ВНИИТиН, кандидат технических наук, доцент

ЕРОХИН Геннадий Николаевич – заведующий лабораторией эксплуатационных требований к сельскохозяйственной технике ФГБНУ ВНИИТиН, кандидат технических наук

КАПУСТИН Василий Петрович – профессор кафедры «Агроинженерия» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор

ОЖЕРЕЛЬЕВ Виктор Николаевич – профессор кафедры «Технические системы в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве» ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет», доктор сельскохозяйственных наук, профессор

ОРОБИНСКИЙ Владимир Иванович – декан агроинженерного факультета, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины, тракторы и автомобили» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доктор сельскохозяйственных наук, профессор

РОДИОНОВ Юрий Викторович – заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор

ТИШАНИНОВ Николай Петрович – главный научный сотрудник лаборатории управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор

ШАЦКИЙ Владимир Павлович – заведующий кафедрой «Математики и физики» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доктор технических наук, профессор

ШВАРЦ Анатолий Адольфович – профессор кафедры «Стандартизации и оборудования перерабатывающих производств» ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова», доктор сельскохозяйственных наук, профессор.

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

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

ВАСИЛЕНКО Владимир Васильевич – профессор кафедры «Сельскохозяйственные машины, тракторы и автомобили» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», доктор технических наук, профессор

КНЯЗЕВА Лариса Геннадьевна – ученый секретарь ФГБНУ ВНИИТиН, доктор химических наук, доцент

КОРНЕВ Алексей Юрьевич – заместитель главного редактора журнала, заместитель директора ФГБНУ ВНИИТиН по научной работе, кандидат технических наук

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

МАШКОВ Алексей Николаевич – ведущий научный сотрудник лаборатории альтернативных источников энергии взамен жидкого топлив ФГБНУ ВНИИТиН, кандидат технических наук

НАГОРНОВ Станислав Александрович – главный научный сотрудник лаборатории организации нефтехозяйств и экономного расходования нефтепродуктов ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор

ПЕТРАШЕВ Александр Иванович – заведующий лабораторией организации хранения и защиты техники от коррозии ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук

САЗОНОВ Сергей Николаевич – заместитель главного редактора журнала, главный научный сотрудник лаборатории использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор

САФОНОВ Валентин Владимирович – заведующий кафедрой «Технический сервис и технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.В.Вавилова», доктор технических наук, профессор

ШУВАЛОВ Анатолий Михайлович – заведующий лабораторией использования альтернативных источников энергии ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор

© «Наука в центральной России», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Ведищев С.М., Завражнов А.И., Прохоров А.В., Бралиев М.К.
ОБОСНОВАНИЕ ГАБАРИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОБИЛЬНОГО КОРМОРАЗДАТЧИКА.... 5
Доровских Д.В., Глазков Ю.Е.
ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ПОЕЗДА 16
Ларюшин Н.П., Ванин Д.В., Шумаев В.В., Шуков А.В., Кирюхина Т.А.
ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОШНИКА ДЛЯ ПОСЕВА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР С НАПРАВИТЕЛЕМ ПОТОКА И ГАСИТЕЛЕМ СКОРОСТИ СЕМЯН 22
Ларюшин Н.П., Родин А.С., Шуков А.В., Шумаев В.В., Кирюхина Т.А.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА СЕЯЛКИ СО СПЛОШНЫМ ПОКРЫТИЕМ КЛАПАНА ИЗ РЕЗИНЫ С ШИПАМИ..... 29
Ерохин Г.Н., Коновский В.В.
ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ЖАТКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА 35
Тишанинов Н.П.
О ПРОДУКТИВНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ..... 42
Тишанинов К.Н.
ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПНЕВМОСЕПАРИРОВАНИЯ ЗЕРНА 52
Зазуля А.Н., Бышов Н.В., Макарова О.В., Гаспарян С.В., Борычев С.Н., Макаров В.А.
ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ И КООРДИНАЦИЯ В СЕВООБОРОТНОЙ ЗАДАЧЕ С РЕСУРСНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО УДОБРЕНИЯМ 58
Шварц А.А., Шварц С.А., Секретарев А.П., Ветров И.Ю.
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗА ПО РАБОЧЕМУ ОРГАНУ ЛОПАСТНОГО РАЗБРАСЫВАТЕЛЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ УДОБРЕНИЙ 65
Романенкова М.С., Балабанов В.И.
ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ 74
Петрашев А.И.
ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ КОНСЕРВАЦИОННОГО СОСТАВА 83
Шувалов А.М., Машков А.Н., Чернов Д.С.
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛО– МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОИСПОЛЬЗУЮЩЕМ КОРМОВАРОЧНОМ КОТЛЕ С САМОРЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ..... 93
Остриков В.В., Нагдаев В.К., Забродская А.В., Кошелев А.В.
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И ХАРАКТЕРИСТИК МОТОРНОГО МАСЛА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО СВОЙСТВ В ДВС И СРОК СЛУЖБЫ 99
Нагдаев В.К., Жерновников Д.Н., Остриков В.В.
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК МАСЕЛ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА 104
Шулаев Г.М., Милушев Р.К., Энговатов В.Ф.
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТКОРМА СВИНЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ 111
Симонов Г.А., Никифоров В.Е., Сереброва И.С., Иванова Д.А., Филиппова О.Б.
ВЛИЯНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО ДОЕНИЯ НА КАЧЕСТВО МОЛОКА..... 117

CONTENTS

Vedishchev S., Zavrazhnov A., Prokhorov A., Braliev M.
JUSTIFICATION OF DESIGN PARAMETERS OF THE FEEDER 5
Dorovskikh D., Glazkov Y.
INVESTIGATION OF THE STABILITY OF ROAD TRAINS 16
Laryushin N., Vanin D., Shumaev V., Shukov A., Kiryukhina T.
LABORATORY STUDIES OF A COULTER FOR SOWING GRAIN CROPS WITH A FLOW GUIDE AND A SEED SPEED SUPPRESSOR 23
Laryushin N., Rodin A., Shukov A., Shumaev V., Kiryukhina T.
THE ORETICAL STUDIES OF THE SEEDING APPARATUS OF A SEEDER WITH A SOLID COVER OF A VALVE MADE OF RUBBER WITH SPIKES 29
Erokhin G., Konovskiy V.
IMPACT OF THE WIDTH OF THE HEADER ON THE PRODUCTIVITY OF THE COMBINE HARVESTER 36
Tishaninov N.
ABOUT PRODUCTIVITY OF THEORETICAL RESEARCHES OF COMPLEX TECHNOLOGICAL PROCESSES 43
Tishaninov K.
PROBLEMS OF MODERN POST-HARVEST GRAIN CLEANING 52
Zazulya A., Byshov N., Makarova O., Gasparyan S., Borychev S., Makarov V.
MODEL OF HIERARCHICAL DECOMPOSITION AND COORDINATION IN TASKS WITH RESOURCE RESTRICTIONS ON FERTILIZERS IN THE PRODUCTION OF GRAIN CROPS 59
Schwartz A., Schwartz S., Secretarev A., Vetrov I.
MATHEMATICAL DEPENDENCES OF THE MOVEMENT OF CARGO ON THE WORKING BODY OF THE BLADE SPREADER OF GRANULAR FERTILIZERS 65
Romanenkova M., Balabanov V.
APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN PLANT CROPS 74
Petrashev A.
HYDRAULIC BASES OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR APPLICATION OF CONSERVATION COMPOSITION 83
Shuvalov A., Mashkov A., Chernov D.
MATHEMATICAL MODEL OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES IN A GAS-USED FEEDING AND COOKING BOILER WITH POWER SELF-REGULATION 93
Ostrikov V., Nagdaev V., Zabrodskaya A., Koshelev A.
ASSESSMENT OF INFLUENCE OF QUALITY OF DIESEL FUEL AND CHARACTERISTICS OF MOTOR OIL ON CHANGE OF ITS PROPERTIES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES AND SERVICE LIFE 100
Nagdaev V., Zhernovnikov D., Ostrikov V.
RESULTS OF RESEARCHES OF PROPERTIES AND CHARACTERISTICS OF OILS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS 104
Shulaev G., Milushev R., Engovatov V.
PERFECTION TECHNOLOGY OF FEEDING PIGS FOR IMPROVEMENT THEY ARE PRODUCTION QUALITY 112
Simonov G., Nikivorov V., Serebrova I., Ivanova D., Filippova O.
INFLUENCE OF ROBOTIZED MILKING ON QUALITY OF COW MILK 118

УДК 631.171
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-5-15

ОБОСНОВАНИЕ ГАБАРИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ МОБИЛЬНОГО КОРМОРАЗДАТЧИКА

[1]Ведищев Сергей Михайлович
[123]Завражнов Анатолий Иванович
[1]Прохоров Алексей Владимирович
[4]Бралиев Майдан Кабатаевич

[1]ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
[2]ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»
[3]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»
[4]НАО «Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана»

Реферат. *Применение кормораздатчиков ограниченной мобильности с ходовой частью на пневматических колесах в помещениях с многорядным содержанием животных позволяет раздавать корма без нарушения параметров микроклимата. Рассмотрены условия маневрирования кормораздатчика внутри помещения поворотом управляемых колес, установленных на ведомом валу или с помощью ведущих колес, установленных на поворотном кругу. Установлено, что при маневрировании кормораздатчика при помощи поворота управляемых ведомых колес необходимо учитывать базу кормораздатчика и угол поворота управляемых колес. На возможность маневрирования влияют колесная база, величина переднего и заднего свесов, условия взаимодействия колес с дорогой. Сила сцепления управляемых колес с дорогой зависит от веса кормораздатчика и коэффициента сцепления управляемых колес с дорогой. Получены аналитические выражения, связывающие ширину кормового прохода и конструктивные параметры ходовой части кормораздатчика, а также минимального и максимального радиуса поворота. При маневрировании кормораздатчика с помощью ведущих колес, установленных на поворотном круге выделены три этапа: вращение только поворотного круга относительно рамы кормораздатчика; поворот рамы кормораздатчика под действием одного ведущего колеса вокруг одного заблокированного управляемого колеса; реверсивное вращение поворотного круга относительно рамы кормораздатчика под действием одного ведущего колеса с последующей фиксацией поворотного круга относительно рамы кормораздатчика. Получены аналитические выражения для определения размеров разворотной площадки, имеющей прямоугольную форму при маневрировании кормораздатчика. Определено, что при замене кормораздатчика КС-1,5 на мобильный кормораздатчик с ходовой частью на пневматически колесах при маневрировании управляемыми колесами, ширина разворотной площадки должна быть более 5 метров, а при маневрировании управляемыми колесами за счет ведущих колес, установленных на поворотном круге, достаточно размера разворотной площадки 2,9 метра.*

Ключевые слова: *кормораздатчик, поворотный круг, радиус поворота, схема поворота, управляемые колёса, ходовая часть.*

JUSTIFICATION OF DESIGN PARAMETERS OF THE FEEDER

[1]Vedishchev Sergei
[123]Zavrazhnov Anatoly
[1]Prokhorov Alexey
[4]Braliev Maidan

[1]FSBEI HE "Tambov State Technical University"
[2]FSBEI HE "Michurinsk State Agrarian University"
[3]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"
[4]Non profit JSC "Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University"

Abstract. *The use of feeders of limited mobility with a running gear on pneumatic wheels in rooms with multi-row keeping of animals allows to distribute feed without violating the microclimate. The*

conditions for maneuvering the feeder indoors by turning the steered wheels mounted on the driven shaft or using the drive wheels mounted on the turntable are considered. It was found that when maneuvering the feeder by turning the steered driven wheels, it is necessary to take into account the base of the feeder and the angle of rotation of the steered wheels. Wheelbase, the size of the front and rear overhangs, the conditions of interaction of the wheels with the road affect the possibility of maneuvering. The grip strength of the steered wheels depends on the weight of the feeder and the coefficient of traction on the steered wheels. Analytical expressions relating the width of the aft passage and the design parameters of the chassis of the feeder, as well as the minimum and maximum turning radius, were obtained. Three stages are highlighted when maneuvering the feeder using the drive wheels mounted on the turntable: rotation of the turntable only relative to the frame of the feeder; rotation of the feeder frame under the action of one drive wheel around one locked steered wheel; reverse rotation of the turntable relative to the feeder frame under the action of one drive wheel, followed by fixation of the turntable relative to the feeder frame. Analytical expressions are obtained for determining the dimensions of a headland having a rectangular shape when maneuvering the feeder are received. It was determined that when replacing the feed dispenser KS-1.5 with a mobile feed dispenser with a running gear on pneumatic wheels when maneuvering with controlled wheels, the width of the headland should be more than 5 meters, and when maneuvering with controlled wheels due to the drive wheels mounted on the turntable, it is enough the size of the headland is 2.9 meters.

Keywords**:** *the feeder, the turntable, the turning radius, the scheme of rotation, a driven wheel, suspension.*

Введение. При содержании животных в помещениях с несколькими линиями кормораздачи наиболее эффективно применение мобильных кормораздающих средств [1, 7, 8]. Двигатели внутреннего сгорания, применяемые на самоходных кормораздатчиках, нарушают микроклимат внутри помещения [6]. Применение кормраздатчиков ограниченной мобильности позволяет раздавать корма животным без нарушения микроклимата в помещении, но при этом возрастает металлоемкость из-за применения рельсовых направляющих, а для переезда с одной линии кормораздачи на другую в пределах одного помещения требуется монтаж дополнительных устройств, например поворотных кругов [6].

Для устранения названных недостатков при раздаче кормов животным в помещениях с несколькими линиями кормораздачи эффективно применение корморазадтчиков на пневматических колесах с электромеханическим приводом на ведущем валу и рулевым управлением на ведомом валу [4].

При проектировании ходовой части кормораздатчиков с ходовой частью на пневматических колесах необходимо учитывать условия для маневрирования, такие как конструктивные параметры ходовой части кормораздатчика, ширина кормовых проходов, управляемость и др.

Материалы и методы. У предлагаемой ходовой части кормораздатчика различают два способа поворота: поворотом управляемых колес, установленных на ведомом валу и с помощью ведущих колес, установленных на поворотном кругу [2, 3, 5].

Рассмотрим условия маневрирования поворотом управляемых ведомых колес 1 (рисунок 1).

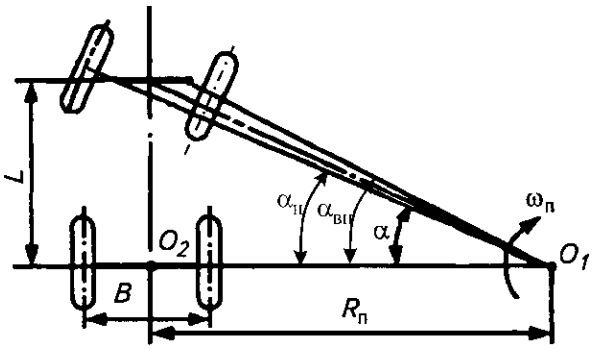


Рисунок 1 – Кинематика поворота кормораздатчика с передними управляемыми колесами

Точка O_1 представляет собой центр вращения. Расстояние от центра вращения O_1 до оси заднего моста кормораздатчика определим по выражению

$$R_п = L \cdot ctg\alpha, \quad (1)$$

где $R_п$ - радиус поворота, м;

L - база кормораздатчика, м;

α - угол поворота управляемых колес, град.

В осуществлении поворота большое значение имеет взаимодействие колес с дорогой. Поворот возможен в случае, если сцепление управляемых колес с дорогой больше толкающего усилия 2 (рисунок 2).

$$P_{сц} \geq P_к, \quad (2)$$

где $P_{сц}$ - усилие сцепления колес с дорогой, Н;

$P_к$ - касательная сила тяги на ведущих колесах, Н.

Сила сцепления зависит от коэффициента сцепления управляемых колес с дорогой и веса, кормораздатчика, приходящегося на эти колеса

$$P_{сц} = G_п \cdot g \cdot \varphi_к, \quad (3)$$

где $G_п$ - масса кормораздатчика, приходящаяся на управляемые колеса, кг;

$\varphi_к$ - коэффициент сцепления управляемых колес с поверхностью качения.

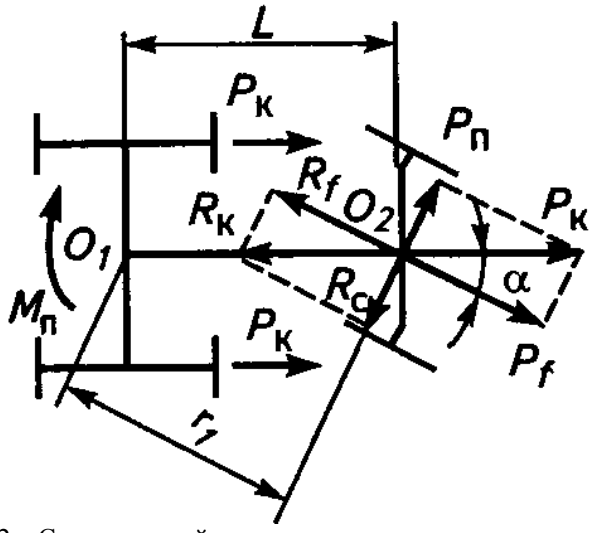


Рисунок 2 – Схема сил, действующих на управляемые ведомые колеса

Касательная сила тяги на ведущих колесах передается на пятно контакта управляемых колес с поверхностью качения. Равнодействующая этих реакций равна толкающей силе, т. е.

$$P_к = R_к, \quad (4)$$

где $R_к$ - реакция управляемых колес с поверхностью качения, Н.

Реакцию, $R_к$, разложим на две составляющие (рисунок 2): R_f - действующую в вертикальной плоскости передних колес и R_c - перпендикулярно к ней. Составляющая R_f активной силы $P_к$ затрачивается на преодоление силы сопротивлению качению колес, а составляющая реакции R_c создает на плече r_1 поворачивающий момент M_n кормораздатчика вокруг точки O_1. т. е.

$$M_n = R_c \cdot r_1 = R_c \cdot L \cdot \cos\alpha = P_к \cdot L \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha. \quad (5)$$

Из рисунка 2 видно, что $P_f = P_к \cdot \cos\alpha$. Откуда

$$P_к = \frac{P_f}{\cos\alpha}. \tag{6}$$

Подставим (3) и (6) в (2) и выразим угол поворота управляемых колес α

$$\alpha \geq \arccos\left(\frac{P_f}{G_n \cdot g \cdot \varphi_к}\right) = \arccos\left(\frac{f_к}{\varphi_к}\right), \tag{7}$$

где $f_к = \dfrac{P_f}{G_n \cdot g}$ - коэффициент сопротивления перекатыванию управляемых колес.

Подставим (7) в (1), выразим L. После преобразования получим выражения для определения размеров базы ходовой части кормораздатчика от типа колеса и поверхности перекатывания

$$L \geq R_n \cdot tg\left(\arccos\frac{f_к}{\varphi_к}\right). \tag{8}$$

Рассмотрим схему поворота кормораздатчика внутри помещения (рисунок 3)

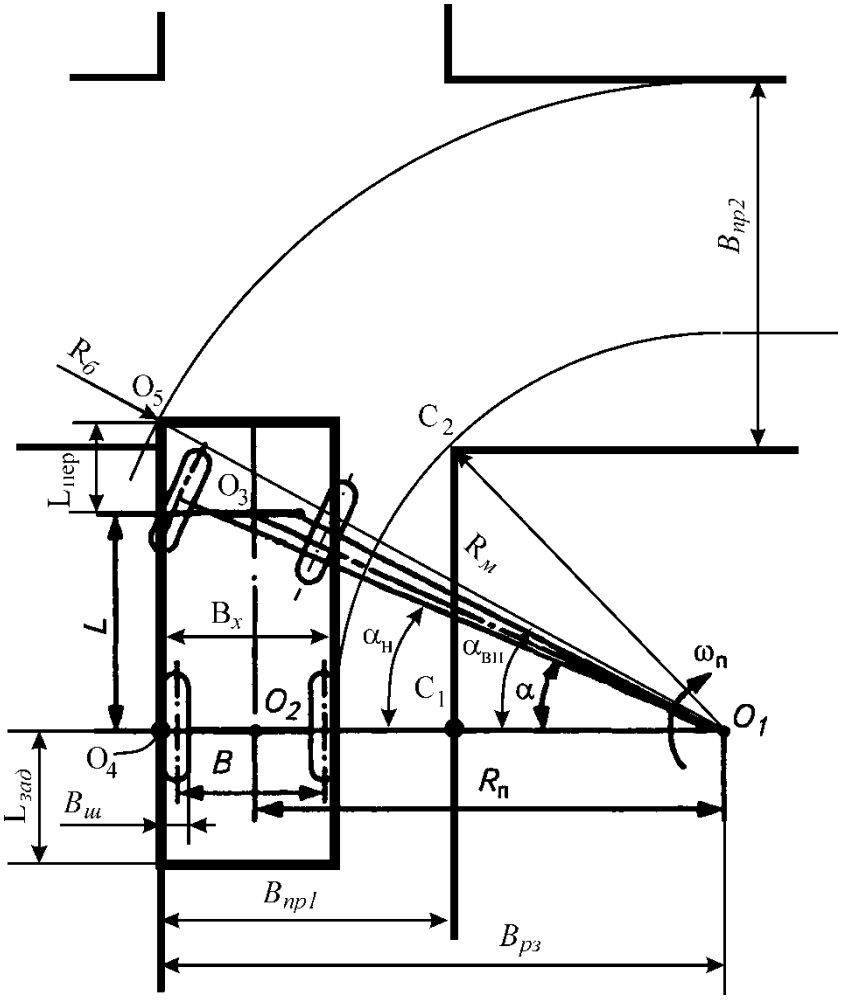


Рисунок 3 – Схема поворота кормораздатчика внутри помещения при помощи управляемых колес

Выразим радиус поворота кормораздатчика, R_n, через длину, L, его базы. Расстояние $|O_2O_3| = L$, $|O_1O_2| = R_n$. Из треугольника $O_1O_2O_3$ запишем соотношение

$$\frac{|O_2O_3|}{\sin\alpha} = \frac{|O_1O_2|}{\cos\alpha} \Rightarrow |O_1O_2| = |O_2O_3| \cdot ctg\,\alpha \tag{9}$$

Произведем замену

$$L = R_n \cdot ctg\,\alpha\,. \tag{10}$$

Найдем расстояние $|O_1O_4|$. Из рисунка 3

$$|O_1O_4| = R_n + \frac{B_x}{2}\,. \tag{11}$$

Найдем расстояние $|O_4O_5|$:

$$|O_4O_5| = L + L_{\text{пер}}\,, \tag{12}$$

где $L_{\text{пер}}$ - величина переднего свеса, м.

Найдем наружный радиус поворота по внешнему габариту кормораздатчика. Так как $|O_1O_5| = R_{\text{б}}$. Из прямоугольного треугольника $O_1O_4O_5$ найдем длину гипотенузы $|O_1O_5|$

$$|O_1O_5|^2 = |O_1O_4|^2 + |O_4O_5|^2\,. \tag{13}$$

Подставим (11) и (12) в (13). Заменим $|O_1O_5|$ и выразим $R_{\text{б}}$

$$R_{\text{б}} = \sqrt{\left(R_n + \frac{B_x}{2}\right)^2 + \left(L + L_{\text{пер}}\right)^2}\,. \tag{14}$$

Найдем минимальный радиус поворота (траектория точки габарита ходовой части, находящейся ближе всего к центру поворота). Из рисунка 3

$$R_{\text{м}} = R_n - \frac{\text{B}_{\text{x}}}{2}\,, \tag{15}$$

где $R_{\text{м}}$ - минимальный радиус поворота, м.

Найдем расстояние $|O_1C_1|$

$$|O_1C_1| = R_n + \frac{B_x}{2} - B_{\text{пр1}}\,. \tag{16}$$

Из прямоугольного треугольника $O_1C_1C_2$ найдем расстояние $|C_1C_2|$ по теореме Пифагора

$$|C_1C_2| = \sqrt{R_{\text{м}}{}^2 - |O_1C_1|^2}\,. \tag{17}$$

Подставим (16) в (17) и получим

$$|C_1C_2| = \sqrt{R_{\text{м}}{}^2 - \left(R_n + \frac{B_x}{2} - B_{\text{пр1}}\right)^2}\,. \tag{18}$$

Ширина второго прохода выразится

$$B_{\text{пр2}} = R_{\text{б}} - |C_1C_2|\,. \tag{19}$$

Подставим (14) и (18) в (19), а в полученное выражение формулы (14) и (15). После преобразования получим

$$B_{\text{пр2}} = \sqrt{B_{\text{рз}}{}^2 + \left(L + L_{\text{пер}}\right)^2} - \sqrt{B_{\text{рз}}{}^2 - \left(B_{\text{рз}} - B_{\text{пр1}}\right)^2}\ , \qquad (20)$$

где $B_{\text{рз}} = R_n - \dfrac{\text{B}_{\text{x}}}{2}$.

Рассмотрим способ маневрирования кормораздатчика с помощью ведущих колес, установленных на поворотном круге.

Определим размеры разворотной площадки и ширины кормового прохода во втором случае. Разворот, в этом случае, осуществляется при помощи одного включенного ведущего колеса при одном заблокированном управляемом колесе.

Процесс разворота состоит из следующих этапов.

1-ый этап (рисунок 4). При включении только одного ведущего колеса происходит вращение поворотного круга. Предположим, что у нас подключено колесо *D*. При включении привода колесо из точки *D* вместе с поворотным кругом перемесится в точку D_1, а второе колесо ведущей пары из точки *C* в точку C_1.

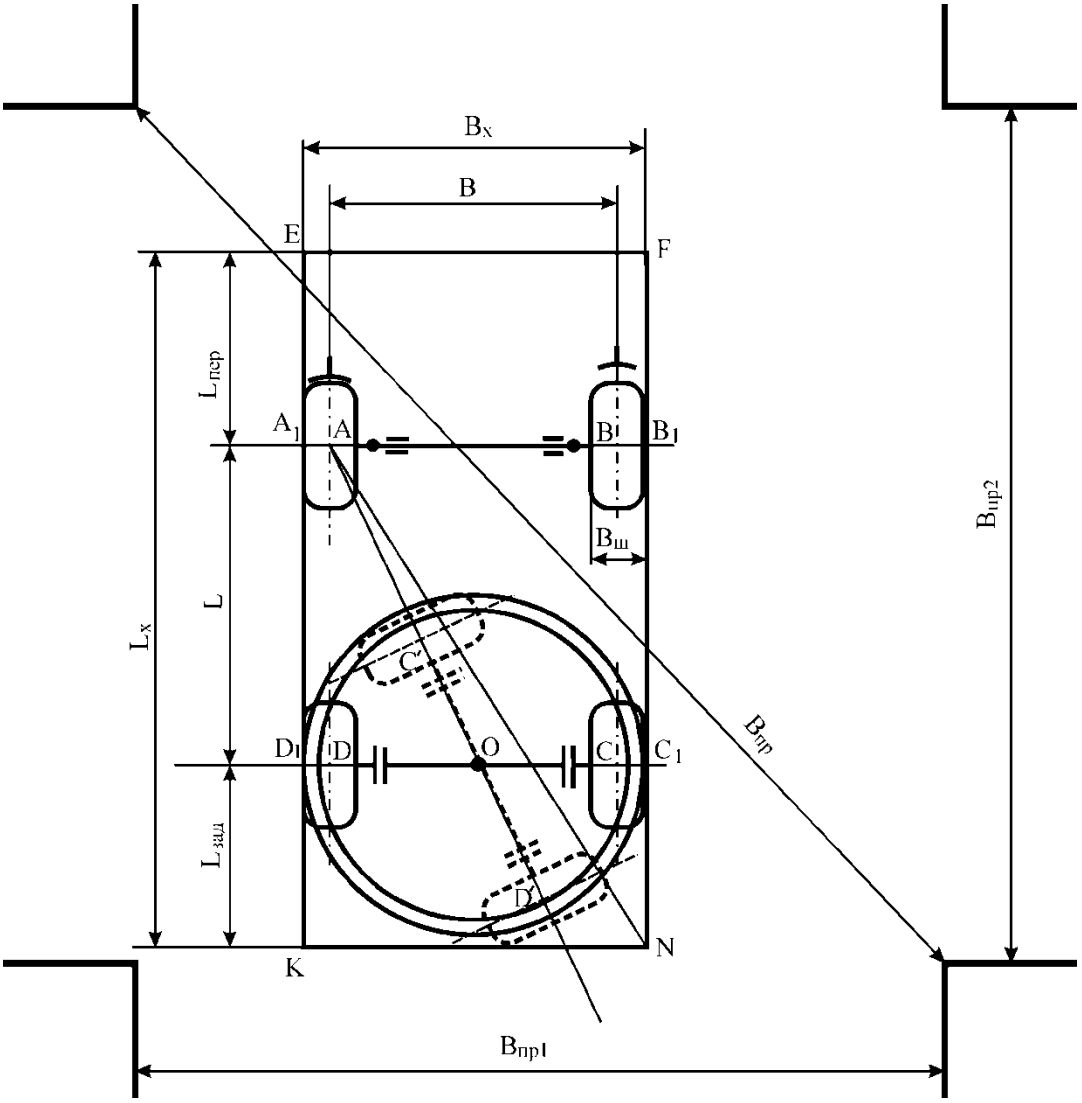


Рисунок 4 – Схема разворота кормораздатчика по второму варианту (1-ый этап)

2-ой этап (рисунок 5). Поворотный круг фиксируется и под действием касательной силы тяги на одном ведущем колесе начинает поворачиваться вся рама кормораздатчика вокруг одного заблокированного колеса (точка *A*). При этом ведущее колесо (точка D') перемещается в новое положение (точка D'') и соответственно рама кормораздатчика (*E*, *F*, *N*, *K*) при повороте перемещается в новое положение (E'', F'', N'', K'').

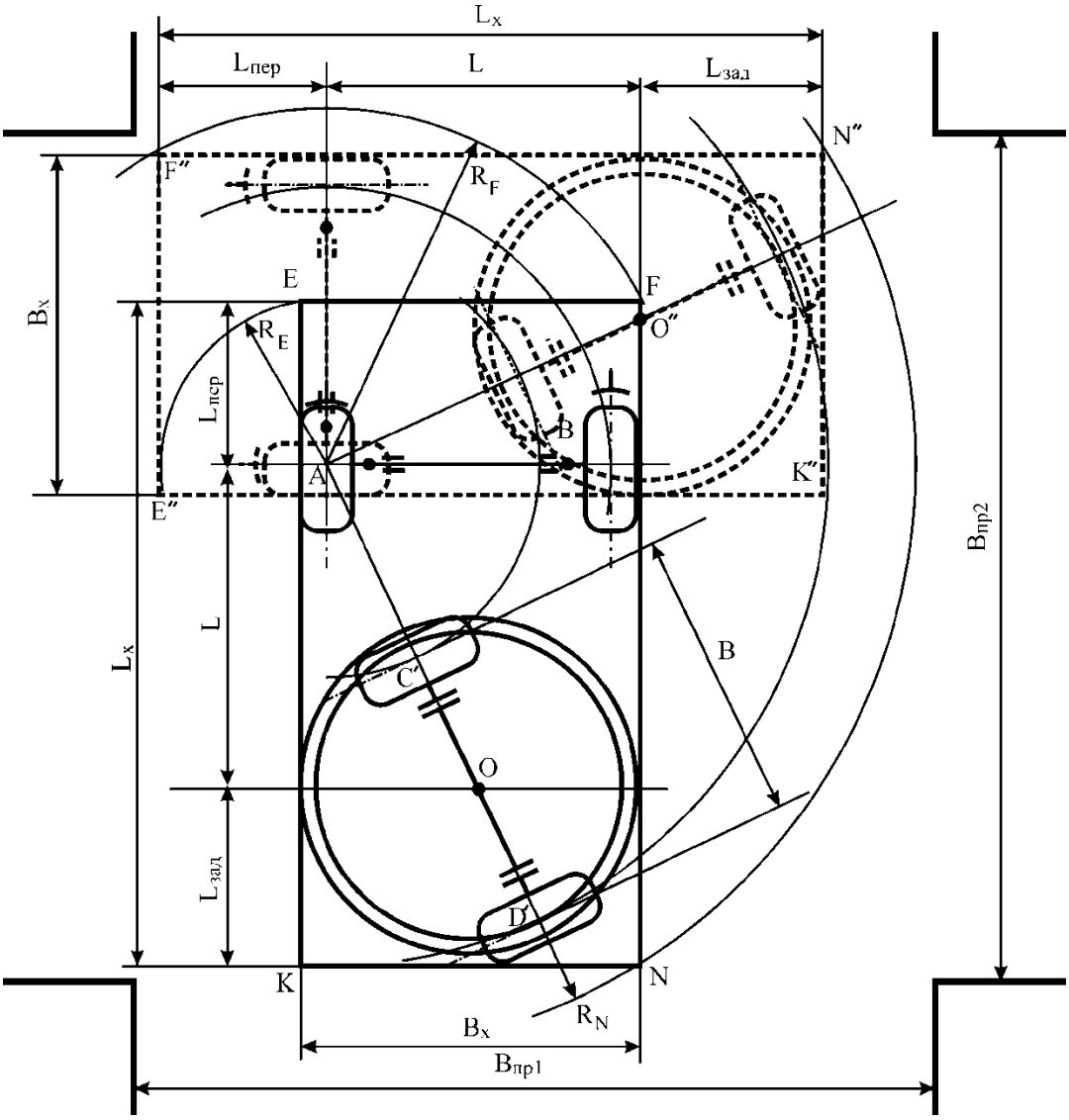


Рисунок 5 – Схема разворота кормораздатчика по второму варианту (2-ый этап)

3-ий этап (рисунок 6). Ведущее колесо (точка D'') включается на реверс и за счет касательной силы тяги, создаваемой ведущим колесом (точка D'') при заблокированном управляемом колесе (точка *A*) происходит поворот пары ведущих колес вместе с поворотным кругом вокруг точки O''. Ведущее колесо (точка D'') из ведущей пары колес перемещается в положение D''', а второе колесо (точка C'') перемещается в положение C'''. Затем происходит фиксация поворотного круга относительно рамы кормораздатчика. Кормораздатчик готов для движения в новом направлении.

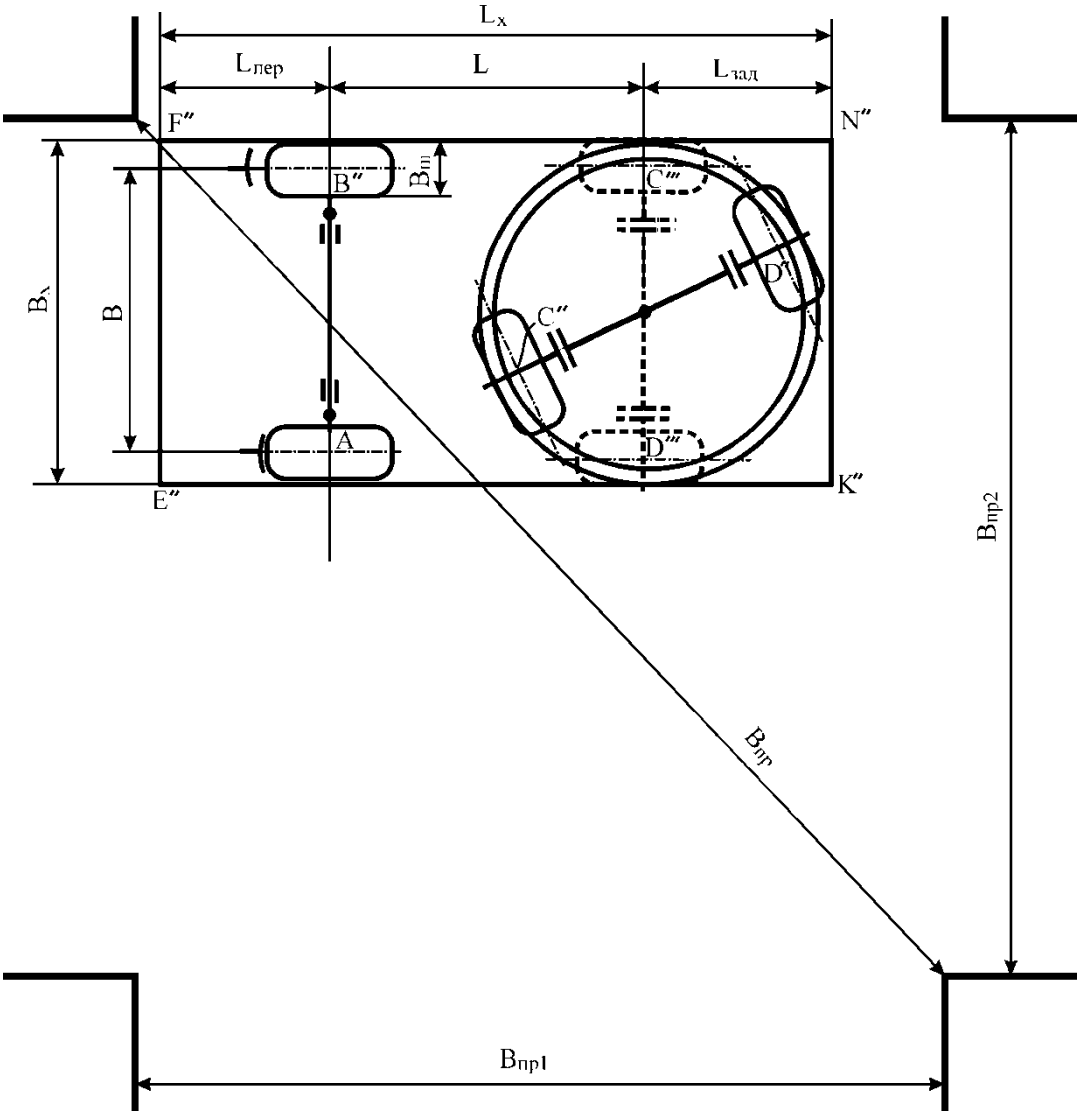


Рисунок 6 – Схема разворота кормораздатчика по второму варианту (3-ый этап)

Из рисунка 4 запишем

$$\left|AB_1\right| = B_x - B_{ш}, \tag{21}$$

$$\left|B_1N\right| = L + L_{зад} \tag{22}$$

$$\left|AN\right| = R_N. \tag{23}$$

В прямоугольном треугольнике AB_1N расстояние $\left|AN\right|$ является диагональю. По теореме Пифагора

$$\left|AN\right| = R_N = \sqrt{\left|AB_1\right|^2 + \left|B_1N\right|^2}. \tag{24}$$

Подставим (21), (22) и (23) в (24)

$$R_N = \sqrt{\left(B_x - B_{ш}\right)^2 + \left(L + L_{зад}\right)^2}, \tag{25}$$

где $L_{зад}$ - величина заднего свеса, м;

R_N - габаритный радиус поворота кормораздатчика (точка *N*) вокруг центра поворота (точка *A*), м.

В прямоугольном треугольнике AA_1E расстояние $|AE|$ является диагональю. Тогда

$$|AE| = \sqrt{|AA_1|^2 + |A_1E|^2}\ . \tag{26}$$

Расстояние $|AE| = R_E$, $|A_1A| = B_ш$, $|A_1E| = L_{пер}$. Произведем подстановку этих значений в (26) и получим

$$R_E = \sqrt{B_ш{}^2 + L_{пер}{}^2}\ , \tag{27}$$

где R_E - радиус поворота точки *E* при повороте вокруг точки *A*, м;

$L_{пер}$ - величина переднего свеса кормораздатчика, м.

Для разворотной площадки, имеющей прямоугольную форму, из рисунка 4 запишем

$$B_{пр} = \sqrt{B_{пр1}{}^2 + B_{пр2}{}^2}\ . \tag{28}$$

Примем что $\dfrac{B_{пр2}}{B_{пр1}} = k_{пр}$.

Откуда

$$B_{пр2} = B_{пр1} \cdot k_{пр}\,, \tag{29}$$

где $k_{пр}$ - коэффициент отношения размеров проходов.

Подставим (29) в (28)

$$B_{пр} = \sqrt{B_{пр1}{}^2 + \left(B_{пр1} \cdot k_{пр}\right)^2} = B_{пр1}\sqrt{1 + k_{пр}{}^2}\ . \tag{30}$$

Для того, чтобы кормораздатчик при развороте не зацепил ограждения прохода необходимо чтобы выполнялось условие

$$B_{пр} \geq R_N + R_E\,. \tag{31}$$

Подставим (25), (27) в (31)

$$B_{пр} \geq \sqrt{\left(B_x - B_ш\right)^2 + \left(L + L_{зад}\right)^2} + \sqrt{B_ш{}^2 + L_{пер}{}^2}\ . \tag{32}$$

Подставим (30) в (32). После преобразования получим выражения для определения ширины кормового прохода в зависимости от конструктивных параметров кормораздатчика и кинематических параметров разворота

$$B_{пр1} \geq \frac{\sqrt{\left(B_x - B_ш\right)^2 + \left(L - L_{зад}\right)^2} + \sqrt{B_ш{}^2 + L_{пер}{}^2}}{\sqrt{1 + k_{пр}{}^2}}\ . \tag{33}$$

Подставим (33) в (29)

$$B_{пр2} \geq k_{пр} \cdot \frac{\sqrt{\left(B_x - B_ш\right)^2 + \left(L - L_{зад}\right)^2} + \sqrt{B_ш{}^2 + L_{пер}{}^2}}{\sqrt{1 + k_{пр}{}^2}}\ . \tag{34}$$

При этом необходимо, чтобы дополнительно выполнялись условия

$$B_{пр1} \geq L_х = L_{пер} + L + L_{зад}\,, \tag{35}$$

$$B_{пр2} \geq L_{зад} + L - B_ш + B_x\,. \tag{36}$$

Результаты и обсуждение. На фермах и комплексах находят применение следующие системы содержания свиней: индивидуальное и групповое содержание холостых и супоросных свиноматок, содержание поросят-отьемышей в групповых станках, групповое содержание откормочного поголовья. Для обслуживания животных находят применение кормораздатчики ограниченной мобильности, перемещающиеся по рельсовым направляющим воль кормового прохода. Каждую линию кормораздачи обслуживает один кормораздатчик. Выход из строя кормораздатчика приводи к срыву в кормлении из-за невозможности переезда и резервирования кормораздающего средства. Кормовые проходы соединены поперечным проходом. Ширина кормового прохода составляет от 1,2 до 1,3 м.

При замене кормораздатчика КС-1,5 на мобильный кормораздатчик с ходовой частью на пневматически колесах при маневрировании управляемыми колесами, расчет по выражениям (1)-(20) показывают необходимость ширины разворотной площадки более 5 метров. При маневрировании за счет ведущих колес, установленных на поворотном круге, достаточно размера разворотной площадки 2,9 метра.

Заключение. Таким образом, можно определить конструктивные параметры ходовой части кормораздатчика. При этом ширина кормовых проходов при развороте с использованием ходовой части на пневматических колесах с управляемыми колесами на ведомом валу и ведущей парой колес, установленной на поворотном круге, требует меньших площадей для разворота, что позволяет более эффективно использовать площадь животноводческого помещения при содержании животных. Полученные выражения позволяют определить необходимую ширину ходовой части кормораздатчика на пневматических колесах при реконструкции животноводческих помещений или проектировать размеры разворотной площадки и кормовых проходов для заданного кормораздатчика.

Список литературы

1. Ведищев С.М., Прохоров А.В., Милованов А.В., Милюков Н.О. Классификация бункерных коромраздатчиков для свиней // Вопросы современной науки и практики. Университет им В.И.Вернадского – 2014. – №2(51). – С.43-48.

2. Ведищев С.М., Прохоров А.В. Кормораздатчик с изменяющейся захватывающей способностью выгрузного шнека // Техника в сельском хозяйстве. – 2007. – №4. – С. 36-37.

3. Ведищев С.М., Балахонова Д.Н., Сорокин В.В., Гарина М.А. Кормораздатчик со шнековым дозатором с каналом обратного хода // Прогрессивные техника и технологии обеспечения эффективности АПК: сб. науч. тр. междунар. конф. – Тамбов: изд-во Першина Р.В. – 2015. – С.20-24.

4. Ведищев С.М., Завражнов А.И., Капустин В.П., Прохоров А.В. Методика оценки эффективности технологических линий приготовления и раздачи кормов // Наука в центральной России. – №6(36) – 2018. – С.35-42.

5. Ведищев С.М., Капустин В.П., Прохоров А.В., Кажияхметова А.А., Мамедова М.А. Обоснование рациональной схемы ходовой части мобильного кормораздатчика // Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России: Материалы Национальной научнопрактической конференции 22 ноября 2018 года. – Рязань: Издательство Рязанского государственного агротехнологического университета, 2019. – Часть 1. – С.118-123.

6. Техническое обеспечение животноводства: учебник / А.И. Завражнов, С.М. Ведищев, М.К. Бралиев, А.В. Китун, В.И. Передня, Н.Н.Романюк, и др.; под общ ред. А.И. Завражнова. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. — 516 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/108449.

7. Технологические процессы и оборудование, применяемые при интенсивном разведении свиней: науч. аналит. обзор / В.Ф. Федоренко, Н.П. Мишуров, Т.Н. Кузьмина А.В. Трифанов, В.И. Базыкин, П.И. Гриднев, Т.Т. Гриднева, Ю.Ю. Спотару, М.В. Леонов, И.В. Щеголева. - М.: ФГБНУ «Роинформагротех», 2016. – 172 с.

8. Щедрин В.Т., Ведищев С.М., Теплякова Е.К. Auswahl der Variante des Futterausgebugssystem // Вестник ТГТУ. Тамбов. Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 1999. – Т. 5. – №4. – С. 643-650.

References

1. Vedishchev S.M., Prohorov A.V., Milovanov A.V., Milyukov N.O. Klassifikaciya bunkernyh koromrazdatchikov dlya svinej // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im V.I.Vernadskogo – 2014. – №2(51). – S.43-48.

2. Vedishchev S.M., Prohorov A.V. Kormorazdatchik s izmenyayushchejsya zahvatyvayushchej sposobnost'yu vygruznogo shneka // Tekhnika v sel'skom hozyajstve. – 2007. – №4. – S. 36-37.

3. Vedishchev S.M., Balahonova D.N., Sorokin V.V., Garina M.A. Kormorazdatchik so shnekovym dozatorom s kanalom obratnogo hoda // Progressivnye tekhnika i tekhnologii obespecheniya effektivnosti APK: sb. nauch. tr. mezhdunar. konf. – Tambov: izd-vo Pershina R.V. – 2015. – S.20-24.

4. Vedishchev S.M., Zavrazhnov A.I., Kapustin V.P., Prohorov A.V. Metodika ocenki effektivnosti tekhnologicheskih linij prigotovleniya i razdachi kormov // Nauka v central'noj Rossii. – №6(36) – 2018. – S.35-42.

5. Vedishchev S.M., Kapustin V.P., Prohorov A.V., Kazhiyahmetova A.A., Mamedova M.A. Obosnovanie racional'noj skhemy hodovoj chasti mobil'nogo kormorazdatchika // Prioritetnye napravleniya nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya agropromyshlennogo kompleksa Rossii: Materialy Nacional'noj nauchnoprakticheskoj konferencii 22 noyabrya 2018 goda. – Ryazan': Izdatel'stvo Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta, 2019. – CHast' 1. –S.118-123.

6. Tekhnicheskoe obespechenie zhivotnovodstva: uchebnik / A.I. Zavrazhnov, S.M. Vedishchev, M.K. Braliev, A.V. Kitun, V.I. Perednya, N.N.Romanyuk, i dr.; pod obshch red. A.I. Zavrazhnova. – Sankt-Peterburg : Lan', 2018. — 516 s. — Rezhim dostupa: https://e.lanbook.com/book/108449.

7. Tekhnologicheskie processy i oborudovanie, primenyaemye pri intensivnom razvedenii svinej: nauch. analit. obzor / V.F. Fedorenko, N.P. Mishurov, T.N. Kuz'mina A.V. Trifanov, V.I. Bazykin, P.I. Gridnev, T.T. Gridneva, YU.YU. Spotaru, M.V. Leonov, I.V. SHCHegoleva. - M.: FGBNU «Roinformagrotekh», 2016. – 172 s.

8. SHCHedrin V.T., Vedishchev S.M., Teplyakova E.K. Auswahl der Variante des Futterausgebugssystem // Vestnik TGTU. Tambov. Izd-vo Tamb. gos. tekhn. un-ta. – 1999. – T. 5. – №4. – S. 643-650.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ведищев Сергей Михайлович – доктор технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: serg666_65@mail.ru.

Завражнов Анатолий Иванович – академик РАН, доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: aiz@mgau.ru.

Прохоров Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: pav1981@bk.ru.

Бралиев Майдан Кабатаевич – кандидат технических наук, доцент ВАК Западно-Казахстанского аграрно-технического университета имени Жангир хана, Казахстан, г. Уральск, e-mail: aisheva.laura@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Vedischev Sergey – Full Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: serg666_65@mail.ru.

Zavrazhnov Anatoly – Academician of the Russian Academy of Sciences, Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk, e-mail: aiz@mgau.ru.

Prokhorov Alexei – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: pav1981@bk.ru.

Braliev Maidan – Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Higher Attestation Commission of the non profit JSC “Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University”, Uralsk, e-mail: aisheva.laura@mail.ru

Поступила в редакцию (Received): 23.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2020

УДК 621.113: 631.37
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-16-22

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ПОЕЗДА

[1]Доровских Дмитрий Владимирович
[1]Глазков Юрий Евгеньевич
[1]ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Реферат: *Автопоезд представляет собой сложную механическую систему, которая состоит из многих модулей и узлов, взаимодействующих между собой. Исследовали динамику движения торможения автопоезда в прямолинейном движении. Проводили математическое и компьютерное моделирование. При разработке компьютерной модели автопоезда использовали программный комплекс Universal Mechanism. В качестве объекта моделирования был выбран двухзвенный седельный автопоезд в составе двухосного автомобиля-тягача и трехосного полуприцепа категории N3 + O4. Компьютерная модель построена с использованием подхода системы твердых тел. При построении модели автопоезда все его элементы образованы в виде графических объектов, определены их параметры и заданы шарнирные и силовые связи между элементами. Исследования устойчивости движения автопоезда в тормозном режиме проведены при использовании разработанной компьютерной модели. Исходные данные для исследований принимались аналогично данных математического моделирования. Движение автомобильного поезда в тормозном режиме исследовалось на промежутке времени t = 5с, или до полной остановки автопоезда. В результате численного моделирования инструментом UM Simulation получены данные о положении звеньев автопоезда в каждый момент времени с шагом 0,025с в интервале 5с. Максимальное расхождение результатов исследования показателей устойчивости движения автопоезда в тормозном режиме с использованием математической и компьютерной моделей не превышает 10%, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели и достоверности результатов, полученных с ее использованием.*

Ключевые слова: *автопоезд, компьютерная модель, устойчивость, торможение*

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF ROAD TRAINS

[1]Dorovskikh Dmitriy
[1]Glazkov Yurij
[1]FSBEI HE "Tambov state technical university"

Abstract: *The road train is a complex mechanical system, which consists of many modules and nodes that interact with each other. The dynamics of the braking movement of the road train in rectilinear motion were investigated. Mathematical and computer modeling was performed. The Universal Mechanism software package was used to develop a computer model of the road train. A two-link truck train consisting of a two-axle tractor vehicle and a three-axle semi-trailer of the N3 + O4 category was selected as the object of simulation. A computer model is constructed using the solids system approach. When building a model, all elements of the road train are formed in the form of graphic objects, their parameters are determined, and articulated and power connections between the elements are specified. Studies of the stability of the road train in the braking mode were carried out using the developed computer model. The initial data for the studies were taken similarly to the data of mathematical modeling. The movement of an automobile train in the braking mode was studied for a period of time t = 5 s, or until the road train completely stopped. As a result of numerical modeling with the UM Simulation tool, the data on the position of the links of the road train at each moment in time with a step of 0.025 s in the interval of 5 s.The maximum discrepancy between the results of the study of road train stability indicators in braking mode using mathematical and computer models does not exceed 10%, which indicates the adequacy of the developed mathematical model and the reliability of the results obtained using it.*

Keywords: *road train, computer model, stability, braking*

Введение. Устойчивость движения автомобильных поездов в тормозном режиме зависит от их технического состояния и условий эксплуатации. Во время движения автопоездов, под влиянием дорожных условий, водителям иногда приходится прибегать к экстренному торможению. Хотя доля экстренных торможений незначительная, именно они определяют безопасность движения транспортных средств. По сравнению со служебными торможениями, экстренные более опасны, особенно при нервных тормозных силах на колесах осей автопоезда, поскольку могут привести к потере устойчивости транспортного средства. При торможении автопоезда с бортовой неравномерностью тормозных сил, возникает крутящий момент в горизонтальной плоскости, что может привести к заносу и отклонению автопоезда даже при незаблокированных колесах, а также повлечь составление звеньев. Значительное влияние на эксплуатационные свойства автопоездов и устойчивость в частности, оказывает также нарушение геометрии их ходовой части, особенно перекос осей [1].

Экспериментальная часть. Учитывая вышесказанное, возникла необходимость в проведении исследований устойчивости движения седельного двухзвенного автопоезда в тормозном режиме и разработки компьютерной модели автопоезда. Компьютерная модель разрабатывалась с помощью программного комплекса Universal Mechanism (ПК UM). Этот программный комплекс обладает удобным интерфейсом, включает в себя мощное универсальное ядро, отвечающее современным требованиям, а также ряд специализированных модулей, в частности UM Automotive, созданный для моделирования динамики автомобилей. В структуру Universal Mechanism входят два инструмента: UM Input, средствами которого осуществляется непосредственное построение компьютерной модели, и UM Simulation, который используется для исследования динамики разработанной модели.

В качестве объекта моделирования избран двухзвенный седельный автопоезд в составе двухосного автомобиля-тягача и трехосного полуприцепа категории N3 + O4. На рисунке 1 приведена его упрощенная динамическая модель, разработанная с использованием инструмента UM Input программной среды Universal Mechanism.

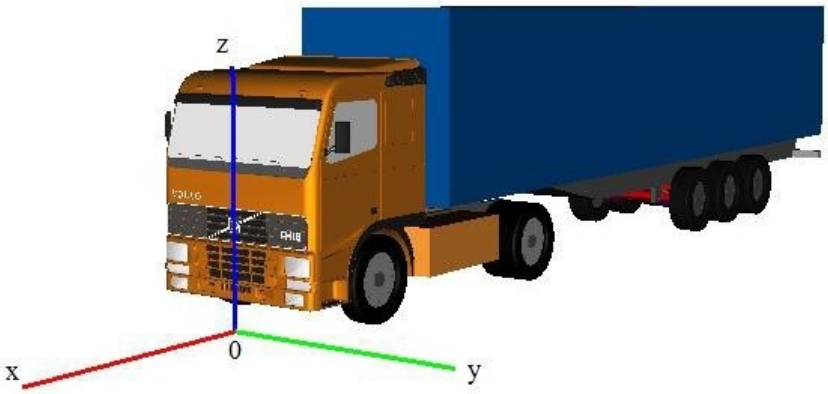


Рисунок 1 – Упрощенная динамическая модель автопоезда

При построении модели автопоезда все его элементы образованы в виде графических объектов, определены их параметры и заданы шарнирные и силовые связи между элементами.

Компьютерная модель построена с использованием подхода системы твердых тел. Согласно данному подходу, механическая система представляется как совокупность абсолютно твердых тел, связанных шарнирными связями и силовыми элементами. При построении модели использован метод подсистем, суть которого заключается в том, что при разработке модели, автопоезд представлен как совокупность двух подсистем - тягача и полуприцепа, которые объединены шарнирными и силовыми связями, характеризующими поведение звеньев автопоезда при исследовании динамики модели. Геометрические, инерционные и силовые характеристики элементов модели заданные с использованием совокупности идентификаторов, отдельно для каждой подсистемы, а также части, которые принадлежат обеим подсистемам.

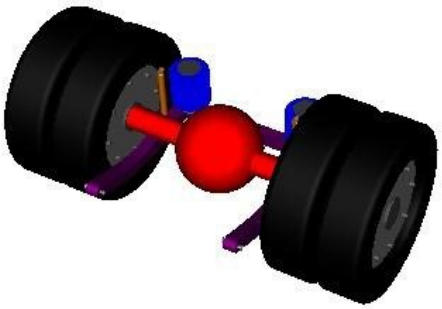
Одним из первых и наиболее важных этапов в разработке компьютерной модели является создание 3D-моделей элементов отдельных подсистем. В структуру модели включены

графические объекты, разработанные стандартными средствами программного комплекса Universal Mechanism, а также проектируемые с использованием трехмерного моделирования. В частности, графические образы для кабины и рамы тягача (рисунок 2), разработанные с использованием CAD программы KOMPAS 3D, остальные элементы модели образованы из стандартных примитивов (параллелепипед, конус, эллипсоид и др.).

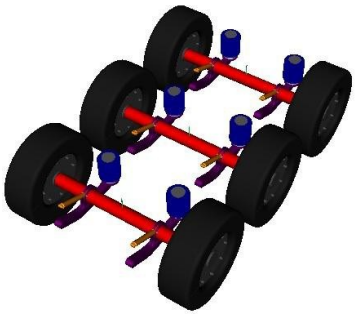
После разработки всех необходимых элементов модели, задачи их параметров, создания шарнирных и силовых связей, проведена проверка правильности описания модели по протоколу. Для исследования динамики модели необходимо осуществить настройку нужных показателей в модуле UM Simulation.

Рисунок 2 – Графический образ кабины и рамы автомобиля-тягача

Общий вид моделей подвесок звеньев автомобильного поезда приведен на рисунке 3.



а – задняя подвеска автомобиля-тягача



б – подвеска полуприцепа

Рисунок 3 – Модели подвесок звеньев автопоезда

Для исследования динамики модели в первую очередь необходимо осуществить настройку ее параметров и задать исходные данные, используя инспектор моделирования объекта (рисунок 4). Поскольку автомобильный поезд является многомодульным транспортным средством, нужно указать, какие тела принадлежат каждому из модулей (автомобилю-тягачу и полуприцепу). Для этого в инспекторе моделирования делаем соответствующие настройки в закладке «состав».

При описании модели важно указать характеристики шин, поскольку они определяют влияние сил и моментов, действующих в плоскости контакта между колесами и опорной поверхностью. Необходимые данные вводим в закладке «шины» инспектора моделирования. При разработке модели нами использован метод табличного задания параметров шин.

Настройка компьютерной модели предусматривает также создание модели дороги, на которой происходят исследования. Модель дороги включает следующие элементы:

- Геометрию линии дороги (макро профиль);
- Геометрию поверхности дороги (микро профиль);
- Шероховатость, твердость и материал покрытия.

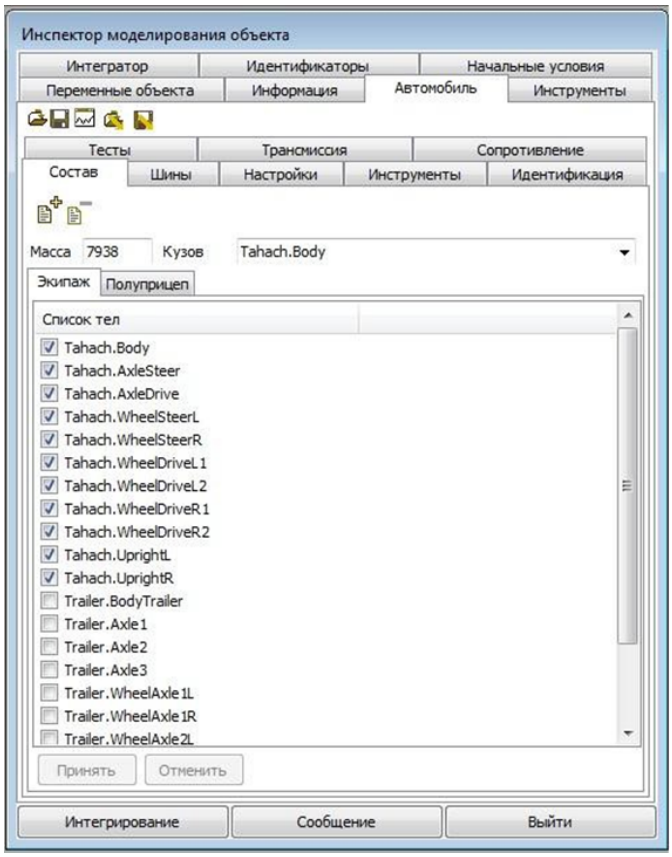
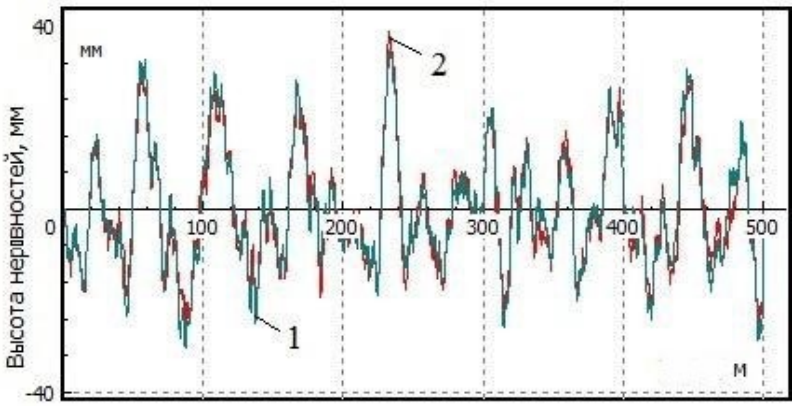


Рисунок 4 – Инспектор моделирования объекта

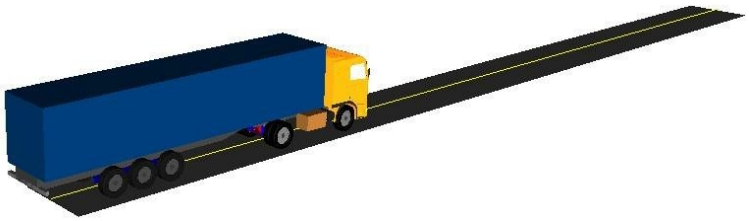
Соответственно в исходных условиях, исследования динамики торможения автопоезда происходят на ровном сухом участке дороги с асфальтобетонным покрытием. Используя средства инструмента UM Simulation, определяем микропрофиль участка дороги для имитации движения автопоезда в тормозном режиме. Графики неровностей дорожного покрытия под левым и правым бортами автопоезда представлены на рисунке 5.



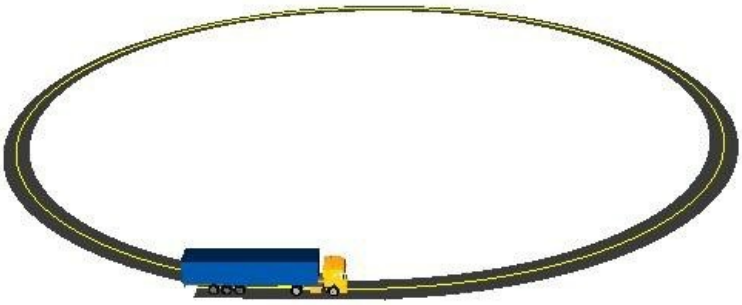
1 – высота неровностей под правым бортом автопоезда;
2 – высота неровностей под левым бортом автопоезда

Рисунок 5 – Профиль неровностей опытного участка дороги:

Геометрия линии дороги (макропрофиль) построена средствами UM Simulation в соответствии с требованиями нормативных документов, и программы исследований. Макропрофиль тестовых участков дорог, используемых для имитации условий движения модели автопоезда при выполнении маневров, приведены на рисунке 6.



а – участок для выполнения манёвра «прямая»



б – участок для выполнения маневра «движение по кругу»

Рисунок 6 – Макро профиль тестовых участков дорог

Настройка компьютерной модели завершается проведением теста на равновесие, в процессе выполнения, которого исчисляется положения равновесия системы. Данный тест позволяет определить начальные значения координат, соответствующие положению равновесия; вычислить величины статических нагрузок и деформации колес; найти значение активных сил в положении равновесия. Полученные данные в дальнейшем используются в качестве исходных при исследовании динамики модели.

В основу исследования динамической модели в программном комплексе Universal Mechanism заложено выполнение ряда стандартных тестов, при осуществлении которых определяются необходимые исследователю показатели. К данным тестам относятся [2]:

- равновесие;
- поворот руля на месте;
- управления без обратной связи;
- тест с водителем;
- вертикальные прокачки;
- горизонтальные прокачки;
- регулировки развала;
- регулирования схождения;
- регулирования продольного наклона шкворня.

В процессе виртуальных исследований показателей устойчивости автопоезда в тормозном режиме движения, в соответствии с программой испытаний и требований нормативных документов [3, 4, 5], необходимо осуществить ряд маневров, среди которых:

- движение на прямолинейном отрезке дороги - «прямая»;
- движение по кругу.

Среди стандартных тестов, заложенных в программный комплекс, для выполнения предусмотренных маневров больше подходит «тест с водителем». Поэтому он избран за основу при исследовании компьютерной модели. Данный тест служит для имитации маневров с заданной

траекторией движения автомобиля. Для управления автомобилем в данном случае используется одна из моделей водителя на выбор исследователя: модель МакАдама, модель с прогнозированием второго порядка и комбинированная модель. В ходе исследования использована модель водителя с прогнозированием второго порядка, поскольку, она позволяет получить незначительные отклонения реального пути автопоезда от заданного.

После завершения необходимых настроек, переходим к исследованию модели.

Используя разработанную компьютерную модель, проведем исследования устойчивости движения автопоезда в тормозном режиме. Исходные данные для исследований принимаем аналогично данных математического моделирования.

Также будем считать, что в начале исследования автопоезд движется параллельно оси Ox, которая направлена вдоль дороги. Движение автомобильного поезда в тормозном режиме исследуем на промежутке времени t = 5 с, или до полной остановки автопоезда, если это произойдет раньше. В результате численного моделирования инструментом UM Simulation получаем данные о положении звеньев автопоезда в каждый момент времени с шагом 0,025 с в интервале 5 с.

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 приведены результаты исследований тормозной динамики компьютерной модели автопоезда в прямолинейном движении.

Результаты исследований устойчивости кругового движения компьютерной модели автопоезда в тормозном режиме приведены в таблице 2.

Таблица 1 – Исследование динамики торможения автопоезда в прямолинейном движении

Вариант проведения исследований	Показатели тормозной динамики автопоезда			
	Тормозной путь, м	Смещение траектории полуприцепа по траектории тягача, м	Время торможения, с	Замедление при торможении, м/с^2
Результаты математического моделирования	35,45	0,012	3,32	5,02
Результаты компьютерного моделирования	34,86	0,013	3,29	5,06

Таблица 2 – Исследование динамики торможения автопоезда при движении по кругу

Вариант проведения исследований	Показатели тормозной динамики автопоезда			
	Тормозной путь, м	Смещение траектории полуприцепа по траектории тягача, м	Время торможения, с	Замедление при торможении, м/с^2
Результаты математического моделирования	33,98	3,28	5,08	0,2706
Результаты компьютерного моделирования	33,37	3,26	5,11	0,2851

Как следует из данных (таблица 1 и таблица 2), максимальное расхождение полученных результатов исследования показателей устойчивости движения автопоезда в тормозном режиме с использованием математической и компьютерной моделей не превышает 10%, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели и достоверности результатов, полученных с ее использованием.

Первичные исследования динамической модели автопоезда проводились с использованием инструментов визуализации, позволяющие отображать характерные перемещения модели по разработанному участку дороги в соответствии с приложенными кинематическими и силовыми связями и ограничениями.

Список литературы

1. Поляков В., Приходченко Д.Ю., Абрамов Д.А. Теоретическое исследование влияния осевой неравномерности тормозных сил на устойчивость автопоезда // Вестник ВНУ имени Владимира Даля. - Луганск: ВНТУ. – 2007. – № 6 (112). – С. 59-62.

2. Антонов Д.А. Расчет устойчивости движения многоосных автомобилей. – М.: Машиностроение. – 1984. – 164 с.
3. Закин Я.Х. Прикладная теория движения автопоезда. – М.: Транспорт. – 1967. – 252 с.
4. Фаробин Я.Е. Теория поворота транспортных машин. – М.: Машиностроение. – 1970. – 176 с.
5. Kienhöfer F., Cebon D. An Investigation of ABS Strategies for Articulated Vehicles // 8th International Symposium on Heavy Vehicles Weights and Dimensions. – Midrand, South Africa. – 2004. – P. 10-14.

References

1. Polyakov V., Prihodchenko D.YU., Abramov D.A. Teoreticheskoe issledovanie vliyaniya osevoj neravnomernosti tormoznyh sil na ustojchivost' avtopoezda // Vestnik VNU imeni Vladimira Dalya. - Lugansk: VNTU. – 2007. – № 6 (112). – S. 59-62.
2. Antonov D.A. Raschet ustojchivosti dvizheniya mnogoosnyh avtomobilej. – M.: Mashinostroenie. – 1984. – 164 s.
3. Zakin YA.H. Prikladnaya teoriya dvizheniya avtopoezda. – M.: Transport. – 1967. – 252 s.
4. Farobin YA.E. Teoriya povorota transportnyh mashin. – M.: Mashinostroenie. – 1970. – 176 s.
5. Kienhöfer F., Cebon D. An Investigation of ABS Strategies for Articulated Vehicles // 8th International Symposium on Heavy Vehicles Weights and Dimensions. – Midrand, South Africa. – 2004. – P. 10-14.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Доровских Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: dima.dorovskikh@yandex.ru.

Глазков Юрий Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: glazkov_yura1@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Dorovskikh Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: dima.dorovskikh@yandex.ru.

Glazkov Yuri – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: glazkov_yura1@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 24.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2020

УДК 631.171
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-22-29

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОШНИКА ДЛЯ ПОСЕВА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР С НАПРАВИТЕЛЕМ ПОТОКА И ГАСИТЕЛЕМ СКОРОСТИ СЕМЯН

[1]Ларюшин Николай Петрович
[1]Ванин Дмитрий Владимирович
[1]Шумаев Василий Викторович
[1]Шуков Александр Васильевич
[1]Кирюхина Татьяна Александровна
[1]ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет»

Реферат. *Одной из важнейших операций при производстве зерновых культур является посев. Анализ литературы показал, что наиболее перспективны для осуществления этой операции двухдисковые сошники, отвечающие агротехническим требованиям. Исследования проводили на лабораторной установке - почвенном канале. Изучали работу сошника для посева зерновых*

культур с направителем потока и гасителем скорости семян. Качественные показатели работы экспериментального сошника определяли по высеву семян на липкий щит, на который нанесена сетка, имеющая квадраты с размерами 5х5 см. Для посева использовали сорт яровой пшеницы «Тулайковская 108». Для оценки опытных данных была выбрана методика многофакторного эксперимента. В результате анализа проведенных лабораторных исследований выявлены значения факторов, при которых равномерность распределения семян по длине рядка и глубине их заделки были оптимальными: радиус отгиба трубы R = 245…255 мм; толщина гасителя h = 5…7 мм; $R_г$ = 98…102 мм, при этом для коэффициента вариации неравномерности распределения семян по длине рядка максимальное значение будет равно 21-23 %. Исследования разработанных сошников показали устойчивую работу на посеве зерновых культур, при этом планируемая прибавка урожайности должна составить до 15 %.

***Ключевые слова**: сошник, сеялка, направитель потока, гаситель скорости семена, коэффициент вариации.*

LABORATORY STUDIES OF A COULTER FOR SOWING GRAIN CROPS WITH A FLOW GUIDE AND A SEED SPEED SUPPRESSOR

[1]Laryushin Nikolay
[1]Vanin Dmitry
[1]Shumaev Vasily
[1]Shukov Alexander
[1]Kiryukhina Tatyana

[1]FSBEI HE "Penza State Agrarian University"

***Abstract.** One of the most important operations in the production of grain crops is sowing.An analysis of the literature showed that the double-disc coulters that meet agrotechnical requirements are most promising for this operation.Studies were carried out on a laboratory setup - the soil canal. The work of the opener for sowing grain crops with a flow guide and a quencher of seed speed was studied.Qualitative indicators of the work of the experimental coulter were determined by sowing seeds on a sticky shield, on which a grid was applied, having squares with dimensions of 5x5 cm.The spring wheat variety "Tulaykovskaya 108" was used for sowing. The multivariate experiment technique was chosen to evaluate the experimental data.The values of the factors were identified as a result of the analysis of laboratory tests, in which the uniform distribution of seeds along the length of the row and the depth of their seeding was optimal: radius of the pipe bend R = 245 ... 255 mm; damper thickness h = 5 ... 7 mm; the radius of the longitudinal axis of symmetry of the damper Rg = 98 ... 102 mm, while for the coefficient of variation of the uneven distribution of seeds along the length of the row, the maximum value will be equal to 21-23 %. Studies of developed coulters have shown steady work in the sowing of grain crops, while the planned increase in yield should be up to 15 %.*

***Keywords**: coulter, seeder, flow guide, seed speed suppressor, coefficient of variation.*

Введение. При возделывании зерновых культур равномерное распределение семян по глубине и длине рядка имеет наиболее важное значение. Как известно, оптимальные условия питания обеспечиваются за счет равномерности распределения семян зерновых культур по площади питания и глубине их заделки. В настоящее время разработаны и исследованы различные конструкции сошников для посева зерновых культур. Наиболее выгодной конструкцией для посева семян данной культуры является дисковые сошники. Основными элементами, служащими для ограничения глубины, являются реборды или копирующие колеса. Однако и данные конструкции имеют недостатки, в результате которых ухудшается качество посева семян [1].

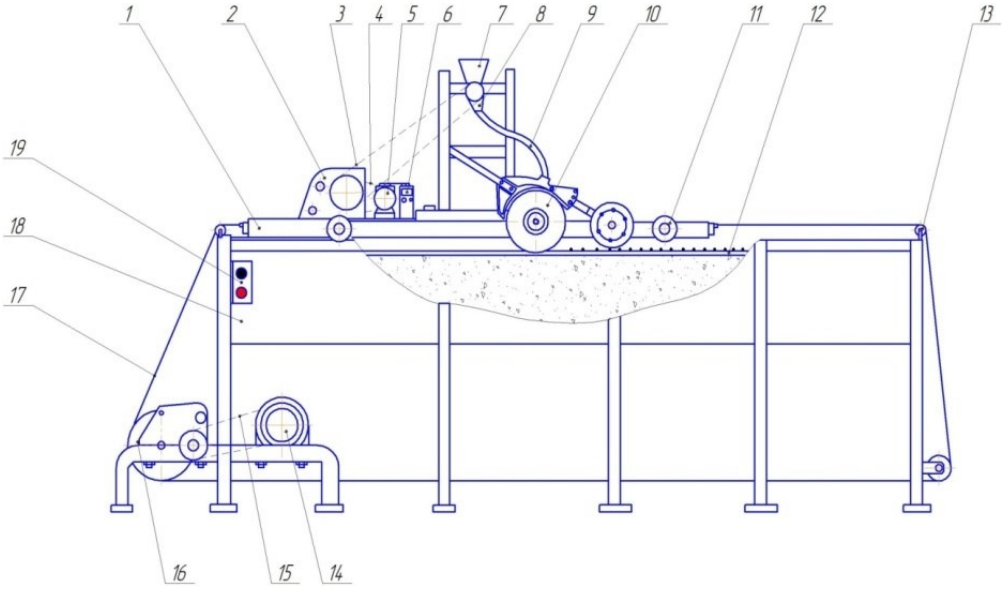
Исходя из выше сказанного, представленный материал, направленный на снижение коэффициента вариации по распределению семян на площади питания и глубине их заделки, имеет актуальное значение, направленное на повышение урожайности культуры.

Методы и материалы. Экспериментальные лабораторные исследования проводились согласно ГОСТ 31345-2007, СТО АИСТ 001-2010.

В состав лабораторных исследований входят: разработанные программа и методика; разработка и изготовление сошника сеялки с гасителем скорости семян; описание почвенного канала; определение оптимальных параметров экспериментального сошника, влияющих на качество посева.

Лабораторные исследования проводились на почвенном канале, применение которого позволяет получить необходимые параметры для получения качественного посева.

Общий вид и схема лабораторной установки приведены на рисунке 1.



1 – навеска; 2 – редуктор; 3, 4, 15 – механизмы передачи; 5, 14 – электродвигатель; 6 – преобразователь частотный; 7 – ящик для семян; 8 – высевающий аппарат; 9 – направитель семян; 10 – экспериментальный сошник; 11 – колесо навески; 12 – липкий щит; 13 – шкив; 16 – мотор-редуктор; 17 – трос; 18 – почвенный канал; 19 – щит управления

Рисунок 1 – Схема почвенного канала

Почвенный канал 18 (рисунок 1) включает навеску 1, на которую установлены: электродвигатель 5, преобразователь частотный 6, ящик для семян 7 с направителем семян 9, высевающий аппарат 8, экспериментальный сошник 10, колесо навески 11. Для передачи вращения от электродвигателя 5, с помощью цепных передач 3, 4 на высевающий аппарат, на навеске установлен редуктор 2. На почву канала уложен липкий щит 12. Для привода навески 1, на раме почвенного канала установлен электродвигатель 14, который передаёт вращение на мотор-редуктор 16 с помощью цепной передачи 15. Мотор-редуктор 16 через тросовую систему 17, шкив 13 приводит в движение навеску 1. Управление почвенным каналом 18 осуществляется кнопками на щите 19.

Качественные показатели работы экспериментального сошника определялись по высеву семян на липкий щит, на который нанесена сетка, имеющая квадраты с размерами 5х5 см.

Лабораторные исследования проводились на сорте яровой пшеницы «Тулайковская 108», зерно которой засыпалось на ¾ объема ящика для семян 7. Частота вращения высевающего аппарата 8 регулировалась с помощью преобразователя частотного 6. Навеска 1 приводилась в движение через щит управления 19. Когда катушка высевающего аппарата 8 вращалась, через направитель движения 9 семена поступали в экспериментальный сошник 10, при этом семена укладывались на сетку, нанесенную на липкий щит 12, сетка имела квадраты размером 5х5 см.

Обрабатывая опытные данные по неравномерности распределения семян по длине рядка, определяли коэффициент вариации по общепринятой методике. При исследовании опытных данных была принята методика многофакторного эксперимента [2].

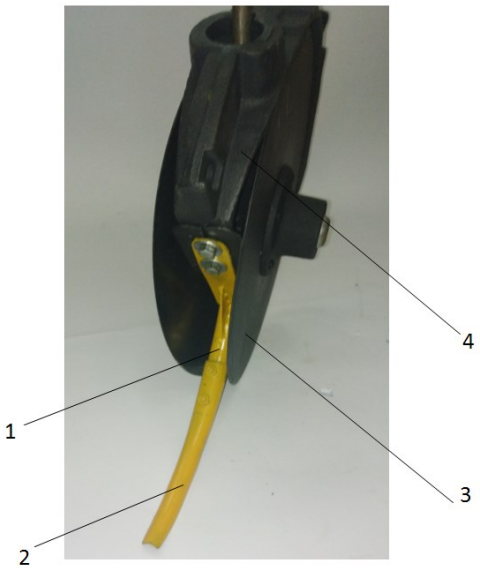


Рисунок 2 − Экспериментальный сошник сеялки:1 – корпус; 2 – диск; 3 – труба; 4 – гаситель

Изучая распределение семян зерновых культур по длине рядка с определенным коэффициентом вариации ν, % судили о критерии оптимизации. По коэффициенту вариации, позволяющему дать оценку степени разброса по членам выборки (участкам на липком щите с определенным количеством семян на данном участке в рядке) от среднего количества семян на участке, а остальные критерии использовались как ограничения. Определяли однородность выборки. Все факторы, от которых зависит коэффициент вариации распределения семян по длине рядка, учесть при проведении исследований невозможно [3]. Нами выделены наиболее значимые факторы, которые влияют на качество распределения семян по длине рядка: радиус отгиба трубы, мм.; длина гасителя, мм; жёсткость гасителя, Н/м; толщина гасителя, мм; радиус продольной оси симметрии гасителя, мм; ширина пятки, мм; длина пятки, мм; скорость посевной секции, м/с.

После смешивания дробных реплик, с учетом выделенных факторов, составляем матрицу планирования эксперимента. Далее полученные уравнения вводим в ПЭВМ и получаем двумерное сечение, которое определяет влияние наиболее значимых факторов [4] на коэффициент вариации по распределению семян зерновых культур с помощью экспериментального сошника по длине рядка.

Результаты. Обработав результаты поставленного многофакторного эксперимента получили адекватную математическую модель второго порядка, которая в закодированном виде описывает влияние на качество распределения семян по длине рядка радиуса отгиба трубы, мм.(x_1); длины гасителя, мм (x_2); радиуса продольной оси симметрии гасителя, мм (x_3):

$$y=22,84+0,39x_1-0,81x_2+0,42x_3+2,10x_1^2+1,94x_2^2+1,05x_3^2+0,81x_1x_2-0,73x_1x_3-0,89x_2x_3, \quad (1)$$

Установили, что полученная линейная зависимость адекватно описывает экспериментальные данные с коэффициентом корреляции R = 0,987, а $F_{тест}$ = 0,981.

Дифференцированием по переменным x_1, x_2 и x_3 получили систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dy}{dx_1} = 4,2x_1 + 0,81x_2 - 0,730x_3 + 0,39 = 0 \\ \dfrac{dy}{dx_2} = 0,81x_1 + 3,88x_2 - 0,89x_3 - 0,81 = 0 \\ \dfrac{dy}{dx_3} = -0,73x_1 - 0,89x_2 + 2,1x_3 + 0,42 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему уравнений, получаем оптимальное значение коэффициента вариации. В таблице 1 показаны оптимальные значения параметров R, h, $R_г$.

Таблица 1 – Оптимальные значения наиболее значимых факторов

№ п/п	Факторы	Оптимальные значения в виде	
		закодированном	раскодированном
1	Радиус отгиба трубы, *R* мм	-0,16	271,00
2	Толщина гасителя, *h* м	0,20	6,400
3	Радиус продольной оси симметрии гасителя, $R_г$ мм	-0,17	97,93

Получив значения факторов, изучаем поверхности отклика в зоне оптимальных значений факторов с помощью двумерных сечений (рисунок 3).

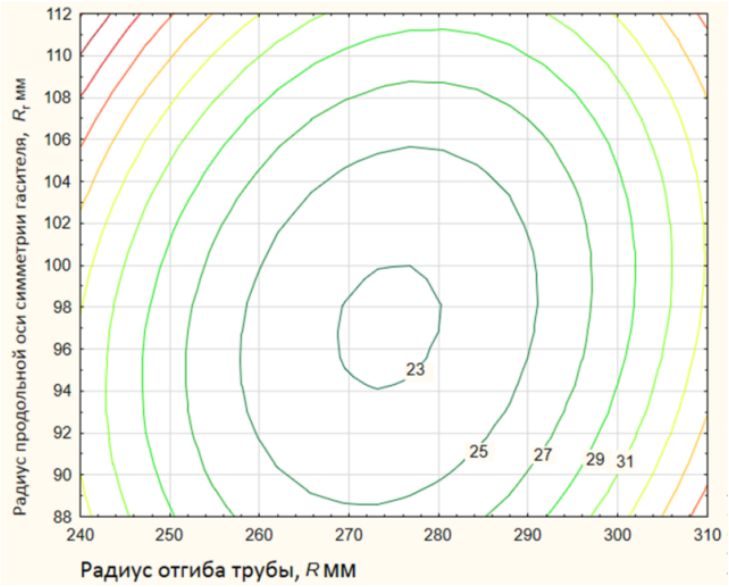


Рисунок 3 – Поверхность отклика (двухмерное сечение)
для зависимости коэффициента вариации распределения семян зерновых культур
по длине рядка (ν) от радиуса отгиба трубы *R* и радиуса продольной оси симметрии гасителя, *Rг*,

Для этого подставляем в уравнение (1) фактор x_2, приравненный к нулю. Получим следующее уравнение:

$$y=16,84+0,39x_1+0,42x_3+2,10x_1^2+1,05x_3^2-0,73x_1x_3 \quad (3)$$

Если взять частные производные по каждому из двух факторов и составить систему дифференциальных уравнений, можно получить значение факторов. Анализ рисунка 3 показывает, что оптимальные значения исследуемых факторов: *R* =269 - 280 мм, *Rг* = 95 - 100 см, а значение параметра оптимизации (ν) составляет ~ 23 %.

После обработки опытных данных, строим двумерное сечение (рисунок 4), которое показывает оптимальное значение радиуса отгиба трубы *R* и толщины гасителя *h* в зависимости от коэффициента вариации (ν) распределения семян по длине рядка.

Согласно представленных данных на двумерном сечении, параметр оптимизации (ν) будет составлять 23 %. Было определены интервалы оптимальных значений исследуемых факторов: *R* =262 - 295 мм, *h* = 4,8 - 7,8 мм.

Знание оптимальных значений исследуемых факторов (*R, h*), а также изучение поверхности отклика в зоне оптимальных значений факторов с помощью двумерных сечений после подстановки в уравнение (1) фактор x_1, приравненный к нулю, помогли нам прийти к уравнению:

$$y=16,84-0,81x_2+0,42x_3+1,94x_2^2+1,05x_3^2-0,89x_2x_3 \quad (4)$$

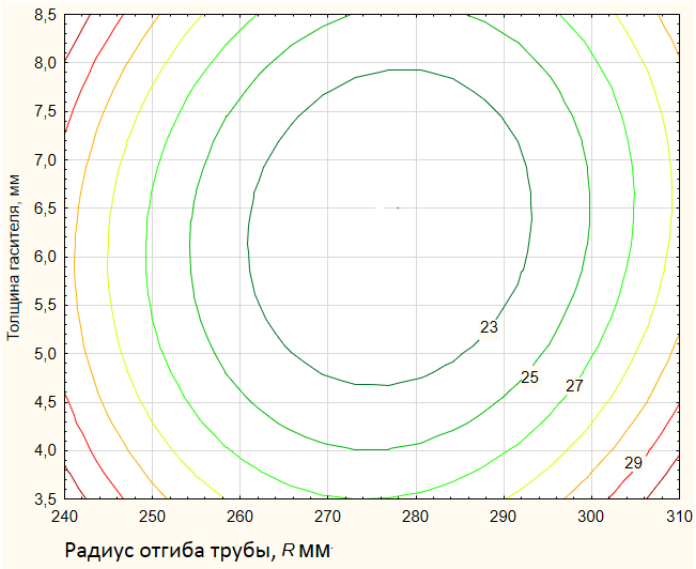


Рисунок 4 – Поверхность отклика (двухмерное сечение)
для зависимости коэффициента вариации распределения семян зерновых культур
по длине рядка (ν) от радиуса отгиба трубы R и толщины гасителя h

Для получения характеристики зависимости коэффициента вариации распределения семян зерновых культур по длине рядка (ν) от толщины гасителя h и радиуса продольной оси симметрии гасителя $R_г$, строим двумерное сечение (рисунок 5).

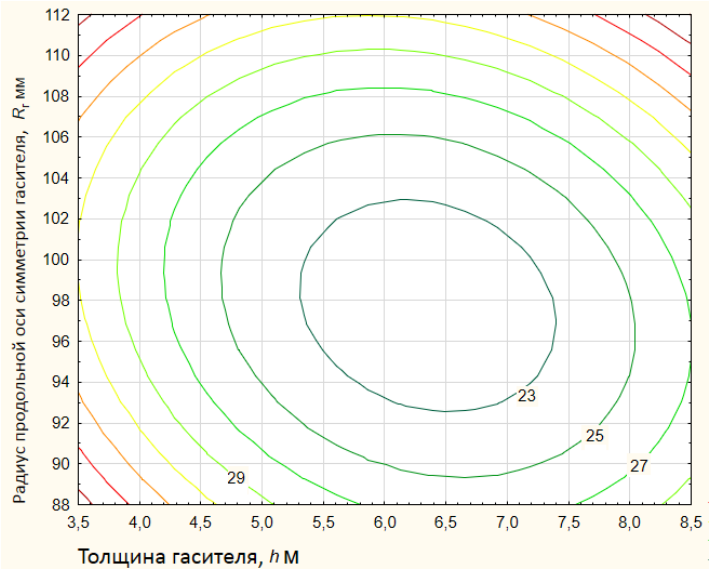


Рисунок 5 – Поверхность отклика (двухмерное сечение)
для зависимости коэффициента вариации распределения семян зерновых культур
по длине рядка (ν) от толщины гасителя h и радиуса продольной оси симметрии гасителя $R_г$

Согласно представленным данным на двумерном сечении (рисунок 5), получили параметр оптимизации (ν), равный 23 %, который отвечает оптимальным значениям исследуемых факторов: h=5,4 - 7,03 мм, $R_г$ = 93 - 103 мм.

Использование уравнения при инженерных расчетах предполагает его представление в раскодированном виде с учетом значимости коэффициентов регрессии.

$$y=313,4-6,5R-19,3h-8,4R_г+2,1R^2+1,9h^2+0,11R_г^2+0,8Rh-0,24RR_г-0,29hR_г. \quad (5)$$

Заключение. Таким образом, на неравномерность распределения семян по длине рядка, как показали лабораторные исследования, наибольшее влияние оказывают параметры следующих факторов: радиус отгиба трубы, R=245…255 мм; толщина гасителя, h=5…7мм; радиус продольной оси симметрии гасителя, $R_г$=98…102 мм, при которых параметр оптимизации имел максимальное значение, составляющее 21 - 23 %.

Список литературы

1. Ларюшин Н.П., Мачнев А.В., Шумаев В.В. и др. Посевные машины: Теория, конструкция, расчёт. Монография – М.: Росинформагротех, 2010. – 292 с.

2. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рощин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов –Л.: Колос, 1980.–167с.

3. Волошин И.В., Ларюшин Н.П., Кувайцев В.Н., Шумаев В.В., Ванин Д.В. Лабораторные исследования комбинированного сошника для посева семян зерновых культур // Нива Поволжья. – 2018. – № 2 (47). – С. 106-112.

4. Ларюшин Н.П., Мачнев А.В., Шумаев В.В. Лабораторные исследования сошника сеялки-культиватора с бороздообразующим рабочим органом // Нива Поволжья. – 2008. – №3.– С. 32-33.

References

1. Laryushin N.P., Machnev A.V., SHumaev V.V. i dr. Posevnye mashiny: Teoriya, konstrukciya, raschyot. Monografiya – M.: Rosinformagrotekh, 2010. – 292 s.

2. Mel'nikov S.V., Aleshkin V.R., Roshchin P.M. Planirovanie eksperimenta v issledovaniyah sel'skohozyajstvennyh processov –L.: Kolos, 1980.–167s.

3. Voloshin I.V., Laryushin N.P., Kuvajcev V.N., SHumaev V.V., Vanin D.V. Laboratornye issledovaniya kombinirovannogo soshnika dlya poseva semyan zernovyh kul'tur // Niva Povolzh'ya. – 2018. – № 2 (47). – S. 106-112.

4. Laryushin N.P., Machnev A.V., SHumaev V.V. Laboratornye issledovaniya soshnika seyalki-kul'tivatora s borozdoobrazuyushchim rabochim organom // Niva Povolzh'ya. – 2008. – №3.– S. 32-33.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ларюшин Николай Петрович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: larushinnp@mail.ru.

Ванин Дмитрий Владимирович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: Sashka-shukov@yandex.ru.

Шумаев Василий Викторович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: shumaev.v.v@pgau.ru.

Шуков Александр Васильевич – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: Sashka-shukov@yandex.ru.

Кирюхина Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: kiryuhina.t.a@pgau.ru.

Author credentials

Affiliations

Laryushin Nikolay – Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University”, Russia, Penza, e-mail: larushinnp@mail.ru.

Vanin Dmitry – Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University”, Russia, Penza, e-mail: Sashka-shukov@yandex.ru.

Shumaev Vasiliy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University”, Russia, Penza, e-mail: shumaev.v.v@pgau.ru.

Shukov Alexander – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University”, Russia, Penza, e-mail: Sashka-shukov@yandex.ru.

Kiryukhina Tatyana – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University” Russia, Penza, e-mail: kiryuhina.t.a@pgau.ru.

Поступила в редакцию (Received): 14.02.2020 Принята к публикации (Accepted): 03.04.2020

УДК 621.899
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-29-35

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА СЕЯЛКИ СО СПЛОШНЫМ ПОКРЫТИЕМ КЛАПАНА ИЗ РЕЗИНЫ С ШИПАМИ

[1]Ларюшин Николай Петрович
[1]Родин Александр Сергеевич
[1]Шуков Александр Васильевич
[1]Шумаев Василий Викторович
[1]Кирюхина Татьяна Александровна
[1]ФГБОУ ВО «Пензенский государственный аграрный университет»

Реферат. *Исследования, направленные на повышение качества посева зерновых культур сеялкой за счет разработки эффективных катушечных высевающих аппаратов имеет важное значение для АПК России. Новый катушечный высевающий аппарат со сплошным покрытием клапана из резины с шипами разработан, изготовлен и испытан на базе Пензенского ГАУ. Проводили теоретические исследования конструктивных и режимных параметров катушечного высевающего аппарата, со сплошным покрытием клапана из резины с шипами. Установили, что угол обхвата сплошного покрытия из резины с шипами, замеренный от кромки сброса семян клапана из центра вращения высевающей катушки, составляет 100 градусов. Улучшение равномерности высева семян с заданной нормой, снижение травмирования семян и повышению урожайности могут быть обеспечены наличием сплошного покрытия из резины с шипами, с заданными конструктивными параметрами.*

Изучали закономерности движения центра масс семени при передвижении его по плоскости клапана высевающего аппарата. Установили зависимости наименьшего коэффициента трения, при котором возможно качение семени без скольжения, частоты вращения катушки. Показали, что при использовании предлагаемого высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане с расчётными конструктивными и кинематическими параметрами за счёт улучшенного формирования потока семян при выходе из исследуемого высевающего аппарата уменьшится неравномерность распределения семян по длине рядка, а также снижется пульсации семян, в результате повысится урожайность производимой культуры и снизятся затраты на её производство.

Ключевые слова: *катушечный высевающий аппарат, неустойчивость общего высева, посев, зерновые культуры, клапан, шипы.*

THE ORETICAL STUDIES OF THE SEEDING APPARATUS OF A SEEDER WITH A SOLID COVER OF A VALVE MADE OF RUBBER WITH SPIKES

[1]Laryushin Nikolay
[1]Rodin Alexander
[1]Shukov Alexander
[1]Shumaev Vasily
[1]Kiryukhina Tatyana
[1]FSBEI HE “Penza State Agrarian University”

Abstract. *Research aimed at improving the quality of sowing of grain crops with a seeder due to the development of effective reel sowing machines is important for the Russian agricultural sector. The new spool metering device with a continuous coating of a valve made of rubber with spikes is designed, manufactured and tested on the basis of the Penza GAU. A theoretical study of the design and operating parameters of the coil meter, with a continuous coating of the valve made of rubber with spikes, was carried out. It was found that the angle of coverage of a continuous coating of rubber with spikes, measured from the edge of the discharge of valve seeds from the center of rotation of the seed coil, is 100 degrees. Improving the uniformity of sowing seeds with a given rate, reducing injury to seeds and increasing yields can be ensured by the presence of a continuous coating of rubber with spikes, with predetermined design parameters. The patterns of motion of the center of mass of the seed when moving it along the plane of the valve of the sowing apparatus was studied. The dependences of the smallest coefficient of friction, at which the seed can roll without sliding, are set to the rotation frequency of the coil. It was shown that when using the proposed metering device coated with rubber with spikes on the valve with calculated structural and kinematic parameters, due to the improved formation of the seed flow upon exit from the studied metering device, the uneven distribution of seeds along the row length will decrease, as well as the pulsation of seeds, as a result the yield of the produced crop will increase and the cost of its production will decrease.*

Keywords: *coil seeding machine, instability of general seeding, seeding, crops, valve, spikes.*

Ведение. С помощью высевающего аппарата можно создать плавный без пульсации поток семян при снижении их дробления, обеспечить заданную устойчивость общего высева, не зависящую от скорости движения посевного агрегата. Для высевающего аппарата важно иметь простую конструкцию, обеспечивающую надежную и удобную регулировку нормы высева различных культур.

Наиболее распространены катушечные высевающие аппараты с корпусом, в котором размещены высевающая катушка и установленный под ней клапан с гладкой рабочей поверхностью. При работе такие высевающие аппараты не обеспечивают равномерность высева, устойчивость заданной нормы высева, их использование повышает дробление семян, что негативно сказывается на урожайности зерновых культур. Поэтому разработка катушечного высевающего аппарата, со сплошным покрытием клапана из резины с шипами, имеет важное значение для АПК России.

При работе данного высевающего аппарата можно говорить о сокращении времени формирования упорядоченного неподвижного слоя семян, осуществлению более равномерного торможения нижних слоев семян в активном слое, формированию устойчивого активного слоя семян, снижению травмирования семян, исключению самопроизвольного истечения семян с кромки сброса клапана, улучшению равномерности высева, устранению проявления задерживания семян стенками корпуса семенной коробки, увеличению толщины активного слоя, при этом обеспечивается устойчивость заданной нормы высева. Указанное выше способствует улучшению положения с качеством высева семян, повышением урожайности культуры и снижением себестоимости продукции.

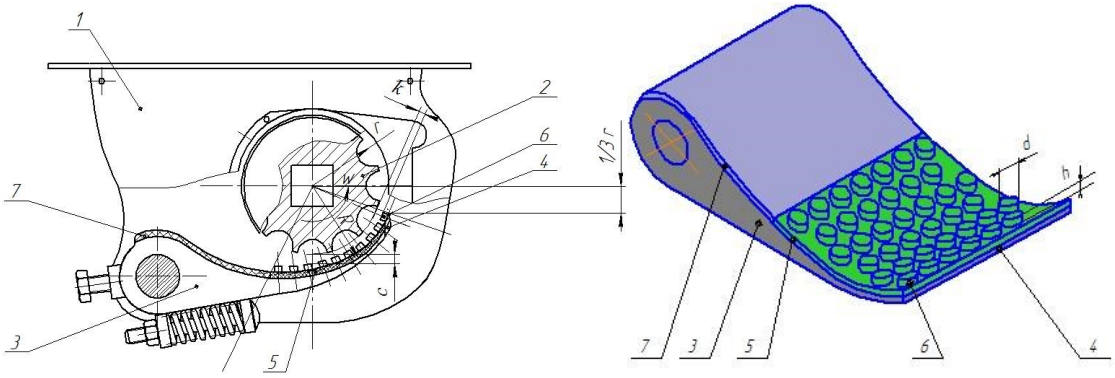
В результате анализа работы катушечных высевающих аппаратов, можно утверждать, что силы трения между семенами, частота вращения катушки, тип семян влияют на толщину активного слоя, в результате чего высев семян осуществляется неравномерно. В результате семена неравномерно распределяются по длине рядка, общий высев семян характеризуется неустойчивостью и дроблением, а в итоге все это приводит к снижению урожайности возделываемых культур.

Материалы и методы. На базе ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ в настоящее время разработан, изготовлен и испытан новый катушечный высевающий аппарат со сплошным покрытием клапана из резины с шипами (Патент № 2688837).

Катушечный высевающий аппарат со сплошным покрытием клапана из резины с шипами содержит корпус 1 (рис.1) с установленной в нём катушкой 2 и размещенным под ней клапаном 3, рабочая поверхность клапана 3 имеет заднюю и переднюю части. Задняя часть клапана 3 выполнена в виде части поверхности цилиндра.Край рабочей поверхности задней части клапана 3, выполненный в виде части поверхности цилиндра, имеет кромку 4 сброса семян клапана 3, выполненную со скосом. На клапан 3 способом гуммирования, нанесено покрытие 5 из резины с шипами 6. Шипы 6 сплошного покрытия 5 из резины расположены в шахматном порядке.

Работа катушечного высевающего аппарата со сплошным покрытием клапана из резины с шипами происходит следующим образом. Вращаясь катушка 2 заполняет желобки семенами из верхней части семенной коробки и направляет их к клапану 3, заполняя одновременно переднюю поверхность клапана 3, а так же поверхность сплошного покрытия 5 из резины с шипами 6. С клапана 3 семена сходят в семяпровод.

Для создания условий с целью движения семян без заклинивания, формирования активного слоя семян заданной толщины, равномерного высева семян с заданной нормой и в то же время исключения самопроизвольного истечения семян с кромки 4 сброса семян, на клапан 3 нанесено сплошное покрытие 5 из резины с шипами 6. Для этого рабочая поверхность клапана 3 выполнена гладкой. Гладкая рабочая поверхность клапана 3 имеет переднюю и заднюю части. Задний край рабочей поверхности задней части клапана 3, выполненный в виде части поверхности цилиндра, имеет кромку 4 для сброса семян через клапан 3, выполненную со скосом, идентичным скосу кромки 4 для сброса семян клапана 3. Для угла обхвата задней части клапана 3, определенного от кромки 4 для сброса семян клапана 3 из центра вращения высевающей катушки 2, определено значение α = 55 градусов. Оставшуюся часть гладкой рабочей поверхности клапана 3, без задней части клапана 3, занимает передняя часть клапана 3. Форма гладкой рабочей поверхности передней части клапана 3 выполнена идентично форме рабочей поверхности клапана 3, все это способствует улучшению устойчивости дозирования высева семян.



а б

а – общий вид, б – клапана из резины с шипами

1 − корпус; 2–катушка; 3 − клапан; 4 –опоры; 5 – донце; 6 –скос; 7 –направитель; 8 − щетка.

Рисунок 1 – Схема катушечного высевающего аппарата со сплошным покрытием клапана из резины с шипами:

Для формирования равномерного, устойчивого активного слоя семян заданной толщины получен неподвижный слой семян за счет нанесения на клапан 3, способом гуммирования, сплошного покрытия 5 из резины с шипами 6. Неподвижный слой семян свободно, упорядоченно, без вспучивания, надежно и равномерно распределяется между шипами 6, на сплошном покрытии из резины, что способствует образованию устойчивого активного слоя семян заданной толщины, без попадания семян к боковинам корпуса 1 семенной коробки. Величина угла обхвата сплошного покрытия 5 из резины с шипами 6, определенная от кромки 4 сброса семян клапана 3 из центра вращения высевающей катушки 2, равна β = 100 градусов. Благодаря наличию сплошного покрытия 5 из резины с шипами 6, имеющего заданные конструктивные параметры, происходит улучшение равномерности высева семян с заданной нормой, снижение травмирования семян и повышение урожайности.

Сплошное покрытие 5 из резины с шипами 6, имеющее заданные конструктивные параметры отвечает за улучшение равномерности высева семян по заданным нормам, снижение их травмирования и повышение урожайности.

Чтобы улучшить равномерность высева семян, увеличив активный слой и устранив проявления их задерживания стенками корпуса 1 семенной коробки, можно внутреннюю

поверхность стенок корпуса 1 семенной коробки покрыть антифрикционным материалом, таким как, пластмасса.

Результаты и их обсуждение. Найдем закон движения центра масс семени при движении его по плоскости клапана высевающего аппарата.

Для упрощения расчетов примем, что семя выполнено в форме шара. Тогда семя, на которое действует сила F, имеющее радиус R (рисунок 2) и вес P начнет катиться из состояния покоя без скольжения по наклонной плоскости клапана высевающего аппарата, имеющей сплошное резиновое покрытие с шипами и углом наклона α .

Покажем силы, действующие на семя, если принять что оно осуществляет плоскопараллельное движение. Обозначим через P − вес семени, F − силу сопротивления, N − реакцию семени, F_{mp} − силу трения семени о пластмассовую поверхность клапана. Составим дифференциальное уравнение плоскопараллельного движения в системе координат *XOY*:

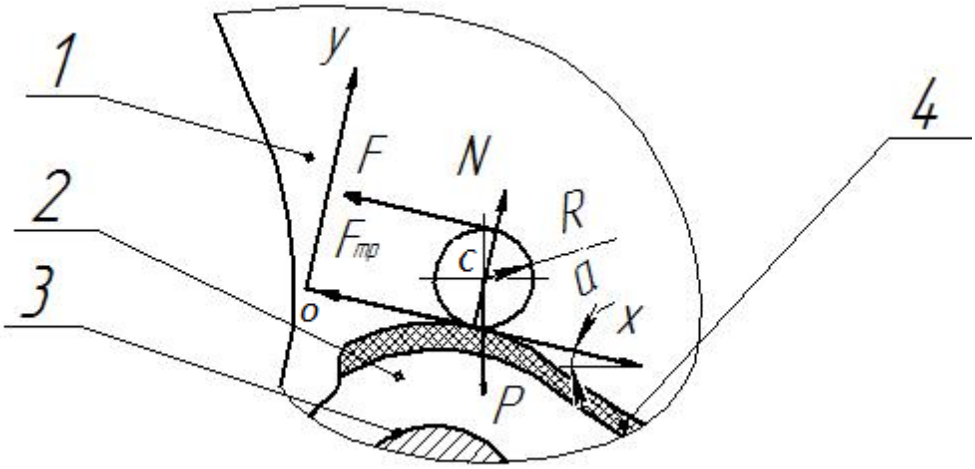
$$m\ddot{x}_c = \sum F_{kx}; \qquad m\ddot{x}_c = P \cdot \sin\alpha - F - F_{mp} \tag{1}$$

$$m\ddot{y}_c = \sum F_{ky}; \qquad m\ddot{y}_c = N - P \cdot \cos\alpha \tag{2}$$

$$J_{cz} \cdot \varepsilon = \sum M_{cz}(F_k) \quad \frac{mR^2}{2}\varepsilon = F_{mp} \cdot R - F \cdot R \tag{3}$$

где ε –угловое ускорение семени, рад/с^2.

Движение по ходу часовой стрелки выбираем за положительное направление для моментов. Это будет направление вращения семени при движении его центра С от оси Оу.



1 − корпус; 2 – клапан; 3 − вал; 4 – покрытие из пластмассы.

Рисунок 2 – Схема движения семени по передней части клапана из резины с шипами

Считая, что центр масс семени не движется по оси *y* и при этом $y_C = R = const$, находим четыре неизвестные величины $\ddot{x}_c, F_{mp}, N$ и ε в уравнениях (1) - (3). Связь двух неизвестных величин $\ddot{x}_c$ и ε определяется кинематическим соотношением. При движении без скольжения точка *C* отвечает за мгновенный центр скоростей семени а:

$$\ddot{x}_c = v_c = \omega \cdot R .$$

После дифференцирования, получим:

$$\ddot{x}_c = \dot{\omega} \cdot R = \varepsilon \cdot R \tag{4}$$

Следовательно, в уравнениях (1) - (4) имеются четыре неизвестные величины.

Выразим из уравнения (3) F_{mp} и подставим в выражение (1), получим (с учетом равенства (4)) $x_c = f(t)$:

$$m \cdot \ddot{x}_c = P\sin\alpha - 2F - \frac{1}{2} m \cdot \ddot{x}_c \quad (5)$$

Отсюда:

$$\ddot{x}_c = \frac{2}{3}\frac{P\sin\alpha - 2F}{m}. \quad (6)$$

После некоторых преобразований данных уравнений получим:

$$\ddot{x}_c = 0{,}31g \quad (7)$$

Интегрируя, выражение (7) получим:

$$\dot{x}_c = 0{,}31g + C_1 \;\; x_c = \frac{0{,}31}{2} gt^2 + C_1 \cdot t + C_2 \quad (8)$$

Подставим в равенства (8) начальные условия, при t=0, x_C =0, $\dot{x}_c = v_c = 0$,найдем C_1=0, C_2=0. Окончательно из равенства (8) находим закон движения центра C семени:

$$x_C = 0{,}16gt^2. \quad (9)$$

Определим $f_{\min}$ при качении семени без скольжения по передней части клапана из резины с шипами

$$\left|F_{mp}\right| \le f \cdot N \quad (10)$$

По указанному выше уравнению (2), при условии $y_c = 0$ находим величину N.

$$N = P \cdot \cos\alpha = 0.5P \quad (11)$$

Приведенное ранее уравнение (1) поможет в определении значения F_{mp} , если ввести в него значение $\ddot{x}_c$ из выражения (7).

$$0.31mg = P\sin\alpha - F - F_{mp}$$

Подставив $mg = P$, получим:

$$F_{mp} = P\sin 60 - F - 0{,}31P = 0.36P. \quad (12)$$

Если в неравенство (10) подставить значения N и F_{mp} из равенств (11) и (12), то получим неравенство $0{,}36P \le f \cdot 0{,}5P$, из которого следует, что $f \ge 0{,}72$. Таким образом, $f_{\min}$ = 0,72, то есть это значение наименьшего коэффициента трения, при котором возможно качение семени без скольжения.

Определим величину угловой скорости катушки высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане, исходя из ширины семяпровода (рисунок 3).

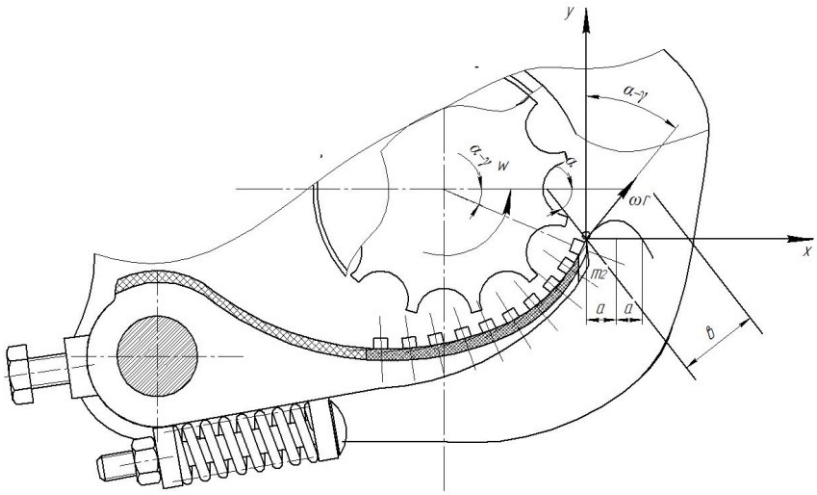


Рисунок 3 – Схема к определению траектории движения семени при сходе с клапана высевающего аппарата

Линейная скорость катушки высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане в момент сбрасывания ребром катушки направлена по углом $\alpha - \gamma$ к вертикали, следовательно, горизонтальная и вертикальная составляющие этой скорости будут равны:

$$v_{xo} = \omega \cdot r \cdot \sin(\alpha - \gamma) \quad (13)$$

$$v_{yo} = \omega \cdot r \cdot \cos(\alpha - \gamma) \quad (14)$$

где r – радиус катушки высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане, м

ω – угловая скорость катушки, рад/с

Необходимо чтобы семя попало в середину семяпровода на расстоянии $x = 2a$ от приемной кромки канала. В таком случае вершина параболы (Рисунок 3), являющейся траекторией свободного движения семя, определится абсциссой $x = v_{xo} \cdot t$,где время t определится из условия

$$v_y = \omega \cdot r \cdot \cos(\alpha - \gamma) - g \cdot t\ , \quad (15)$$

Следовательно

$$t = \frac{\omega \cdot r \cdot \cos(\alpha - \gamma)}{g}\ , \quad (16)$$

отсюда

$$a = \frac{(\omega \cdot r)^2 \cdot \sin 2(\alpha - \gamma)}{2g} \quad (17)$$

Для определения угловой скорости ω вращения катушки высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане, зададимся величиной $2a$.

$$\omega = \frac{1}{r}\sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot g}{\sin 2(\alpha - \gamma)}} \quad (18)$$

Из уравнения (18), найдем частоту вращения катушки высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане.

$$n = \frac{30}{\pi r}\sqrt{\frac{2 \cdot a \cdot g}{\sin 2(\alpha - \gamma)}} \quad (19)$$

Подставляя значение известных величинв выражение (19) найдем частоту вращения катушки высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане $n = 31{,}3 мин^{-1}$.

Заключение. В результате теоретических исследований высевающего аппарата сеялки со сплошным покрытием клапана из резины с шипами установлены зависимости наименьшего коэффициента трения, при котором возможно качение семени без скольжения,частоты вращения катушки высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане.

При использовании предлагаемого высевающего аппарата с покрытием из резины с шипами на клапане с расчётными конструктивными и кинематическими параметрами за счёт улучшенного формирования потока семян при выходе из исследуемого высевающего аппарата уменьшится неравномерность распределения семян по длине рядка, а также снижется пульсации семян, в результате повысится урожайность производимой культуры и снизятся затраты на её производство.

Список литературы

1. Ларюшин Н.П., Родин А.С., Шуков А.В. и др. Конструкция катушечного высевающего аппарата сеялки для высева зерновых культур // Нива Поволжья. – 2018. – № 4 (49). – С. 144-149.

2. Петров А.М., Сыркин В.А. Теоретическое обоснование движения семян по приемному лотку экспериментальной селекционной пневматической сеялки // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 4. – С. 70-76.

3. Цепляев А.Н., Тимошенко В.В. Теоретическое определение скорости движения частицы гидрогеля в момент отрыва от ребра катушки // Проблемы развития АПК региона. – 2016. – № 2(26). – С. 75-79.

References

1. Laryushin N.P., Rodin A.S., SHukov A.V. i dr. Konstrukciya katushechnogo vysevayushchego apparata seyalki dlya vyseva zernovyh kul'tur // Niva Povolzh'ya. – 2018. – № 4 (49). – S. 144-149.

2. Petrov A.M., Syrkin V.A. Teoreticheskoe obosnovanie dvizheniya semyan po priemnomu lotku eksperimental'noj selekcionnoj pnevmaticheskoj seyalki // Izvestiya Samarskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. – 2018. – № 4. – S. 70-76.

3. Ceplyaev A.N., Timoshenko V.V. Teoreticheskoe opredelenie skorosti dvizheniya chasticy gidrogelya v moment otryva ot rebra katushki // Problemy razvitiya APK regiona. – 2016. – № 2 (26). – S. 75-79.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ларюшин Николай Петрович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: larushinnp@mail.ru.

Родин Александр Сергеевич – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза.

Шуков Александр Васильевич – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: Sashka-shukov@yandex.ru.

Шумаев Василий Викторович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: shumaev.v.v@pgau.ru.

Кирюхина Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», Россия, г. Пенза, e-mail: kiryuhina.t.a@pgau.ru.

Author credentials

Affiliations

Laryushin Nikolay – Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University”, Russia, Penza, e-mail: larushinnp@mail.ru.

Rodin Alexander – Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University”, Russia, Penza.

Shukov Alexander – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University”, Russia, Penza, e-mail: Sashka-shukov@yandex.ru.

Shumaev Vasiliy – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University”, Russia, Penza, e-mail: shumaev.v.v@pgau.ru.

Kiryukhina Tatyana – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Penza State Agrarian University” Russia, Penza, e-mail: kiryuhina.t.a@pgau.ru.

Поступила в редакцию (Received): 15.02.2020 Принята к публикации (Accepted): 23.03.2020

УДК 631.354
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-35-42

ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ЖАТКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

[1]Ерохин Геннадий Николаевич
[1]Коновский Валерий Викторович

[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Представлена математическая модель определения производительности зерноуборочного комбайна в зависимости от условий уборки зерновых культур жатками различной ширины. Исследование выполнялось с помощью компьютерного моделирования. В качестве объектов исследования выбраны зерноуборочные комбайны компании «Ростсельмаш» различной пропускной способности. Для комбайна NOVA увеличение ширины жатки с 4м до 7м приводит к увеличению производительности на 23,7 % при урожайности 2,5т/га, на 5,8% при*

урожайности 4,0 т/га и на 4,3% при урожайности 5,5 т/га. Производительность комбайна ACROS 595 Plus с увеличением ширины жатки с 5м до 9м возрастает при урожайности 2,5т/га на 58%, при урожайности 4,0 т/га – на 7,7% , при урожайности - 5,5 т/га на 5,8%. Для комбайна TORUM 785 при урожайности 2,5 т/га даже 9-ти метровая жатка не обеспечивает полную загрузку молотилки. При урожайности 4,0 т/га и 5,5т/га полная загрузка достигается при использовании жатки шириной более 7м.Выявлено три типа зависимостей производительности зерноуборочного комбайна от ширины используемой жатки.Первый тип зависимости характеризуется высоким ростом производительности с увеличением ширины жатки. Рост производительности для этого типа связан с увеличением фактической пропускной способности и снижением затрат времени на выполнение поворотов в конце гона. Второй тип зависимости имеет более пологий характер. Рост производительности здесь в 5-10 раз ниже, чем у зависимостей первого типа и обусловлен только снижением времени на выполнение поворотов. Третий тип зависимости имеет характерную точку перегиба. С увеличение ширины жатки до этой точки наблюдается рост производительности первого типа, после точки перегиба - второго типа. Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к выбору ширины жатки для зерноуборочного комбайна и повысить эффективность его применения.

Ключевые слова: *зерноуборочный комбайн,молотилка, моделирование, производительность, ширина жатки, урожайность.*

IMPACT OF THE WIDTH OF THE HEADER ON THE PRODUCTIVITY OF THE COMBINE HARVESTER

[1]Erokhin Gennady
[1]Konovskiy Valery
[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract. *A mathematical model is presented for determining the productivity of a combine harvester depending on the conditions of harvesting grain crops with reapers of various widths. The study was performed using computer simulation. Rostselmash combine harvesters of various throughputs selected; selected as objects of study. An increase in the header width for the NOVA combine harvester from 4 m to 7 m leads to an increase in productivity by 23.7% with a yield of 2.5 t / ha, by 5.8% with a yield of 4.0 t / ha and by 4.3% with a yield 5.5 t / ha. The productivity of the ACROS 595 Plus combine with increasing header width from 5m to 9m increases with a yield of 2.5 t / ha by 58%, with a yield of 4.0 t / ha - by 7.7%, with a yield of 5.5 t / ha 5.8%. Even a 9-meter header does not provide full thresher loading for the TORUM 785 combine with a yield of 2.5 t / ha.Full load is achieved when using the header with a width of more than 7 m with a yield of 4.0 t / ha and 5.5 t / ha. Three types of dependencies of the combine harvester productivity on the width of the used header were revealed. The first type of dependence is characterized by high productivity growth with increasing header width. The increase in productivity for this type is associated with an increase in actual throughput and a reduction in the time spent on cornering at the end of the rut. The second type of dependence is more gentle. The productivity growth here is 5 - 10 times lower than that of the dependencies of the first type and is due only to a decrease in the time to complete turns. The third type of dependence has a characteristic inflection point. With increasing header width to this point, productivity of the first type increases, after the inflection point of the second type. The results obtained make it possible to reasonably approach the choice of header width for a combine harvester and increase the efficiency of its application.*

Keywords: *combine harvester, thresher, modeling, productivity, header width, yield*

Введение. Современный рынок предлагает множество марок зерноуборочных комбайнов, отличающихся своими эксплуатационными показателями. Сельхозпроизводителю приходится решать сложную задачу по выбору наиболее подходящего для его условий комбайна [1,2].Даже определившись с маркой комбайна, остаются вопросы по выбору зерновой жатки. В настоящее время зерноуборочные комбайны комплектуются жатками для уборки зерновых культур различной ширины захвата. Обычно для определенной марки комбайна производитель рекомендует 2…4 жатки различной ширины. Например, для комбайнов компании «Ростсельмаш», выпускаемых в 2020 году, предлагаются универсальные зерновые жатки «PowerStream» в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Ширина зерновой жатки у разных марок комбайна

Марка комбайна	Ширина зерновой жатки, м				
	4	5	6	7	9
NOVA	+	+	+	+	-
VEKTOR 410	-	+	+	+	+
ACROS 550	-	+	+	+	+
ACROS595 Plus	-	+	+	+	+
TORUM 750	-	-	+	+	+
TORUM 785	-	-	+	+	+
RSM 161	-	-	-	+	+

Выбор конкретной ширины жатки делается покупателем в зависимости от марки комбайна и условий уборки зерновых культур в сельхозпредприятии. При высокой урожайности предпочтение отдается жаткам с большей шириной захвата. Более обоснованный и точный выбор можно сделать, зная влияние ширины жатки на производительность комбайна при различных условиях уборки зерновых культур в сельхозпредприятии. Исследованию данного процесса и посвящена настоящая статья.

Материалы и методы. Работа выполнялась с помощью математического моделирования производительности зерноуборочного комбайна в различных условиях уборки зерновых культур жатками различной ширины [3, 4]. Суть математической модели изложена ниже.

Известно, что производительность зерноуборочного комбайнаопределяется в зависимости от рабочей скорости, ширины жатки и урожайности культуры:

$$W_1 = 0{,}1 \cdot V_P B_Ж \cdot U \,, \tag{1}$$

где W_1 - производительность зерноуборочного комбайна по времени основной работы, т/ч; V_P - рабочая скорость комбайна на уборке зерновой культуры, км/ч; $B_Ж$ - ширина захвата жатки, м; U - урожайность, т/га.

Рабочая скорость комбайна выбирается исходя из обеспечения загрузки молотилки комбайна по пропускной способности [5, 6]:

$$V_P = \frac{36 \cdot G_П}{(1+\boldsymbol{\varepsilon}) \cdot U \cdot B_Ж} \,, \tag{2}$$

где $G_П$ - пропускная способность зерноуборочного комбайна, кг/с; $\boldsymbol{\varepsilon}$ - соломистость зерновой культуры.

Рабочая скорость комбайна имеет технологическое ограничение – она не должна превышать 9…10 км/ч. В связи с эти, если полученное по формуле (2) значение скорости больше 9 км/ч, то принимаем $V_P = 9{,}0$.

Соломистость обмолачиваемой культуры определяется отношением:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{M_C}{M_З} \,, \tag{3}$$

где $M_C, M_З$ - соответственно масса соломы и масса зерна обмолачиваемой зерновой культуры.

Пропускную способность комбайна с классической барабанной молотилкой можно описать уравнениемв зависимости от его технических параметров [6, 7]:

$$G_П = 0{,}456 \cdot \left(\frac{N_Д}{32} + \frac{F_П}{0{,}26} + \frac{F_C}{1{,}5} + \frac{F_P}{0{,}8} \right) - 0{,}83 \,, \tag{4}$$

где $N_Д$ - мощность двигателя комбайна, л.с., $F_П$ - площадь подбарабанья, м^2; F_C - площадь сепарации соломотряса, м^2; F_P - площадь сепарации решет очистки, м^2.

Для зерноуборочных комбайнов с аксиально-роторной молотилкой [7, 8]:

$$G_{П} = 1{,}83 \cdot \left(\frac{N_{Д}}{126} + \frac{F_{СР}}{2} + \frac{F_{Р}}{2} \right) - 0{,}83 , \quad (5)$$

где $F_{СР}$ - площадь сепарации ротора, м^2 .

В нашем исследовании анализ влияния ширины жатки производится по отношению к оперативной производительности [9], которая рассчитывается по формуле:

$$W_{ОП} = \frac{W_1}{\tau_{ОП}} , \quad (5)$$

где $W_{ОП}$ - производительность комбайна по оперативному времени, т/ч; $\tau_{ОП}$ - удельные затраты оперативного времени.

Удельным затратам оперативного времени отвечает формула:

$$\tau_{ОП} = 1 + \tau_2 , \quad (6)$$

где τ_2 - удельные затраты вспомогательного времени.

К затратам вспомогательного времени применительно к зерноуборочному комбайну в общем случае относятся затраты времени на повороты в конце гона и на выгрузку зерна из бункера в транспортное средство. Учитывая, что ширина жатки не влияет на затраты времени по выгрузке зерна, условно принимаем:

$$\tau_2 = \frac{10^4 \cdot T_{21} \cdot W_1}{L_{Г} \cdot B_{Ж} \cdot U} , \quad (7)$$

где T_{21} - среднее время, затрачиваемое комбайном на поворот в конце гона, ч; $L_{Г}$ - длина гона, м; $B_{Ж}$ - ширина захвата жатки, м; U - урожайность, т/га.

Таким образом, полученные уравнения (1) - (7) позволяют моделировать оперативную производительность зерноуборочного комбайна при различных значениях $B_{Ж}$, U и $L_{Г}$.

Результаты и обсуждение. Исследование проводилось на примере зерноуборочных комбайнов производства «Ростсельмаш» трех марок: NOVA, ACROS595 Plus и TORUM 785. Для указанных комбайнов по формулам (4) и (5) была определена пропускная способность. Исходные данные и полученные результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Агротехнические показатели

Марка комбайна	Мощность двигателя, л.с.	Площадь			Пропускная способность, кг/с
		подбарабанья (деки ротора), м^2	соломотряса, м^2	решет очистки, м^2	
NOVA	180	0,93	4,3	3,59	6,7
ACROS 595 Plus	325	1,38	6,3	5,2	11,1
TORUM 785	506	5,4	-	5,2	16,2

Как видно из таблицы 2, выбранные комбайны обладают различной пропускной способностью. Это позволяет провести запланированные исследования применительно к разным классамзерноуборочных комбайнов. С помощью компьютерной программы, разработанной на базе предложенной математической модели, были получены зависимости оперативной производительности зерноуборочного комбайна от ширины жатки при различной урожайности зерновых культур. Приняты исходные данные: средняя длина гона $L_{Г} = 900м$, соломистость зерновой культуры $\varepsilon = 1{,}3$, среднее время на поворот в конце гона $T_{21} = 0{,}02ч$.

Рассмотрим полученные результаты применительно к выбранным маркам комбайнов. Зерноуборочный комбайн NOVA является наименее мощным из линейки комбайнов производства Ростсельмаш. Комбайн имеет классическую молотилку барабанного типа и двигатель мощностью 180 л.с. К данному комбайну предлагаются зерновые жатки шириной 4м,5м, 6м и 7м.

На рисунке 1 представлены зависимости производительности зерноуборочного комбайна NOVA от ширины жатки при урожайности зерновой культуры 2.5 т/га, 4.0 т/га и 5.5 т\га. Отметим, что здесь и в дальнейшем рассматривается производительность по оперативному времени, измеряемая в тоннах намолоченного зерна за 1 час оперативного времени.

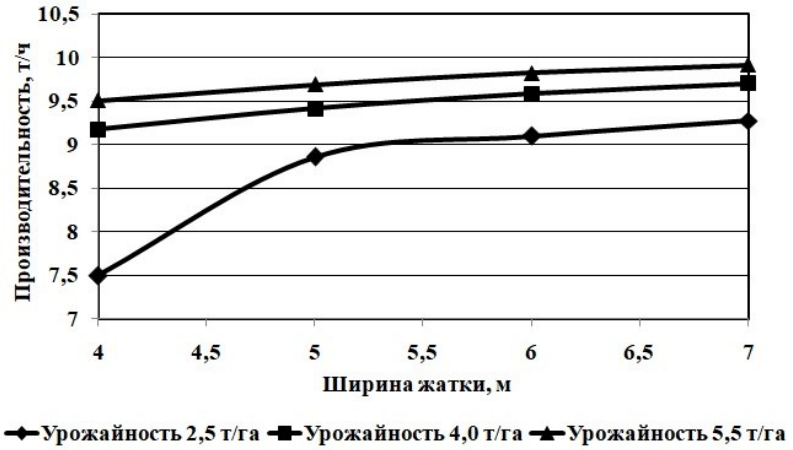


Рисунок 1 – Зависимости производительности зерноуборочного комбайна NOVA от ширины жатки и урожайности зерновой культуры

Как видно из рисунка 1, при урожайности 2,5 т/га зависимость имеет перелом при ширине жатки 5м. В этой точке рост производительности резко снижается. Это объясняется тем, что с жаткой 4м комбайн работает на максимальной скорости 9 км/ч с недозагрузкой молотилки по пропускнойспособности.

Применение 5-ти метровой жатки обеспечивает крутой рост производительности за счет увеличения фактической пропускной способности до паспортной 6,7кг/с. В дальнейшем с увеличением ширины жатки рост производительности менее значительный и обеспечивается снижением затрат времени на повороты комбайна в конце загонки.

При урожайности 4,0 т/га и 5,5 т/га обеспечивается паспортная загрузка молотилки в рассматриваемом диапазоне изменения ширины жатки и происходит плавный рост производительности. В целом для комбайна NOVA увеличение ширины с 4м до 7м приводит к увеличению производительности на 23,7 % при урожайности 2,5т/га, на 5,8% при урожайности 4,0 т/га и на 4,3% при урожайности 5,5 т/га.

Зерноуборочный комбайн ACROS 595 Plus имеет классическую барабанную молотилку и двигатель мощностью 325 л.с. Предприятие-изготовитель поставляет к нему зерновые жатки шириной 5м, 6м, 7м и 9м. На рисунке 2 представлены зависимости производительности этого зерноуборочного комбайна от ширины жатки при различной урожайности.

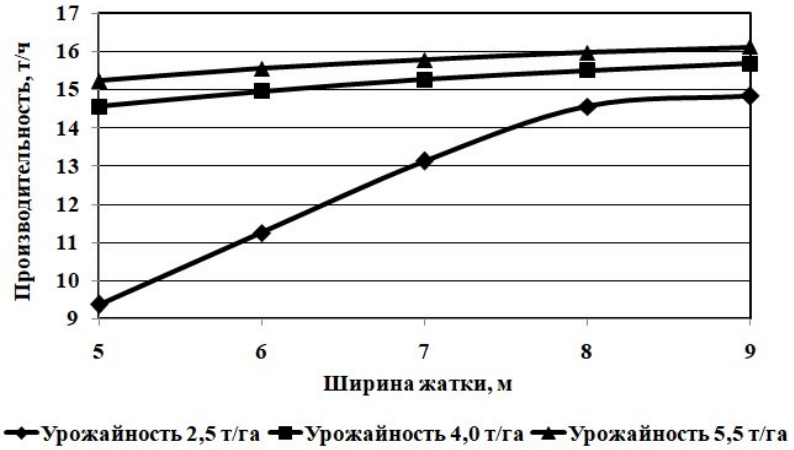


Рисунок 2 – Зависимости производительности зерноуборочного комбайна ACROS 595 Plus от ширины жатки и урожайности зерновой культуры

Зависимость производительности при урожайности 2,5 т/га (рисунок 2) показывает крутой рост при возрастании ширины захвата жатки от 5м до 8м. В этом диапазоне комбайн работает с недозагрузкой молотильного устройства и использовать жатку шириной менее 8м нецелесообразно. Производительность комбайна в этих условиях с 9-ти метровой жаткой будет на 58% выше, чем с 5-ти метровой. При урожайности 4,0т/га и 5,5т/га увеличение ширины жатки с 5м до 9м также повышает производительность комбайна соответственно на 7,7% и 5,8%.

Следующим выбранным для анализа является комбайн TORUM 785. Это комбайн с роторныммолотильно-сепарирующим устройством. Конструктивной особенностью данной марки является вращающаяся дека, которая позволяет улучшить сепарацию зерна и препятствует забиванию молотильного устройства. Комбайн оснащен двухкаскадной системой очистки с дополнительным решетом. Двигатель комбайна мощностью 506л.с. - наиболее мощный среди комбайнов компании Ростсельмаш. На рисунке 3 представлены зависимости производительности комбайна TORUM 785 от ширины захвата жатки.

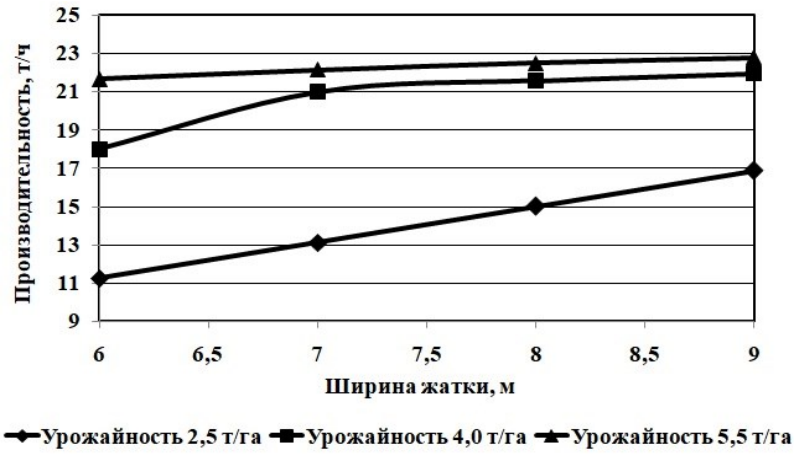


Рисунок 3 – Влияние ширины захвата жатки и урожайности зерновой культуры на производительность зерноуборочного комбайна TORUM 785

Из рисунка 3 видно, что при урожайности 2,5 т/га комбайн TORUM 785 даже с 9-ти метровой жаткой не обеспечивает полную загрузку молотилки. Здесь ширина жатки наиболее значимо влияет на производительность: увеличение ширины жатки с 7м до 9м повышает производительность комбайна на 28,6 %.

При урожайности 4,0 т/га полная загрузка достигается при использовании жатки более 7м. Здесь увеличение ширины жатки с 7м до 9м повышает производительность комбайна только на 4,5 %.

При урожайности 5,5 т/га обеспечивается загрузка молотилкина протяжении всего рассматриваемого диапазона ширины жатки и зависимость производительности имеет плавный рост. Для этой урожайности увеличение ширины жатки с 7 м до 9 м сопровождается повышением производительности комбайна только на 2,9 %.

Рассматривая полученные зависимости (рисунки 1…3), следует выделить 3 типа зависимостей: 1 тип – круто-возрастающая. 2- тип - полого-возрастающая, 3тип – круто-возрастающая с перегибом на полого-возрастающую.

Первый тип зависимости характерен для комбайнов высокой производительности при низкой урожайности зерновой культуры (рисунок 3, урожайность 2,5 ц/га). Рост производительности комбайнов с увеличением ширины жатки для этого типа связан с увеличением фактической пропускной способности и снижением затрат времени на выполнение поворотов в конце гона.

Второй тип чаще встречается у комбайнов более низкой производительности при высокой урожайности (рисунок 2, урожайность 2,5 ц/га). Рост производительности здесь в 5…10 раз ниже чем у зависимостей 1 типа и обусловлен только снижением времени на выполнение поворотов.

Третий тип зависимости имеет характерную точку перегиба (рисунок 3, урожайность 2,5 ц/га). С увеличение ширины жатки до этой точки наблюдается рост производительности первого типа, после точки перегиба - второго типа.

Выводы. Проведенные исследования на примере комбайнов производства Ростсельмаш показали значимое влияние ширины используемой зерновой жатки на их производительность. В целом предпочтительнее использовать более широкие жатки. Однако здесь следует учитывать, что ширина может быть ограничена рельефом полей и требованиями, связанными с транспортными переездами. Кроме того, более широкие жатки обычно являются более дорогостоящими. Применяя более узкие жатки, важно не попасть в зону неполного использования пропускной способности комбайна, что существенно снижает его производительность. Полученные результаты позволяют обоснованно подходить к выбору ширины жатки для зерноуборочного комбайна и повысить эффективность его применения в сельхозпредприятии.

Список литературы

1. Сазонов С.Н., Сазонова Д.Д. Техническое оснащение как фактор восстановления фермерских хозяйств // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – №5. – С.24-26.

2. Жалнин Э.В. Типаж зерноуборочных комбайнов: какой есть и какой нужен // Сельский механизатор. – 2012. – №8. С. 6-8.

3. Ерохин Г.Н., Коновский В.В. Эксплуатационно-технологические показатели зерноуборочных комбайнов // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – №6. – С.18-20.

4. Ерохин, Г.Н., Коновский В.В. Модель использования зерноуборочных комбайнов в сельскохозяйственном предприятии // Наука в центральной России. –2017. –№4(28) . –С. 49-56.

5. Ерохин Г.Н., Решетов А.С., Коновский В.В. Оценка уровня использования производительности зерноуборочных комбайнов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 7. – С. 30-32.

6. Астафьев В.Л., Голиков В.А. Обоснование типажа зерноуборочных комбайнов и жаток применяемых в регионах Казахстана // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Т.12. – №4. – С.10-15.

7. Жалнин Э.В. Расчет основных параметров зерноуборочных комбайнов. М.: ВИМ, – 2011. – 102 с.

8. Жалнин Э.В., Ценч Ю.С., Пьянов В.С. Методика анализа технического уровня зерноуборочных комбайнов по функциональным и конструктивным параметрам // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2018. – Том 12. – №2. – С.4-8.

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

References

1. Sazonov S.N.,Sazonova D.D. Tekhnicheskoe osnashchenie kak faktor vosstanovleniya fermerskih hozyajstv //Mekhanizaciya i elektrifikaciya sel'skogo hozyajstva. – 2010. – №5. – S.24-26.

2. ZHalnin E.V. Tipazh zernouborochnyh kombajnov: kakoj est' i kakoj nuzhen // Sel'skij mekhanizator. – 2012. – №8. S. 6-8.

3. Erohin G.N., Konovskij V.V. Ekspluatacionno-tekhnologicheskie pokazateli zernouborochnyh kombajnov // Tekhnika v sel'skom hozyajstve. – 2012. – №6. –S.18-20.

4. Erohin, G.N., Konovskij V.V. Model' ispol'zovaniya zernouborochnyh kombajnov v sel'skohozyajstvennom predpriyatii // Nauka v central'noj Rossii. –2017. –№4(28) . –S. 49-56.

5. Erohin G.N., Reshetov A.S., Konovskij V.V. Ocenka urovnya ispol'zovaniya proizvoditel'nosti zernouborochnyh kombajnov // Traktory i sel'hozmashiny. – 2014. – № 7. – S. 30-32.

6. Astaf'ev V.L., Golikov V.A. Obosnovanie tipazha zernouborochnyh kombajnov i zhatok primenyaemyh v regionah Kazahstana // Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii. – 2018. – T.12. – № 4. – S.10-15.

7. ZHalnin E.V. Raschet osnovnyh parametrov zernouborochnyh kombajnov. M.: VIM, – 2011. – 102 s.

8. ZHalnin E.V., Cench YU.S., P'yanov V.S. Metodika analiza tekhnicheskogo urovnya zernouborochnyh kombajnov po funkcional'nym i konstruktivnym parametram // Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii. – 2018. – Tom 12. – №2. – S.4-8.

9. GOST R 52778-2007. Ispytaniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki. Metody ekspluatacionno-tekhnologicheskoj ocenki. – M.: «Standartinform». – 2008. – 24s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ерохин Геннадий Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов,e-mail: witin4@rambler.ru

Коновский Валерий Викторович – научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов,e-mail: witin4@rambler.ru.

Author credentials

Affiliations

Erokhin Gennady – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: witin4@rambler.ru.

Konovskiy Valery – Candidate of Technical Sciences, Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: witin4@rambler.ru.

Поступила в редакцию (Received): 23.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2020

УДК 631.303
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-42-51

О ПРОДУКТИВНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

[1]Тишанинов Николай Петрович

[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Дана систематизация задач, решаемых теоретическим путем, применительно к сложным технологическим процессам. Приведен анализ продуктивности применения наиболее разработанных в отраслевой науке теорий. Установлено, что теория разрушения твердых тел, теория триеров, теория процессов обработки почвы и другие, созданные выдающимися учеными, обеспечили: содержательность анализа сложных технологических процессов, аргументированность выбора и оценки приоритетов их модернизации; видение состава и содержания экспериментальных задач. Однако, они построены на упрощенных физических моделях, которые не адекватны современным реализациям технологических процессов, поэтому их использование приводит к малопродуктивным, а иногда ошибочным решениям. Установлено, что детальная систематизация процессов и выработанные на ее основе решения по технологии измельчения материалов позволяют многократно повысить эффективность процесса и экспериментально опровергнуть базовое положение «унифицированной» теории. Принятые на основе детального анализа процесса конструктивные решения обеспечили возможность реализации процесса измельчения при сложении скоростей первичного и вторичного ударов, осуществить избирательность ударного разрушения частиц, которые сохраняют существенные размеры и упругость. Эти решения кратно снижают непродуктивные затраты энергии на циркуляцию воздушно-продуктового слоя в дробильной камере, характерные для серийно выпускаемых машин. Дана оценка существенных расхождений результатов, полученных теоретическим и опытным путем при созданий триерных технологий. Созданная принципиально новая экспериментальная база позволила получить основы для проектирования триеров и управления технологиями триерной очистки зерна. Эти возможности позволили предотвратить ошибочные оценки производительности на основе традиционной теории триеров, разработать регламент подготовки триеров к работе по основным параметрам.*

Ключевые слова: *теория, упрощенные физические модели, технологии, продуктивность решений, формализации, адекватность, ошибочность, неуниверсальность.*

ABOUT PRODUCTIVITY OF THEORETICAL RESEARCHES OF COMPLEX TECHNOLOGICAL PROCESSES

[1]Tishaninov Nikolai

[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract. *Systematization of problems solved theoretically in relation to complex technological processes is given. The analysis of productivity of application of the most developed theories in branch science is given. It is established that the theory of destruction of solids, the theory of triers, the theory of tillage processes, and others created by outstanding scientists, provided: content analysis of complex technological processes, reasoned selection and evaluation of priorities for their modernization; vision of the composition and content of experimental tasks. However, they are built on simplified physical models that are not adequate for modern process implementations, so their use leads to unproductive and sometimes erroneous solutions. It is established that detailed systematization of processes and solutions developed on the basis of it for the technology of materials grinding can significantly increase the efficiency of the process and refute the basic position of the unified theory. Structural decisions taken on the basis of a detailed analysis of the process made it possible to implement the grinding process by adding the velocities of the primary and secondary impacts, to selectively impact the destruction of particles that retain significant dimensions and elasticity. These solutions reduce the unproductive energy costs for the circulation of the air-product layer in the crushing chamber, which are typical for mass-produced machines. Created a fundamentally new experimental base made it possible to obtain the basics for the design of trier and control technology trier grain cleaning.. These features made it possible to prevent erroneous performance estimates based on the traditional Trier theory, and to develop regulations for preparing triers to work on the main parameters.*

Keywords: *theory, simplified physical models, technologies, decision productivity, formalization, adequacy, error, non-universality.*

Введение. Перед основоположниками земледельческой механики стояли огромные по объему и сложности задачи, а возможности первопроходцев, как подтвердила история, были уникальными. В частности, В.П.Горячкин ставил перед собой задачу – «создать учение о сельскохозяйственных машинах и двигателях». Реалистичность решения этот задачи даже в современных условиях силами всего научного сообщества вызывает сомнение. Поэтому тяга первопроходцев к крупным научным обобщениям, представляющим собой универсальные законы, избыточно обобщающим критериям, их попытки моделирования условий использования машинных технологий и другое воспринимаются естественными для того времени. Многое нашим выдающимся ученым удалось и долгие десятилетия служило основой научного толкования сложных технологических процессов в сферах образования и научно-технического прогресса. Однако, опыт использования «унифицированных» законов в созидательном процессе позволяет заметить, что они построены на упрощенных физических моделях, которые не адекватны современным реализациям сложных технологий. Вследствие чего они имеют ограниченную продуктивность в применении, иногда противоречат уже реализованным достижениям в технологиях. Поэтому оценка продуктивности теоретических исследований сложных технологических процессов с использованием «унифицированных»законов, построенных на упрощенных физических моделях представляет собой актуальную задачу.

Материал и методы. В работе использованы библиографический метод, расчетно-конструктивный, метод системного анализа и результаты экспериментов.

Результаты и их обсуждение. Каждый исследователь в естественнонаучных дисциплинах, приступая к решению новой задачи, находится в широчайшем диапазоне возможностей аналитического познания – от использования крайне ограниченного объема объективных знаний

по исследуемому объекту до недосягаемого объективистского уровня. Необходимость использования теоретического анализа в познании сложных явлений обусловлена: сокращением затрат средств и времени (самый дешевый способ познания); естественными потребностями человека в росте интеллектуального потенциала; демонстрацией интеллектуальных возможностей при квалификационной оценке ученого. А каковы реальные возможности теоретических исследований сложных технологических процессов, в частности?

Решаемые теоретическим путем задачи в области механизации технологических процессов можно разделить на следующие группы:

1) обоснование и выбор предпочтительного варианта реализации технологического процесса по совокупности критерьев;

2) формирование факторного пространства для последующих экспериментальных исследований;

3) конкретизация области эксперимента по исследуемым факторам;

4) оценка работоспособности машины и оборудования при заданных режимах и свойствах рабочей среды;

5) обоснование режимов работы вновь создаваемых машин и оборудования;

6) обоснование размеров и форм технологических емкостей;

7) обоснование типа и параметров рабочих органов, их размещения в технологических емкостях;

8) оценка структуры энергозатрат по составным элементам технологического процесса;

9) оценка производительности машины и оборудования на различных режимах работы;

10) оценка интегрального показателя энергозатрат и удельной энергоемкости процесса.

Выше перечислены наиболее типичные задачи теоретических исследований. Первые три задачи решаются преимущественно аналитическим путем, не прибегая к формализации оснований для принятия решений, с учетом априорной информации об объекте исследований. По остальным 7-ми задачам в подавляющем большинстве случаев авторы представляют решения в формализованном виде, не всегда оценивая объективность и продуктивность полученных результатов.

Продуктивность теоретического анализа сложных механизированных сельскохозяйственных процессов в формализованном виде целесообразно проследить на примеренаиболее разработанных в отраслевой науке теорий с длительной историей развития и авторитетным авторским представительством. Этим требованиям полностью удовлетворяют: теория разрушения твердых тел и измельчения материалов, которая используется при разработке дробилок, измельчителей, плющилок и других машин для сельского хозяйства; теория триеров; теория процессов обработки почвы и др. Как зарождались эти теории?

По первой из перечисленных теорий следует предположить, что жизненные наблюдения первопроходцев и необходимость упрощения физических моделей процессов на исходных этапах познания склонили их к признанию приоритетов ударного и режущего воздействия на разрушаемые тела при формировании базовых положений теории. У них не было возможности адаптировать теорию к перспективным реализациям технологического процесса. Поэтому оценка адекватности традиционных теоретических представлений современным технологическим достижениям составляет существенный научный и практический интерес.

Модель ударного воздействия рабочего органа на зерновку (рисунок 1 а, б) в молотковой или роторной дробилках [1, 2] не позволяет провести его экспериментальную оценку. Очень сложно воспроизводить условия опытов в части ориентации зерновки относительно ударной поверхности. Кроме того, сложно обеспечить гарантии идентичного столкновения ударной поверхности рабочего органа с зерновкой при циркулировании воздуха и частиц измельченного зерна с большими скоростями в зоне ожидаемого контакта.

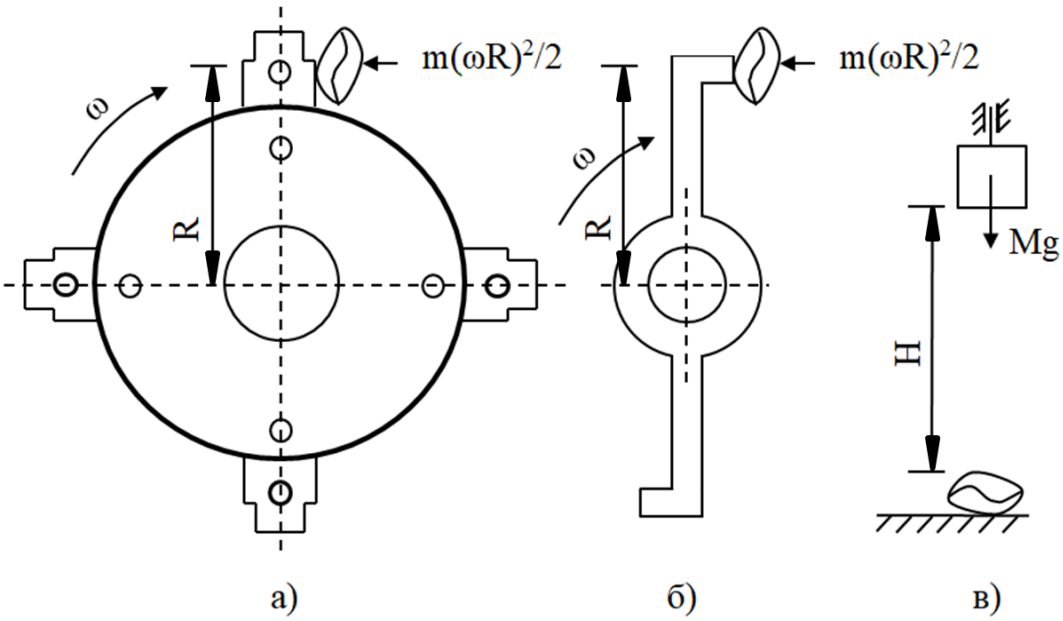


Рисунок 1 – Физические модели процессов ударного разрушения зерна

В вариантах а) и б) энергия разрушения, передаваемая зерновке при ударе, рассчитывается по формуле [2]:

$$A_{1,2} = m(\omega R)^2/2, \quad (1)$$

где m – масса зерновки, кг;

ω – угловая скорость вращения молота, 1/с;

R – радиальное расстояние до центра удара, м.

Подтверждением сложности решения задач являются результаты исследований академика В.И. Сыроватка [3], который утверждает, что разрушение зерновки происходит после 15…40 ударов, но энергетические характеристикикаждого из ударов автор не может оценить. После первых разрушающих ударов масса частиц и скорость удара постоянно уменьшаются, так как составные части зерновки вовлекаются в циркулирующий поток воздушно-продуктового слоя. Поэтому реальная скорость ($\vartheta_р$) соударения частиц с молотками и ротором дробилок будет:

$$\vartheta_р = \omega R - \vartheta_п, \quad (2)$$

где $\vartheta_п$ – скорость переноса частиц (скорость частиц воздушно-продуктового слоя в зоне размещения молотков или ударной пластины ротора), м/с.

Процесс разрушения зерновки по физической модели в) используется экспериментаторами для определения энергии (сил) перенапряжения – A = MgH. При этом исследователи имеют возможность не формализованного, а только зрительного подтверждения известных теорий разрушения твердых тел – поверхностной теории, сформулированной П.Риттингером и объемной теории, разработанной В.Л.Кирпичевым – Ф.Киком.

Вышеупомянутые теории устанавливают пропорциональность энергии разрушения, соответственно, площади вновь образованной поверхности (приращению поверхности) и приращению деформированной части объема. Возможности использования анализируемых теорий разрушения твердых тел с оценкой точности анализа процесса ограничены. Эти результаты невозможно получить без учета состояния поверхности [1] и прочностных свойств разрушаемых материалов, технологических требований к степени и однородности измельчения, без учета иных (помимо ударного) способов измельчения (истирание, резание), имеющих место в реальных технологических процессах. Авторы анализируемых теорий игнорировали прикладные особенности рассматриваемых явлений и недооценивали последствия такого подхода, который может привести к ошибочным выводам. Об этом аргументированно предупреждал академик Ж.И.Алферов. Он говорил: - «Неприкладной науки не бывает».

Если потребность в анализе процесса и последующих расчетах не вызвана решением задач применительно к конкретной технологии, то эти задачи становятся неопределенными, а решения – бессмысленными. Автор работы [2] подтверждает, что полувековая дискуссия о преимуществах той или иной теории разрушения твердых тел не дала существенных результатов, так как обе они «страдают односторонностью и не учитывают влияния конкретных условий процесса измельчения на его энергоемкость (дисперсность материала, конструкция, режимы измельчения и др.)». То есть обе теории не могут служить расчетной основой при проектировании технологий и технических средств для измельчения материалов. Они позволяют составить лишь отвлеченное (абстрактное) представление об энергозатратах на технологический процесс.

Учитывая, что формирование теории разрушения твердого тела происходило в 19-ом веке, возникает вопрос – с чем связано оживление внимания ученых к теории в 20-ом веке при сохранении двух традиционных подходов к ее толкованию? Анализ развития науки и техники в начале 20-го столетия позволяет определить три причины возобновления интереса к теории: 1) актуальность проблемы, обусловленная бурным развитием промышленности – в десятках тысяч технологий используется операция измельчения материалов; 2) новые надежды на теоретические изыскания, обусловленные открытиями в начале века новых результативных физических эффектов в теории прочности, выполненными английским ученым А.А.Гриффитсом в части взаимосвязи прочности с микротрещинами и размерами кристаллических структур и А.Ф. Иоффе, подтвердившим высокую степень (до 3-х порядков) взаимосвязи прочностных свойств с состоянием поверхности материала (опыты с солевым куском); 3) косвенная причина, обусловленная актуальностью проблемы и привлечением новых ученых к решению множества частных задач, которые не смогли найти новых подходов – когда количество не перешло в качество, а ожидания роста результативности не сбылись.

В дальнейшем теория разрушения твердых материалов развивалась по пути детализации анализа энергозатрат и ее адаптации к различным способам реализации процесса, видам измельченных материалов и типам рабочих органов с учетом требований к качеству измельчения.

Огромный вклад в развитие теории на этом этапе внесли В.И.Сыроватка, С.В. Мельников, В.А. Елисеев, О.С. Марченко, А.П. Макаров и многие другие. В этих работах раскрыта структура энергозатрат по элементам процесса во многих частных реализациях технологий измельчения материалов, обобщение которых позволяет производить параметрическое описание структуры энергозатрат применительно к новым техническим решениям.

В таблице 1 представлено решение этой задачи применительно к роторной дробилке с конструктивно-технологической схемой по патентам РФ №2304023, 2550655 [4–7].

Таблица 1 – Параметрическое описание элементов энергозатрат на процесс измельчения твердых материалов роторной дробилкой

№ п/п	Наименование элементов процесса	Параметрические взаимосвязи элементов процесса с режимами работы и параметрами дробилки
1	Разрушение частиц ударом	$A_k = K_1 V = K_1 \rho^{-1} m$; $A_R = K_R D^2 = K_R (m/\rho)^{2/3} = K_R{}^{\mathrm{I}}/m_{\text{Д}}$
2	Циркуляция продукта в дробильной камере	$A_{\text{ЦК}} = K_{\text{С}} m_{\text{Д}} \vartheta_{\text{Л}}{}^2/2 + A_{\text{ТР}}$; $A_{\text{ТР}} = f(m_{\text{Д}}, \text{К}_{\text{ТР}}, \omega_{\text{Р}}, R_B)$
3	Перемешивание продукта в циркулирующих слоях	$A_{\text{ПМ}} = \vartheta_{\text{Л}} t_{\text{Р}} \left[K_{\text{пм}} L q_e (1 - K_c) + K_\alpha S_P \sigma_{\text{Л}}\right]$; $L = f_L(m_{\text{Д}}, h, b, n_{\text{н}})$; $q_e = f_q(m_{\text{Д}}, \rho_{\text{Д}}, \omega_{\text{Р}}, K_{\text{ТР}})$
4	Выброс частиц в балластный объем	$A_{\text{ВБ}} = K_{\text{ВБ}} m_{\text{Д}} \vartheta_{\text{ВБ}}{}^2/2$; $\vartheta_{\text{ВБ}} = f_v(\vartheta_{\text{л}}, m_{\text{ч}}, \rho, l)$;
5	Эвакуация продукта из дробильной камеры	$A_{\text{Э}} = K_{\text{Э}} W_{\text{Д}} \vartheta_{\text{ВБ}}{}^2 t_{\text{из}} = k_{\text{Э}} m_{\text{Д}} \vartheta_{\text{ИС}}{}^2$;
6	Циркуляция воздуха в дробильной камере	$A_{\text{В}} = K_{\text{В}} \vartheta_{\text{Л}}{}^3 t_{\text{Р}}$; $K_{\text{В}} = f_{\text{В}}(V_{\text{Д}}, h, b, \omega_{\text{Р}}, \rho_{\text{В}}, m_{\text{Д}}, n_{\text{н}})$

В таблице 1 указаны символы:

$A_k, A_R, A_{\text{ЦК}}, A_{\text{ТР}}, A_{\text{ПМ}}, A_{\text{ВБ}}, A_{\text{Э}}, A_{\text{В}}$–элементы удельных энергозатрат на измельчение твердых тел по объемной или поверхностной теориям, кВт-ч/т;

$K_1, K_2, K_R, K_B, K_{\text{С}}, K_{\text{пм}}, K_\alpha, K_{\text{ВБ}}, K_{\text{В}}, K_{\text{Э}}$–коэффициент пропорциональности;

$\vartheta_{\text{Л}}, \vartheta_{\text{ИС}}, \vartheta_{\text{ВБ}}$ – скорость (линейная) ротора, истечения продукта, выброса частиц, м/с;

$q_e, \sigma_{\text{Л}}$ – удельное касательное и лобовое сопротивление перемещению рабочего органа, н/м, н/м^2;

$V, V_{\text{Д}}$ – объем разрушаемого тела и дробильной камеры, м^3;

$\rho, \rho_{\text{Д}}, \rho_{\text{В}}$– плотность разрушаемого материала, диспергированного продукта, воздуха, кг/м^3;

$m, m_{\text{Д}}, m_{\text{ч}}$ – масса разрушаемого тела, продукта в дробильной камере, частиц, кг;

$\omega_{\text{Р}}$ – частота вращения ротора, с$^{-1}$;

$n_{\text{Н}}$ – число ножей ротора, шт;

$K_{\text{ТР}}$ – коэффициент трения;

$t_{\text{Р}}, t_{\text{ИЗ}}$ – время работы, измельчения продукта в камере;

D, L, R_B, l – линейные размеры разрушаемого материала, кромок рабочего органа, дробильной камеры, частиц, м;

h, b – высота и ширина вертикальной стенки ротора, м;

S_P – фронтальная площадь рабочего органа, м^2.

Из таблицы 1 видно, что даже при детализации энергозатрат на шесть составляющих возможности их формализованного представления в завершенном виде не появляются. Циркулирующий в дробильной камере материал представляет собой полидисперсную среду. Массовые доли частиц различных линейных размеров меняются во времени, частоту и характер их взаимодействия с рабочими органами установить не представляется возможным, скорости и направления движения частиц в дробильной камере чрезвычайно изменчивы.По этим причинам попытки многих современных авторов представить решения вышеперечисленных 10-ти задач в аналитической форме и завершенном виде доверия не вызывают. Тем более,не воспринимаются обоснованными требования к квалификационным работам о сходимости теоретических и экспериментальных исследований.

При создании теории триеров основоположники земледельческой механики – В.П. Горячкин, М.Н. Летошневи другие не ставили перед собой задачу подгонять теоретические формализации к эксперименту (или наоборот). Они заложили основы физического моделирования и параметрического описания технологических процессов, которые обеспечивали: содержательность анализа; выбор и оценку приоритетов технологической модернизации; конкретизацию состава и содержания экспериментальных задач. Триерные машины используются в зерноочистительных технологиях более 100 лет. До сих пор эффективной замены ячеистым поверхностям, используемым для разделения частиц зерносмеси по их длине, не найдено. Стандартный кукольный ячеистый цилиндр обеспечивает до 80 тысяч сепарирующих воздействий на рабочую среду при технологических потерях в управляемом режиме до 0,08%. Эти показатели на 2…3 порядка выше, чем обеспечивает технология с использованием фотосепараторов.

Перспектива эффективного использования триеров с ячеистыми цилиндрами и масштаб проблемы (миллиарды тонн зерна ежегодно подвергаются триерной очистке от примесей перед хранением и переработкой) определяли мотивацию труда авторов в создании теории процесса. Хотя без объективных экспериментальных знаний о динамике процессов внутри ячеистых цилиндров триеров аналитическая оценка их производительности, в частности, профессором М.Н. Летошневым отличалась от фактической в 2,5…3 раза. Аналогичные существенные расхождения с экспериментом имеются у уважаемых авторов книг и учебников – академика Г.Е. Листопад, профессоровА.Б. Лурье, А.Я. Соколова, Н.А. Урханова[8–11].

Этому обстоятельству есть объяснения – на тот периодвремени отсутствовали сведения о том, что степень заполнения ячей зерновками основной культуры изменяется по длине ячеистого цилиндра в 38 раз при оптимальной загрузке и зависит от многих факторов. За счет установленного в ФГБНУ ВНИИТиН эффекта инерционного удержания контактирующего слоя при n > 45 об/мин степень заполнения ячей цилиндра в его начале превышает 4 зерновки на 1 ячею. Эту ситуацию невозможно было бы представить на аналитическом этапе исследований. Эффект динамической сегрегации примесных частиц в циркулирующих слоях сегмента,

установленный нами впервые ускоряет их выделение в 7…11,4 раза, что также невозможно оценить в результате теоретического анализа. Эти результаты получены автором совместно с докторантом – А.В. Анашкиным.

До получения объективных знаний о закономерностях процессов, протекающих в ячеистых цилиндрах процессор М.Н. Летошнев при расчете производительности использовал предположительные оценки Г.Т. Павловского (ВИМ) по степени заполнения ячей цилиндров зерновками основной культуры. Авторы работ [8–11] использовали в расчетах производительности триеров удельные показатели загрузки ячеистой поверхности (0,18 кг/с·м^2 для пшеницы), что исключало взаимосвязь производительности с режимами работы и настроечными параметрами триеров.

Указанные расхождения многие десятилетия находило понимание в научной среде. Последователи понимали, что без глубоких толкований основоположниками сущности сложных механизированных процессов, которые составляют основы земледельческой механики, сложно было-бы создавать современную исследовательскую базу для проверки и уточнения ими же созданных теоретических основ.

Часто ли расходятся аналитические оценкипроцесса и его эмпирическая интерпретация? В большинстве случаев одно вытекает из другого. Без предварительного целевого анализа сущности явления все последующие этапы исследований будут представлять собой не вполне осмысленное и крайне не продуктивное творчество. Противоречия возникают в двух случаях:

1) когда объективное толкование явления с целью познания подменяется неудачной (ошибочной) формализацией;

2) когда прежние представления о сущности явления коренным образом изменяются или существенно корректируются с использованием новых возможностей в эксперименте.

В первом случае, как правило, имеют место расчетные оценки процесса, которые чаще всего авторы квалификационных работ выдают за «теорию».Относительно второго случая, отражающего естественнуюэтапность познания окружающей действительности, следует сослаться на мнение А.Энштейна об относительности, условности и субъективности (релятивизме) каждого нового этапа познания, что закреплено в 3-ем базовом принципе физики - принципе дополнительности, который гласит: «…альтернативой сложной истине является другая сложная истина». Этот принцип следовало бы распространить разработчикам и на сомнительную продуктивность решений, принятых по результатамтеоретических исследований. Нельзя в полной мере заменить сакральность творческого процесса логикой, правилами, объемом знаний и другими инструментами. Эти инструменты в той же степени условны в созидательном процессе, что не всегда находит понимание у исследователей. Во многих случаях авторы квалификационных работ, «обороняясь» авторитетом предшественников, завышают возможности их теоретических изысканий. Непонятно, в частности, решение автора работы [12] использовать в «качестве теоретической основы» рациональную формулу В.П.Горячкина для определения показателей энергоемкости процесса измельчения кормов молотковой дробилкой:

$$P = f^{|}G + kab + \varepsilon abv^2, \quad (3)$$

где P - общее тяговое сопротивление;

$f^{|}$ – коэффициент, учитывающий усилие на протаскивание орудия (плуга) весом G;

k – коэффициент сопротивления деформации, отнесенной к единице площади пласта;

a и b – соответственно ширина и толщина пласта в поперечном сечении;

v – скорость движения орудия (плуга);

ε – коэффициент изменения живой силы частицы среды (почвы).

С этим подходом А.П. Макарова [12] соглашается в своей работе и академик В.И. Сыроватка[3].

Вместе с тем, рациональная формула (3) В.П. Горячкина является параметрическим уравнением, предназначенным для структуризации тягового сопротивления плугу с целью упрощения анализа процесса вспашки. Она не позволяет количественно оценивать составляющие силы тяги или энергозатрат даже на целевой процесс.В камере молотковой дробилки имеет место круговая циркуляция воздушно-продуктового слоя, там нет монолитного «пласта», нет объемной деформации, нет устойчивой зоны сдвиговых напряжений. Формула (3) непригодна для поэлементного параметрического описания процесса измельчения кормов,она не продуктивна в этом приложении.

Очевидно по этой причине авторы работ [3, 12] на последующих этапах своих исследований игнорируют достоинства рациональной формулы В.П. Горячкина, как «теоретической основы» для энергетической оценки измельчения фуражного зерна, ипредлогают другое уравнение:

$$A = A_{XX} + A_{ПР} + A_{V^2}, \quad (4)$$

где А – общая работа машины;

A_{XX} – энергия, затрачиваемая на холостой ход рабочих органов;

$A_{ПР}$ – энергия, затрачиваемая на процесс измельчения материала;

A_{V^2} – энергия, затрачиваемая на отбрасывание материала со скоростью V.

Последующая детализация составляющих уравнения (4) авторами [3,12] не устанавливает их взаимосвязей с физико-механическими свойствами измельчаемых материалов, не учитывает затраты энергии на некоторые элементы процесса (перемешивание, резание, циркуляция), не позволяет определять количественно коэффициенты пропорциональности. То есть авторы и в этом случае не доводят теоретический анализ до уровня целевой продуктивности и завершенности, которые позволили бы принимать на их основе результативные решения, обеспечивали бы возможность сопоставлять теорию и эксперимент.

Однако, как было сказано выше, без аналитического этапа исследований последующие этапы представляют собой не вполне осознанное творчество, а потому – менее продуктивное. Более того, накопление аналитической базы знаний позволяет использовать в созидательном труде детальный анализ и обеспечивать большую продуктивность. Из систематизации элементов энергозатрат, представленной в таблице 1, видно, что все элементы зависят от линейной скорости рабочего органа (ротора) и производных от нее – скорости выброса частиц ($\vartheta_{ВБ}$)и эвакуации продукта ($\vartheta_{С}$). Причем зависимость элементов энергозатрат от указанных скоростей квадратическая и кубическая.

Из изложенного выше становится очевидным путь совершенствования технологического процесса – понижение скоростного режима работы дробилки до возможно минимального уровня. Однако этот путь противоречит основному закону измельчения твердых тел, предложенному академиком П.А. Ребиндером, который в развернутом виде можно представить так:

$$A = A_V + A_S = k\Delta V + \alpha\Delta S, \quad (5)$$

где А – полная работа;

A_V – работа, затрачиваемая на деформации в деформируемой части тела;

A_S – работа, затрачиваемая на образование новых поверхностей;

k, α – коэффициенты пропорциональности.

П.А. Ребиндер считал, что уравнение (5) учитывает недостатки поверхностной и объемной теорий разрушения твердых тел. Из уравнения (5) следует, что КПД процесса будет:

$$\eta_{изм} = \frac{A_S}{A_V + A_S}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что для увеличения $\eta_{изм}$ необходимо увеличивать работу силперенапряжения (она пропорциональнаA_S). С этим положением соглашаются видные представители анализируемого направления науки – В.И. Куянов, С.В. Мельников и др. Более того, С.В. Мельников предлагал увеличивать работу сил перенапряжения за счет увеличения скорости рабочих органов, для молотковых дробилок - $\vartheta_{Л} \geq 100$ м/с, что ставит под вопрос техническую надежность работы за счет «выедания эпюры» инерционного поля вращающихся масс в зоне загрузки дробилки продуктом и резкого возрастания радиального биения рабочих органов.

Противоречию, вытекающему из закона П.А. Ребиндера и выполненной систематизации процесса (смотри таблицу 1), можно найти простое объяснение. Известные ученые при формировании поверхностной и объемной теории стремились получить универсальные закономерности, используя простые физические модели (см. рисунок 1), а выполненная нами систематизация адаптирована к реальному технологическому процессу.

Закон П.А.Ребиндера является обобщением двух теорий. Аналогичную попытку создать «примирительную» теорию предпринял Ф.Бонд. Он считал, что затраты энергии на измельчение «пропорциональны среднему геометрическому из объема и площади поверхности измельчаемого куска». Общим для вышеизложенных теорий является отвлеченное толкование процессапо нереалистичным для настоящего времени физическим моделям.Этим объясняет пониженную продуктивность известных теорий разрушения твердых тел профессор С.В. Мельников, который

считал, что они не могут быть использованы в расчетах. Его аргументы вполне убедительно подтверждены экспериментами, выполненными автором совместно с аспирантом С.Г. Калиниченко на базе ФГБНУ ВНИИТиН.

Нами установлено [4–7], что доля затрачиваемом энергии на циркуляцию воздушно-продуктового слоя в дробильной камере, в которой происходит доизмельчение частиц истиранием и резанием о кромки рабочих органов, составляет 77…90% от общих затрат во всем диапазоне параметров рабочих органов и режимов работы роторной дробилки [4, 6]. Далее была реализована экспериментальная проверка эффекта снижения энергоемкости процесса при снижении активности воздействия рабочих органов на рабочую среду. При снижении скорости ротора с 2880 об/мин до 2275 об/мин и изменении параметров решетных шиберов масса циркулирующего продукта в дробильной камере увеличивалась в 1,5…2,5 раза, а удельные энергозатраты снизились на 22…46%. Дальнейшие понижение режима работы от 2275 об/мин до 1672 об/мин позволило дополнительно снизить удельные энергозатраты на технологический процесс на 20…44%.

Из вышеизложенного следует, что снижение удельной энергоемкости процесса при измельчении жмыха (ракушки) с пикнометрической плотностью до 1350 кг/м^3, соизмеримой с плотностью зерновок пшеницы, достигнуто двумя возможностями снижения силового воздействия на измельчаемый материал: снижением скоростного режима работы роторной дробилки; увеличением массы циркулирующего материала в дробильной камеры. Оценки удельной энергоемкости процесса производились при сопоставимых значениях модуля помола. Результаты оценки расходятся с базовым положением теории академика П.А.Ребиндера. Это подтверждает ограниченную продуктивность, а иногда и противоречивость «универсальных» теорий, построенных на упрощенных физических моделях. Авторы работ [3, 12], опираясь на «теоретически основы» в исследованиях молотковых дробилок, в частности, не получили существенных результатов по снижению энергоемкости процесса.

Достигнутые нами результаты по технологии измельчения жмыха не вытекают непосредственно из теоретического анализа, они обеспечены конструктивными решениями, которые состоят в следующем - размещение отражателей по внутренней поверхности дробильной камеры позволило осуществлять ударное разрушение частиц при сложении линейных скоростей ротора и упругого отскока частиц от отражателей. При этом реализуется рациональный избирательный процесс разрушения частиц -разрушаются на встречных скоростях частицы, которые сохраняют упругость и значительные размеры в отличие от процесса, происходящего в молотковых дробилках [3, 12], где скорость удара ($\vartheta_{\text{Р}}$) является результатом вычитания (см. формулу 2) скоростей рабочего органа и продуктивного слоя.

Реализация этих решений по совершенствованию технологии измельчения жмыха позволила достичь значения показателя удельной энергоемкости процесса на уровне – 0,35…0,39 кВт·ч/т, что на порядок ниже аналогичного показателя работы серийно выпускаемой дробилки РДБ-3000.

Выводы. Базовые положения земледельческой механики послужили основой толкования сложных технологических процессов в сферах образования и при создании отраслевой системы машин. Однако, «унифицированные» теории с начальных этапов развития отраслевой науки по объективным причинам формировались на основе упрощенных физических моделей. Они невполне адекватны современным техническим реализациям сложных технологических процессов, малопродуктивны в решении задач технологической модернизации сельского хозяйства, а иногда противоречат новым направлениям прогресса, эффективность которых подтверждена экспериментально. Рассмотренные «унифицированные» теории не позволяют, в большинстве случаев, количественно и в завершенной форме оценивать технологические и конструктивные решения, что дает основания, в частности, для критического отношения к требованиям о сходимости теоретических и экспериментальных исследований при рассмотрении квалификационных работ.

Список литературы

1. Николаева Е.А. Основы механики разрушения // Издательство Пермского государственного технического университета. – 2010. – 103 с.

2. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. – Л.: Колос. Ленинградское отделение. – 1978. -560 с., ил.

3. Сыроватка В.И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах. – М.: ГНУ ВНИИМЖ. – 2010. - 248 с.

4. Пат. РФ №2304023 МПК B02C 18/00. Измельчитель материалов / Тишанинов Н.П., Каличенко С.Г., Лямин А.В., заявитель и правообладатель ФГБНУ ВНИИТиН.- №2006105356/03, заяв. 20.02.2006; опубл. 10.08.2007. Бюл. №22.

5. Тишанинов Н.П. Универсальная дробилка компонентов кормов / Н.П. Тишанинов, С.Г. Калиниченко, А.В. Анашкин // Наука в центральной России. – 2013. – №13. – С.4-10.

6. Пат. РФ №2550655 МПК B02C 18/00. Измельчитель материалов / Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Ерохин Г.Н., заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. - №2014105791/13, заяв. 17.04.2014;

7. Тишанинов Н.П., Каличенко С.Г. Новые направления совершенствования процессов измельчения компонентов кормов // Достижения науки и техники АПК. – 2007. – №3. – с.46-48.

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

9. Лурье А.Б. Расчет и конструктированиесельхозяйственных машин. – Л.: Машиностроение, 1997. – 526 с.

10. Листопад Г.Е. Сельхозяйственные и мелиоративные машины. – М.: Агропроиздат, 1986. – 687 с.

11. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. Изд. 4-е доп. И перераб.-М.: «Колос», 1975.-495 с.

12. Макаров А.П. .Исследование технологического процесса измельчения фуражного зерна в молотковых дробилках // Научные труды ВИЭСХ. Том. 14. – М.: ВИЭСХ, 1964. – 152 с.

References

1. Nikolaeva E.A. Osnovy mekhaniki razrusheniya // Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2010. – 103 s.

2. Mel'nikov S.V. Mekhanizaciya i avtomatizaciya zhivotnovodcheskih ferm. – L.: Kolos. Leningradskoe otdelenie. – 1978. -560 s., il.

3. Syrovatka V.I. Mashinnye tekhnologii prigotovleniya kombikormov v hozyajstvah. – M.: GNU VNIIMZH. – 2010. - 248 s.

4. Pat. RF №2304023 MPK B02C 18/00. Izmel'chitel' materialov / Tishaninov N.P., Kalichenko S.G., Lyamin A.V., zayavitel' i pravoobladatel' FGBNU VNIITiN.- №2006105356/03, zayav. 20.02.2006; opubl. 10.08.2007. Byul. №22.

5. Tishaninov N.P. Universal'naya drobilka komponentov kormov / N.P. Tishaninov, S.G. Kalinichenko, A.V. Anashkin // Nauka v central'noj Rossii. – 2013. – №13. – S.4-10.

6. Pat. RF №2550655 MPK B02C 18/00. Izmel'chitel' materialov / Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Erohin G.N., zayavitel' i patentoobladatel' FGBNU VNIITiN. - №2014105791/13, zayav. 17.04.2014;

7. Tishaninov N.P., Kalichenko S.G. Novye napravleniya sovershenstvovaniya processov izmel'cheniya komponentov kormov // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2007. – №3. – s.46-48.

8. Letoshnev M.N. Sel'skohozyajstvennye mashiny, teoriya, raschet, proektirovanie i ispytanie. – M.: L.: Sel'hoz., 1955. – 856 s.

9. Lur'e A.B. Raschet i konstruktirovaniesel'hozyajstvennyh mashin. – L.: Mashinostroenie, 1997. – 526 s.

10. Listopad G.E. Sel'hozyajstvennye i meliorativnye mashiny. – M.: Agroproizdat, 1986. – 687 s.

11. Sokolov A.YA. Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriyatij po hraneniyu i pererabotke zerna. Izd. 4-e dop. I pererab.-M.: «Kolos», 1975.-495 s.

12. Makarov A.P. .Issledovanie tekhnologicheskogo processa izmel'cheniya furazhnogo zerna v molotkovyh drobilkah // Nauchnye trudy VIESKH. Tom. 14. – M.: VIESKH, 1964. – 152 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Тишанинов Николай Петрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniitinlab5@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Tishaninov Nikolai – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniitinlab5@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 03.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 08.04.2020

УДК 631.303
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-52-58

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПНЕВМОСЕПАРИРОВАНИЯ ЗЕРНА

[1]Тишанинов Константин Николаевич
[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Рассмотрены теоретические вопросы пневмосепарирования зерна. Использованы методы математического моделирования, расчетно-конструктивной и статистической обработки. Установлено, что эмпирические исследования процессов сепарирования зерна существенно разняться с теоретическими.В частности, по закону Стокса сила сопротивления среды прямопропорциональна скорости тела, а не квадрату скорости - согласно эмпирической формуле.Изэмпирическойформулы для определения силы сопротивления среды следует, что она прямопропорциональна миделеву сечению тела, при отклонении форм от шарообразной вычисляют приведенный диаметр. Установлено, что сила сопротивления среды прямопропорциональна площади поверхности тела, на которое происходит воздействие среды, а не миделеву сечению, взаимодействие зерна с воздушным потоком определяется не вязкостью среды (согласно закону Стокса), а зависит от кинетической энергии воздуха, часть которой передается зерну. Подтверждено, что эффективность процесса сепарирования зерна экспоненциально растет вместе с шириной канала (в рекомендуемом диапазоне) и квадратом скорости воздушного потока, линейно падает с увеличением загрузки пневмоканала. На основе выявленных зависимостей построена математическая модель эффективности процесса пневмосепарирования зерна. Построенная математическая модель не противоречит известным результатамисследований процесса, а выдвинутые новые гипотезы уточняют наблюдаемые закономерности – экспоненциальный закон распределения зерна по вертикали пневмоканала.*

Ключевые слова: *процесс пневмосепарирования, зерно, закон Стокса, эксперимент, эмпирические закономерности*

THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE PROCESS FOR GRAIN PNEUMOSEPARATION

[1]Tishaninov Konstantin
[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract.*Theoretical issues of pneumatic separation of grain are considered. The methods of mathematical modeling, calculation and structural and statistical processing are used. It is established that the empirical studies of grain separation processes differ significantly from the theoretical ones.The resistance force of the medium, in particular, according to the Stokes law, is directly proportional to the speed of the body, and not to the square of the speed - according to the empirical formula.It follows from the empirical formula for determining the resistance force of the medium that it is directly proportional to the mid-section of the body, and when the forms deviate from the spherical shape, the reduced diameter is calculated.It was established that the resistance force of the medium is directly proportional to the surface area of the body, on which the medium acts, and not the mid-section, the interaction of the grain with the air flow is determined not by the viscosity of the medium (according to Stokes law), but depends on the kinetic energy of the air, part of which is transferred to the grain.It is confirmed that the efficiency of the grain separation process increases exponentially along with the channel width (in the recommended range) and the square of the air flow velocity, and decreases linearly with increasing loading of the pneumatic channel. The constructed mathematical model does not contradict the known results of the process studies, and the proposed new hypotheses clarify the observed patterns - the exponential law of grain distribution along the vertical of the pneumatic channel.*

Keywords: *pneumoseparation process, grain, Stokes ' law, experiment, empirical regularities.*

Введение. Теоретические основы сепарирования зерна воздушным потоком были созданы еще в 1930-х годах [1]. Большинство исследований было направлено на изучение аэродинамических свойств зерна, конструкций пневмосепараторов и процесса пневмосепарирования [2]. Были установлены основные характеристики движения воздушного потока, определены режимы работы пневмосепараторов, обосновано взаимодействия зернового материла с воздушным потоком. Тем не менее, теория пневмосепарирования зерна содержит недостатки, которые определяются неустойчивостью взаимосвязей результативных показателей процесса с традиционными характеристиками рабочей среды. Поэтому пополнение базы знаний по процессу пневмосепарирования зерна с учетом возможностей вариативности оценки свойств рабочей среды является актуальной задачей.

Целью исследований является теоретическое обоснование эффективности процесса пневмосепарирования зерна.

Материалы и методы. В работе использованы методы математического моделирования, рачетно-конструктивный истатистической обработки.

Результаты и их обсуждение. Из классической теории пневмосепарирования зерна следует, что сила сопротивления среды (R) пропорциональна миделеву сечению ($S_{мид}$) и квадрату скорости зерна (V^2):

$$R = K \cdot S_{мид} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (1)$$

где K – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$S_{мид}$ – миделево сечение зерна, м^2;

ρ – плотность воздуха, кг/м^3.

Согласно законам движения тела в жидкости или газе (закон Стокса, уравнение Эйлера) ламинарное движение жидкости окажет силу сопротивления на шар с радиусом r, равную:

$$R = 6\pi r \eta V, \quad (2)$$

где η – коэффициент динамической вязкости газа (жидкости), Па·с;

То есть сила сопротивления среды прямопропорциональна скорости V, а не квадрату скорости, и определяется вязкостью среды (η).

Примем, что зерно гороха имеет шарообразную форму радиусом (R) 3 мм, массой (m) 0,2 г. На зерно действует восходящий воздушный поток с вязкостью (η) $18 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Тогда значение скорости витания ($V_{вит}$) примет неадекватно большое значение:

$$V_{вит} = \frac{mg}{6\pi R\eta} = \frac{200 \cdot 10^{-6} \cdot 10}{6 \cdot 3{,}14 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-6}} = 1{,}81 \cdot 10^3 \frac{м}{с}.$$

Очевидно, что процесс витания зерна (тел) в воздушном потоке нельзя описать через формулу Стокса и объяснить вязкостью воздушной среды (которая существенно мала для газов).

Рассмотрим известный пример [3]: выравненные по размерам горошины витают по высоте пневмоканала так, что концентрация горошин с ростом высоты убывает (Рисунок 2). Хотя «причины такого распределения до сих пор не вскрыты» Н.И. Сыромятников предлагает экспоненциальный закон распределения зерна по вертикали:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot e^{-Ah},$$

где ε - концентрация зерна на высоте h;

ε_0 - концентрация зерна на сетке; A – коэффициент пропорциональности, м$^{-1}$; h - высота слоя зерна, м.

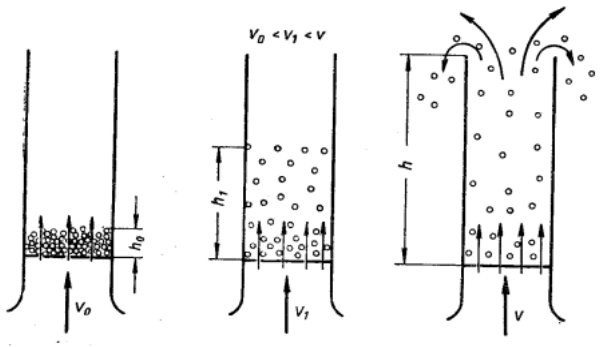


Рисунок 2 – Схема распределения горошин в вертикальном пневмоканале

Рассмотрим этот случай более подробно. Воздух в вертикальном пневмоканале движется с одинаковой скоростью ($v_в$). Возьмем элементарной участок высоты канала (Δh - один слой), тогда кинетическая энергия воздуха ($\Delta E_{к_в}$) элементарного участка высоты канала (Δh) будет одинаковой на протяжении всего канала:

$$\Delta E_{к_в} = \Delta m_в \cdot {v_в}^2 = \rho_в \cdot s \cdot {v_в}^2 \cdot \Delta h, (3)$$

где $\Delta m_в$ - масса одного слоя воздуха, кг;

$\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3;

s – площадь сечения канала, м^2;

Предположим, что частицы воздуха ударяясь о горошину будут отдавать ей кинетическую энергию, поэтому часть кинетической энергии воздуха($K_1 < 1$) сообщается зерну, которая увеличивает его потенциальную энергию ($\Delta E_{п_з}$):

$$\Delta E_{п_з} = K_1 \cdot \Delta E_{к_в} \quad (4)$$

А это означает, что потенциальная энергия каждого слоя зерна будет одинаковой на всем протяжении пневмоканала. С другой стороны, потенциальная энергия слоя зерна зависит от массы слоя (M) и высоты слоя (h):

$$M \cdot g \cdot h = \Delta E_{п_з} \quad (5)$$

При одинаковой массе частиц

$$M = n \cdot m_0,$$

где m_0 – масса горошин, кг; n – число горошин, шт;

Тогда

$$n \cdot m_0 \cdot g \cdot h = \Delta E_{п_з}$$

или

$$n = \frac{\Delta E_{п_з}}{m_0 \cdot g} \cdot h^{-1}.$$

То есть количество частиц в слое зерна обратно пропорционально высоте слоя.Мы получили более точную формулу, которая объясняет изложенный выше эффект. Важно отметить, что мы выдвинули гипотезу о том, что зерно взвешивается частью кинетической энергии воздуха. А значит, масса выделенного зерна ($m_{выд}$) на участке пневмоканала (B) прямо пропорциональна кинетической энергии воздуха этого участка:

$$m_{выд} = K_2 \cdot E_{к_в} = K_2 \cdot m_в \cdot {v_в}^2 = K_3 \cdot B \cdot {v_в}^2.$$

В книге [4] Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. приводят результаты многофакторного эксперимента, где функцией отклика была степень выделения зерна (E) при вертикальном пневмосепарировании, а факторами варьирования были: удельная нагрузка на канал (q), скорость воздушного потока ($v_в$), физико-механические свойства вороха ($K_з, K_{пр}, \omega, A$), выравненность воздушного потока ($\Phi_в$), конструктивные параметры пневмосепарирующего канала ($B, H_1, H_2, K_к, K_н$), условия ввода зерна в пневмоканал ($C_0, \alpha, \psi_р$)и другие.

$$E = f\left(q, v_в, K_з, K_{пр}, \omega, A, \Phi_в, B, H_1, H_2, K_к, K_н, C_0, \alpha, \psi_р\right).$$

В результате многофакторного эксперимента были выделены наиболее значимые факторы, для остальных факторов были даны рекомендации по их оптимальным значениям. В итоге регрессионного анализа функция отклика (E) приняла следующий вид:

$$E = 0{,}5018 - 0{,}0031 \cdot q + 0{,}0631 \cdot v_в + 0{,}0008 \cdot B.$$

где $B = 130…200$ мм; $v_в = 4{,}5…6{,}25$ м/с; $q = 50…200$ кг/(см·ч).

В результате экспериментов они получили следующие данные (Таблица 1). Полученная линейная модель вызывает сомнение, поэтому для получения более точной математической модели примем следующее:

а) Зерно уносится частью кинетической энергии воздуха, а значит, масса выделенного зерна ($m_{выд}$) на участке пневмоканала шириной B прямо пропорциональна кинетической энергии ($E_{к_в}$) воздуха этого участка;

б) Степень выделения зерна (E) экспоненциально растет вместе с шириной сепарирования и линейно падает с увеличением удельной загрузки пневмоканала (q) (Аналогично выделению зерна решетом [5]).

Таблица 1 – Эффективность выделения зерна в вертикальном пневмоканале при различном сочетании фактором $(q, v_в, B)$.

B, мм	$q \backslash v_в$	4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25
130	50	0,72	0,74	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83
	100	0,57	0,59	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68
	150	0,41	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52
	200	0,26	0,27	0,29	0,29	0,32	0,34	0,35	0,37
140	50	0,73	0,75	0,76	0,78	0,79	0,81	0,82	0,84
	100	0,58	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65	0,67	0,69
	150	0,42	0,44	0,45	0,47	0,48	0,50	0,51	0,53
	200	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,37
150	50	0,74	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85
	100	0,59	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69
	150	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54
	200	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38
160	50	0,75	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86
	100	0,58	0,61	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
	150	0,42	0,45	0,47	0,48	0,50	0,52	0,53	0,55
	200	0,27	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,39
170	50	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86
	100	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69	0,71
	150	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,55
	200	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,39
180	50	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87
	100	0,61	0,63	0,64	0,67	0,67	0,69	0,70	0,72
	150	0,45	0,47	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,56
	200	0,30	0,31	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39	0,41
190	50	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85	0,87	0,88
	100	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69	0,71	0,73
	150	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,55	0,57
	200	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41
200	50	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89
	100	0,63	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70	0,72	0,73
	150	0,47	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,56	0,58
	200	0,32	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39	0,41	0,42

Чтобы получить адекватную математическую модель процесса пневмосепарирования зернового вороха, рассмотрим участок пневмоканала шириной (ΔB), тогда степень выделения на этом участке будет – p. На второй участок сепарирующего канала $b_2=\Delta b$ попадет ворох в процентном содержании – (1-p). На этом участке (b_2) зерно выделится также с вероятностью p. Аналогично получим таблицу 2:

Таблица 2 – Содержания вороха на i-ом участке пневмоканала

Номер участка пневмоканала	Содержание вороха после i-го участка ширины пневмоканала в процентах от исходного содержания
$b_1=\Delta b$	$P_1=1-p$
$b_2=\Delta b$	$P_2=(1-p)^2$
$b_3=\Delta b$	$P_3=(1-p)^3$
…	…
$b_n=\Delta b$	$P_n=(1-p)^n$

Сход с n-го участка пневмоканала будет содержатьворох в процентном соотношении от исходной массы:

$$P_в = (1-p)^n,$$

Тогда степень выделения зерна (E):

$$E = 1 - P_в = 1 - (1-p)^n,$$

С ростом ширины пневмоканала (n) растет кинетическая энергия воздуха ($E_{к_в}$), которая и определяет выделение зерна:

$$n = \frac{\mathrm{E}_{\mathrm{к_в}}}{\Delta\mathrm{E}_{\mathrm{к_в}}}.$$

Тогда

$$E = 1 - (1 - \mathrm{p})^{\frac{\mathrm{E}_{\mathrm{к_в}}}{\Delta\mathrm{E}_{\mathrm{к_в}}}} = 1 - K_{\mathrm{p}} \cdot (1 - \mathrm{p})^{\mathrm{B}v_{\mathrm{в}}{}^2}.$$

$$E = 1 - \mathrm{a} \cdot \mathrm{c}^{\frac{\mathrm{B} \cdot v_{\mathrm{в}}{}^2}{\mathrm{d}}}. \quad (6)$$

Чтобы найти численные значения коэффициентов a, c и d примем: $q = 50$ кг/(см · ч), $v_{\mathrm{в}} = 4{,}5$ м/с, $d = v_{\mathrm{в}}{}^2$, тогда формула (6) примет следующий вид:

$$E = 1 - \mathrm{a} \cdot \mathrm{c}^{\mathrm{B}}. \quad (7)$$

Используя данные таблицы 1 в первом приближении получим: a=0,5, c=0,15, или:

$$E = 1 - 0{,}5 \cdot 0{,}15^{\frac{\mathrm{B} \cdot v_{\mathrm{в}}{}^2}{4{,}5^2}}.$$

Используя данные таблицы 1 окончательно получим:

$$E = 1 - 0{,}5 \cdot 0{,}15^{\frac{\mathrm{B} \cdot v_{\mathrm{в}}{}^2}{4{,}5^2}} + \left(0{,}155 - 0{,}155\frac{q}{50}\right). \quad (8)$$

Для подтверждения адекватности полученной математической модели сравним теоретические данные с экспериментальными (таблица 3):

Таблица 3 – Сравнение расчетной и экспериментальной эффективности выделения зерна (E)

B, мм	q\$v_в$	4,50		4,75		5,00		6,25	
		Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.
130	50	0,72	0,71	0,74	0,73	0,76	0,75	0,77	0,76
	100	0,57	0,56	0,59	0,57	0,60	0,59	0,62	0,61
	150	0,41	0,40	0,43	0,42	0,45	0,44	0,46	0,45
	200	0,26	0,25	0,27	0,26	0,29	0,28	0,29	0,30
140	50	0,73	0,72	0,75	0,74	0,76	0,76	0,78	0,78
	100	0,58	0,57	0,59	0,59	0,61	0,60	0,62	0,62
	150	0,42	0,41	0,44	0,43	0,45	0,45	0,47	0,47
	200	0,27	0,26	0,28	0,28	0,30	0,29	0,31	0,31
150	50	0,74	0,73	0,76	0,75	0,77	0,77	0,79	0,79
	100	0,59	0,58	0,60	0,60	0,62	0,62	0,63	0,63
	150	0,43	0,42	0,45	0,44	0,46	0,46	0,48	0,48
	200	0,28	0,27	0,29	0,29	0,31	0,30	0,32	0,32
160	50	0,75	0,74	0,77	0,76	0,78	0,78	0,80	0,80
	100	0,58	0,59	0,61	0,61	0,62	0,63	0,64	0,64
	150	0,42	0,43	0,45	0,45	0,47	0,47	0,48	0,49
	200	0,27	0,28	0,30	0,30	0,31	0,32	0,33	0,33
170	50	0,76	0,76	0,77	0,77	0,79	0,79	0,80	0,81
	100	0,60	0,60	0,62	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66
	150	0,45	0,44	0,46	0,46	0,48	0,48	0,49	0,50
	200	0,29	0,29	0,31	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
180	50	0,77	0,76	0,78	0,78	0,80	0,80	0,81	0,82
	100	0,61	0,61	0,63	0,63	0,64	0,65	0,67	0,67
	150	0,45	0,46	0,47	0,47	0,49	0,49	0,50	0,51
	200	0,30	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36
190	50	0,77	0,77	0,79	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83
	100	0,62	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66	0,68
	150	0,46	0,46	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52
	200	0,31	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,35	0,37
200	50	0,78	0,78	0,80	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84
	100	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,69
	150	0,47	0,47	0,49	0,49	0,50	0,51	0,52	0,53
	200	0,32	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,36	0,38

Таблица 3 – Сравнение расчетной и экспериментальной эффективности выделения зерна (E) (продолжение)

В, мм	$q\backslash v_в$	5,50		5,75		6,00		6,25	
		Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.	Расч.	Эксп.
130	50	0,78	0,79	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,83
	100	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68
	150	0,47	0,48	0,48	0,49	0,50	0,51	0,52	0,52
	200	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,35	0,36	0,37
140	50	0,79	0,79	0,81	0,81	0,82	0,82	0,84	0,84
	100	0,64	0,64	0,65	0,65	0,67	0,67	0,68	0,69
	150	0,48	0,48	0,50	0,50	0,51	0,51	0,53	0,53
	200	0,33	0,33	0,34	0,34	0,36	0,36	0,37	0,37
150	50	0,80	0,80	0,82	0,82	0,84	0,83	0,85	0,85
	100	0,65	0,65	0,67	0,66	0,68	0,68	0,70	0,69
	150	0,49	0,49	0,51	0,51	0,53	0,52	0,54	0,54
	200	0,34	0,34	0,36	0,35	0,37	0,37	0,39	0,38
160	50	0,82	0,81	0,83	0,83	0,85	0,84	0,86	0,86
	100	0,66	0,66	0,68	0,67	0,69	0,69	0,71	0,70
	150	0,51	0,50	0,52	0,52	0,54	0,53	0,55	0,55
	200	0,35	0,34	0,37	0,36	0,38	0,38	0,40	0,39
170	50	0,83	0,82	0,84	0,83	0,86	0,85	0,87	0,86
	100	0,67	0,66	0,69	0,68	0,70	0,69	0,72	0,71
	150	0,52	0,51	0,53	0,52	0,55	0,54	0,56	0,55
	200	0,36	0,35	0,38	0,37	0,39	0,38	0,41	0,39
180	50	0,84	0,83	0,85	0,84	0,87	0,86	0,88	0,87
	100	0,68	0,67	0,70	0,69	0,71	0,70	0,73	0,72
	150	0,53	0,52	0,54	0,53	0,56	0,55	0,57	0,56
	200	0,37	0,36	0,39	0,38	0,40	0,39	0,42	0,41
190	50	0,85	0,83	0,86	0,85	0,88	0,87	0,89	0,88
	100	0,69	0,68	0,71	0,69	0,72	0,71	0,74	0,73
	150	0,54	0,52	0,55	0,54	0,57	0,55	0,58	0,57
	200	0,38	0,37	0,40	0,38	0,41	0,40	0,43	0,41
200	50	0,86	0,84	0,87	0,86	0,89	0,87	0,90	0,89
	100	0,70	0,69	0,72	0,70	0,73	0,72	0,75	0,73
	150	0,55	0,53	0,56	0,55	0,58	0,56	0,59	0,58
	200	0,39	0,38	0,41	0,39	0,42	0,41	0,44	0,42

Результаты, приведенные в таблице 3, показывают, что выбранная нами математическая модель (формула 9) адекватна реальному технологическому процессу:

$$E = 1 - \mathrm{K}_1 \cdot \mathrm{K}_2^{\mathrm{B} \cdot v_в^2} - \mathrm{K}_3 \cdot q + \mathrm{C}_1 \quad (9)$$

где $\mathrm{K}_1, \mathrm{K}_2, \mathrm{K}_3$ - коэффициенты соответствия;

C_1–значение начальной эффективности выделения.

Заключение. Известная формула для определения силы сопротивления среды в пневмоканале, полученная эмпирически, не объясняет характер взаимодействия среды с телом. Она содержит коэффициент соответствия, который может меняться в широком диапазоне и дополнять погрешности в расчете. Установлено, что взаимодействие воздушной среды с зерном в большей степени коррелирует с площадью поверхности тела, на которую воздействует воздушный поток, а не с площадью миделева сечения зерна. Предложенная математическая модель эффективности процесса пневмосепарирования зерна достаточно точно описывает известные результаты исследований.

Список литературы

1. Барков К.М. Основные элементы сепарирования семян воздушным потоком // Труды ВИМ. – М.: ВИМ, 1935. – Т.1.

2. Хамуев В.Г. Обоснование параметров глубокого пневмосепарирующего канала для очистки семян от трудноотделимых примесей: Дис. … канд. техн. наук. – М., 2008. – 150 с.
3. Тиц З.Л. Машины для послеуборочной поточной обработки семян: Москва, - 1967 г.
4. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва, 1980.
5. Тишанинов К.Н. Исследование предельной скорости решета с помощью компьютерной модели грохота // Наука в центральной России. – 2017. – №5(29). – С. 12–21.

References

1. Barkov K.M. Osnovnye elementy separirovaniya semyan vozdushnym potokom // Trudy VIM. – M.: VIM, 1935. – T.1.
2. Hamuev V.G. Obosnovanie parametrov glubokogo pnevmosepariruyushchego kanala dlya ochistki semyan ot trudnootdelimyh primesej: Dis. … kand. tekhn. nauk. – M., 2008. – 150 s.
3. Tic Z.L. Mashiny dlya posleuborochnoj potochnoj obrabotki semyan: Moskva, - 1967 g.
4. Gortinskij V.V., Demskij A.B., Boriskin M.A. Processy separirovaniya na zernopererabatyvayushchih predpriyatiyah. Moskva, 1980.
5. Tishaninov K.N. Issledovanie predel'noj skorosti resheta s pomoshch'yu komp'yuternoj modeli grohota // Nauka v central'noj Rossii. – 2017. – №5 (29). – S. 12–21.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Тишанинов Константин Николаевич – кандидат технических наук старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: TishaninovKN@rambler.ru.

Author credentials

Affiliations

Tishaninov Konstantin – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: TishaninovKN@rambler.ru.

Поступила в редакцию (Received): 23.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2020

УДК (63.001.5:51-7):631.82
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-58-64

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ И КООРДИНАЦИЯ В СЕВООБОРОТНОЙ ЗАДАЧЕ С РЕСУРСНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО УДОБРЕНИЯМ

[1]Зазуля Александр Николаевич
[2]Бышов Николай Владимирович
[3]Макарова Ольга Владимировна
[3]Гаспарян Светлана Валентиновна
[2]Борычев Сергей Николаевич
[2]Макаров Валентин Алексеевич

[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»
[2]ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева»
[3]ФКОУ ВО «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний»

Реферат. *В системе земледелия для создания бездефицитного баланса гумуса обеспеченность органическими удобрениями составляет порядка 60%, поэтому при разработке экономико-математических моделей для севооборотных задач считается необходимым знать ресурсные ограничения. Для разработки иерархической декомпозиции с ресурсными ограничениями по удобрениям и создания экономико-математической модели рассматривали систему как блок «сельское хозяйство» состоящее из подблоков «растениеводство» и*

«животноводство». Допустили, что ограничения носят линейный характер, поэтому решение многокритериальных задач по использованию удобрений в севообороте, приближённых к реальной ситуации, может быть реализовано методом приближённой декомпозиции и сведения их к иерархической игре и соответственно к выбору min-max оценок эффективности для соответствующих решений. Для практических целей представления недоменируемого множества значения критериев решали задачу в модели применительно для миноранты и мажоранты. Показали, что вспомогательное построение иерархической игры для решения исходной задачи относится к синтезу параметрической декомпозиции. Установили, что всякое увеличение доступного ресурса органического вещества в почву не ухудшает значение критерия оценки. Проведенные теоретические исследования для решения задач по обеспечению удобрениями растениеводства позволяет оптимизировать многокритериальные задачи, по рациональному использованию имеющиеся в хозяйстве ресурсов для обеспечения бездефицитного баланса гумуса при производстве продукции растениеводства. Было также установлено, что решение построений миноранты совпадает с решением исходной задачи, что и требовалось для доказательства.

Ключевые слова: *Иерархическая декомпозиция, севооборотная задача, ресурсные ограничения, органические удобрения*

MODEL OF HIERARCHICAL DECOMPOSITION AND COORDINATION IN TASKS WITH RESOURCE RESTRICTIONS ON FERTILIZERS IN THE PRODUCTION OF GRAIN CROPS

[1]Zazulya Alexander
[2]Byshov Nikolay
[3]Makarova Olga
[3]Gasparyan Svetlana
[2]Borychev Sergey
[2]Makarov Valentin

[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"
[2]FSBEI HE "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostycheva"
[3]FFEI HE "Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service"

Abstract. *The availability of organic fertilizers in the agricultural system to create a deficit-free balance of humus is about 60%; therefore, when developing economic and mathematical models for crop rotation problems, it is considered necessary to know resource limitations. The system as a unit "agriculture" consisting of the sub-units "plant growing" and "livestock" was considered to develop a hierarchical decomposition with resource constraints on fertilizers and create an economic-mathematical model. It was assumed that the restrictions are linear in nature, therefore, the solution of multicriteria problems on the use of fertilizers in crop rotation that are close to the real situation can be realized by the method of approximate decomposition and reducing them to a hierarchical game and, accordingly, to choosing min-max efficiency estimates for the corresponding solutions. The problem in the model for minorants and majors was solved. For practical purposes, representing an undomainable set of criteria values. It was shown that the auxiliary construction of a hierarchical game for solving the original problem relates to the synthesis of parametric decomposition. It was found that any increase in the available resource of organic matter in the soil does not worsen the value of the evaluation criterion. Conducted theoretical studies to solve the problems of providing fertilizers for crop production allows optimizing multicriteria tasks for the rational use of resources available in the economy to ensure a balanced humus balance in the production of crop products. It was also found that the solution of the constructions of the minorant coincides with the solution of the original problem, which was required for the proof.*

Keywords: *hierarchical decomposition, crop rotation task, resource constraints, organic fertilizers*

Введение. Цель исследования – создания экономико-математической модели обоснования рационального использования удобрений с использованием теории игр, а для практических целей представления недоменируемого множества значения критериев решить задачу в модели применительно для миноранты и мажоранты.

Результаты и обсуждение. Для разработки иерархической декомпозиции с ресурсными ограничениями [1, 2], в нашем случае, по удобрениям и создания экономико-математической модели мы имеем систему такую как блок «сельское хозяйство» состоящее из подблоков «растениеводство» и «животноводство» (в рассматриваемой задаче, выдающее продукцию в виде органических удобрений) в каждом из которых соответственно производится своя продукция [3].

Для решения искомой задачи обозначим векторы интенсивностей:

$\in XcE^n$ – для подсистемы «растениеводство» (первая подсистема):

v$\in VcE^m$ – для подсистемы «животноводство» (вторая подсистема – удобрение);

где x, v – являются многомерными параллепипидами.

Запишем ограничения для первой подсистемы в виде:

$$Ax = a\ ;\ Cx \leq \text{у}, \tag{1}$$

где A – матрицадля схем производства продукции растениеводства;

C – матрица ресурсов удобрений;

$y \in \text{E}_+^{\text{e}}$ – объёмы имеющихся ресурсов органических удобрений в подсистеме.

По аналогии запишем ограничения для второй подсистемы в виде:

$$\text{B}_\text{y} = в \tag{2}$$

Тогда запросы в ресурсах удобрений могут определяються посредством D_y, с учётом ограничений на потребность и запишется как:

$$F_\text{y} + D_\text{y} \leq d \tag{3}$$

На основании этого можно сказать, что критерий в первой подсистеме представляется в виде функции – $f_1\ (x)$, а второй в виде функции – $f_2(u)$ и обе подсистемы стремиться к увеличению объёмов и показывает на то, что мы имеем дело с двухкритериальной задачей $\{f_1(x),\ f_2(u)$, при ограничениях в формулах (1), (2), (3).

Такое вспомогательное построение иерархической игры для решения исходной задачи относится к разделу синтеза иерархической структуры [4-6].

Сделаем предположение о том, что критерии подсистем стремятся к увеличению при ограничениях, формулы (1), (2), (3), и видно, что мы имеем дело с двухкритериальной задачей $\{f_1(x), f_2(u)\}$.

Относительно этих функций примем, что они вогнуты и обладают свойствами монотонности по используемому ресурсу и запишутся в виде:

1. $y_1 \leq y_2$, $y_1 \in E_+^c$ то $h_1 \geq f_1^2$, где $f_1^1 = maxf_1(x)$ и $f_1 = maxf_2(x)$

$$\begin{matrix} Ax = a,\ Cx<y; \\ x \in X \end{matrix} \qquad \begin{matrix} Ax = a,\ x \leq y_z \\ x \in X \end{matrix} \tag{4}$$

2. $\text{y}_1 \geq \text{y}_2$, $y_i \in E_+^0$ то $f_z^1 \leq f_z^2$, где $f_z^1 = maxf_2(u)$ и $f_z^2 = maxf_2(u)$

$$\begin{matrix} Bu = b,\ F_1 + Du \leq d; \\ U \in u \end{matrix} \qquad \begin{matrix} Bu = b,\ F_2 + Du \leq d. \\ U \in u \end{matrix} \tag{5}$$

Для практических целей множества значение критериев в двухмерном случае достаточно решать задачу

$$f_2(u) \rightarrow max \tag{6}$$

при соответствующих ограничениях $(x, y, u) \in Z,\ x \in X,\ u \in U,$

$Ax = a;\ Cx = y;\ Bu = в;\ Fy + Du \leq d;$

$f_1(x) \geq \gamma$.

Меняя затем γ, мы можем с заданным шагом изменения одного из критериев оценить недоменируемые значения другого критерия.

В общем случае n частных критериев $f_i(x)$, $i=1,2,3...n$, $x \in X$ можно осуществить перебор в пространстве величин $\{\gamma_2\ \gamma_3 \ldots \gamma_n\}$ и решить задачи

$$f_1(x) \rightarrow max. \tag{7}$$

Становится известным, что решение задачи можно записать как

$$\sum_{i-1}^{n} \lambda_i f_i(x) \rightarrow max,\ \ x \in X.$$

Это выражение даёт Перетовскую точку,

где $\lambda \in S = \{ \frac{\lambda}{\lambda_1} > 0; \sum_{i-1}^{n} \lambda_1 = 1\}$.

Теперь определим множество $Y_1 = \{y | \exists x \in X : A_x = d_1$, $C_x = y_1, f_1(x_1) \geq \gamma \}$.

Множество $Y_2 = \{y | \exists_u \in U : B_U = B,\ F_Y + D_u \geq d \}$, как и Y является множеством выпуклым, ограниченным многоугольником.

Заметим, что исходное множество ограничений в задаче (6) есть $Y = Y_1 \cap Y_2$ и также, как Y, является множеством выпуклым.

На основании чего сформулируем иерархическую игру для вариантов, где первый вариант стремится к $max\, f_2(u)$, выбору $\lambda \in S$, где S – стандартный симплекс, а второй вариант – к $min(\lambda y)$.

Тогда запишем:

$$\begin{array}{ll} Ax = a,\ Cx<y, & Bu=b,\ Fy+Du \leq d \\ f_1(x) \geq \gamma & x \in X \end{array} \quad (8)$$

Запишем выигрыш для первого варианта,приняв множество оптимальных решений через $X(\lambda_1)$, $Y(\lambda)$,

$$\begin{array}{lll} f_2^0 = \max & \max & \max f_2(u) \\ \lambda \in S & x \in X(\lambda) & y,u \\ Bu = b & & Fy+Dy \leq d \\ C_x \leq y & & x \in X(\lambda) \end{array} \quad (9)$$

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сформулировать *теорему 1* смысл, которой состоит в оптимизации критерия в исходной задаче формула (6) в которой цена иерархической декомпозиции формула (9) совпадают:

$$f_2^0 = max\ f_2(u) \quad (10)$$

Доказательство. Установлено, что в силу монотонности функции $f_2(u)$ решению задачи принадлежит множеству векторов $y \geq 0$, т.е. перетовскому множеству для критериев на множестве ограничений Y. Это множество параметризируемо с помощью величины $\lambda \in S$, где S – стандартный симплекс, т.е. посредством решения задачи (8).

Далее, для каждого значения λ возможна не единственность решения (8), поэтому принимать условие $max(.)$ в формуле (9) $x \in X(\lambda)$. Этим и завершает доказательства полученных формулировок.

Замечание. Отсюда нетрудно также увидеть, что в задаче (8) можно ограничиться связями первой подсистемы, т.е. для второго варианта решить задачу:

$$\begin{array}{ll} min\ (\lambda,y) & \\ A(x)=a & Cx \leq y \\ f_1(x) \geq \gamma & x \in X \end{array} \quad (11)$$

Доказанные выше утверждения позволяют организовать разнообразные итеративные декомпозиционные процедуры, аналогичные процедурам параметрической декомпозиции [5].

Рассмотрим алгоритм точной декомпозиции.

Опишем декомпозиционную схему решения задачи (6), опираясь на представление (9), в случае, когда функция $f_1(x)$ линейна. В этом случае Перетовское множество системы критериев $\{y_1, y_2 \ldots y_n\}$

$$\begin{array}{c} min\ (\lambda, y) \\ \in yY \end{array} \quad (12)$$

$$\lambda \in S^0 = \{ \lambda_i > 0,\ \sum_{i=1}^{e} \lambda_i = 1,$$

где множество Y – выпуклый многоугольник [6].

Напомним, что в силу конечности базовых векторов в задаче (6), полностью покрывающих множество S, т.е. $S=V\ \lambda\ j$, таких, что для $\lambda \in Y$ будут оптимальными базисы из линейных ограничений (9).

Разобьём множество базовых векторов, при решении задачи (12), на группы $Y_j = \{y_i\, k_i\, ; j \in J;\ к \in K\}$, когда линейные комбинации их внутри группы определяют Перетовское множество.

Тогда схема декомпозиционного алгоритма задачи (9) имеет вид:

шаг 0. $j = 1, f_2 = 0,$

шаг 1. Строим базис векторов $Y_j = \{y_i k_i ; j \in J; к \in K\}$,

шаг 2. Представим Перетовские точки в виде $y = \Sigma; к \in K_j; \mu_k y_j k$ и решаем задачу

$$max\, f_2^0 (u) = f_2^j \tag{13}$$

при линейных ограничениях

$$B_u = b$$

$$\sum_{k \in K} \mu_k F y_{jk} + D \le d;$$

шаг 3. $f_2^0 = max\,(f_2^0, f_2^j), j = j + 1.$

шаг 4. Если $j = J$, переходим к шагу 1, иначе конец.

Таким образом, реализация данного принципиального алгоритма, на конкретных задачах практически невозможна из-за большой размерности задач и большого объёма расчётов [7]. Вместе сем подобная идеология позволяет построить практические алгоритмы для декомпозиции задачи (6).

Рассмотрим задачи в *миноранте* и *мажоранте*:

Миноранта.

1 этап. Запишем задачу при фиксированном значении λ:

$$\min_{x,\,y} (\lambda, y).$$

$$Ax = a, \qquad Cx \ge y, \qquad f(x) = \gamma. \tag{14}$$

$$x \in X \qquad\qquad y_{\in} \in Y_2$$

Обозначим множество решений $\{x(\lambda),\ Y(\lambda)\}$;

2 этап. Фиксируем

$$x^0 \in X^\lambda$$

$$max\, f_2(u) = \Phi\ minor \tag{15}$$

$$Bu = b, \qquad Fy + Du \le d, \qquad Cx^2 \le y$$

$$x \in X\lambda, \qquad\qquad y \in E_0^+$$

Мажоранта.

1 этап.

$$\min_{x,\,y} (\lambda, y).$$

$$Ax = a, \qquad Cx \le y, \qquad f_2(x) \ge \gamma \tag{16}$$

$$x \in X, \qquad\qquad y_2 \in Y$$

Обозначим множество решений $\{x(\lambda),\ Y(\lambda)\}$;

2 этап. Фиксируем

$$x \in X(\lambda)$$

$$max\, f_2(u) = \Phi\ major$$

$$Bu = b, \qquad Fy + Du = d. \qquad Cx^0 \tag{17}$$

$$x^0 \in X(\gamma)$$

Теорема 2. Решение искомой задачи (6) и сформулированных задач находится в следующем соответствии:

$$\Phi\ minor \le f_1 \le \Phi\ major.$$

Доказательство.

1. $\Phi\ minor \le f_2$ следует из представления (9) поскольку выбрано некоторое значение γ и некоторое значение $x^0 \in X(\gamma)$. Степень близости $\Phi\ minor$ к f_2 определяется выбором λ и x.

2. Заметим, что при решении задачи на первом этапе строится опорная плоскость к множеству Y, поэтому на втором этапе к задаче (17) множество ограничений оптимизационной задачи определяется из пересечения Y_2 и полупространства, которому принадлежит Y. Таким образом, мы имеем ограничения задачи (8) и можно записать как:

$$f_2^0 \le \Phi_{major}.$$

Решение задачи (17) может привести к y, недопустимым для ограничения (12). Вместе с тем для решения задачи (6) y^* всегда существует $y^{\cdot}$, тогда можно записать:

$$y^1 \le y^*, \qquad (\lambda, y^1) = (\lambda, y_0), \qquad y^0 \in Y(\lambda)$$

$$f_2^0 = \max f_2(u) \le \max f_2(u) \le \Phi \text{ major} \tag{18}$$

$$y \in Y \qquad y \in Y_2$$

$$y \le y^* \quad (\lambda, y) \ge (\lambda, y^x) \; (\lambda, y) \ge (\lambda, y^x) \ge \gamma, \; y^0 y \in Y(\lambda).$$

Этим мы завершим доказательство утверждения, а нами установлено, что с решением (6) в виде иерархической игры (9) составляет содержание иерархической декомпозиции, а идеология свидетельствует о том, что эта идеология иерархической декомпозиции вполне реальна.

Замечания.

1. В задачах (9) задаче первого этапа (14), (16) опорную плоскость можно искать из решения задачи

$$\min (\lambda, y) \qquad y \in Y \tag{19}$$

2. Описанная декомпозиция может быть рассмотрена на случай подсистем с использованием (7).

Таким образом, пользуясь представлением (7), рассматривая задачу можно записать:

$$\lambda_1, f_1(x) + \lambda_2, f_2(u) \to \max$$

$$A_x = a, \qquad C_x = y, \quad B_u = b. \qquad Fy + du = d. \tag{20}$$

$$x \in X \qquad u \in U$$

Введём переменные $y = Y$ и $y_2 = Du$, и разложим эту задачу на две задачи:

$$\max \lambda_1, f_1(x) = \Phi_1(y), \qquad \lambda_2, f_2(u) = \Phi_2(н_2)$$

$$A_x = a, \quad C_x = y, \quad B_u = b.$$

$$Fu = y_1, \quad x \in X, \quad Du = y_2, \quad u \in U.$$

Тогда решение (20) получается из решения координирующей задачи:

$$\max \Phi_1(y_1) + \Phi_2(y_2).$$

$$y_1 + y_2 \le d.$$

Отсюда получается оценка снизу, такая как миноранта, при некоторых фиксируемых значениях ресурсов.

3. Таким образом, установлено, что в миноранте заключена модель дележа ресурсов между подсистемами посредством коэффициента свёрстки.

4. Заметим, что в силу своих опорных плоскостей, получим на первом этапе набор таких значений λ_k, $к \in К$, что:

$$f_2 = \max f_2(u)$$

$$Bu = b, \; Fy + du \le d$$

$$(\lambda_k, y) \ge (\lambda_k, Cx_k), \; x \in X(\lambda_k), \tag{21}$$

т.е. решение, таким образом, построений миноранты совпадает с решением исходной задачи.

Выводы. Проведенные теоретические исследования для решения задач по обеспечению удобрениями растениеводства позволяет оптимизировать многокритериальные задачи, по рациональному использованию имеющиеся в хозяйстве ресурсов для обеспечения бездефицитного баланса гумуса при производстве продукции растениеводства. Таким образом, также установлено, что решение построений миноранты совпадает с решением исходной задачи, что и требовалось для доказательства.

Список литературы

1. Гермейер Ю.Б. Игры с непротивоположными интересами – М.: Наука. – 1976. – 28 с.

2. Berezner A.S, Ereshko F,I. Coordination of Models in Software SyStam for Large Scale Hater Resources Projekts, Water Sup 11 j & Management, vol. 4. – 1980. – P. 253-262.

3. Макаров В.А. Повышение качества функционирования механизации производства и применения органических удобрений в сельскохозяйственном производстве. Диссертация на соискание учёной степени д-ра техн. наук / В.А. Макаров – Рязань. – РГСХА. – 1997. – 321с.

4. Корнай И., Липтак Т. Планирование на двух уровнях. // Применение математики в экономических исследованиях. – М.: Мысль. – 1965. – С. 79-83.

5. Ульм С. Методы декомпозиции для решения задач оптимизации. Т.:Валгус. – 1979. –132 с.

6. Зннусие Ю.А. Принцип декомпозиционного анализа оптимального планирования. Т.: Валгис. – 1976. – 174 с.

7. Злобин А.С. Параметрические методы решения минимаксных задач /Диссертация на соискание учёной степени канд. физ-мат. наук /А.С. Злобин. – М.: ВЦ РАН. 1984. – 127 с.

References

1. Germejer YU.B. Igry s neprotivopolozhnymi interesami – M.: Nauka. – 1976. – 28 s.

2. Berezner A.S, Ereshko F,I. Coordination of Models in Software SyStam for Large Scale Hater Resources Projekts, Water Sup 11 j & Management, vol. 4. – 1980. – R. 253-262.

3. Makarov V.A. Povyshenie kachestva funkcionirovaniya mekhanizacii proizvodstva i primeneniya organicheskih udobrenij v sel'skohozyajstvennom proizvodstve. Dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni d-ra tekhn. nauk / V.A. Makarov – Ryazan'. – RGSKHA. – 1997. – 321s.

4. Kornaj I., Liptak T. Planirovanie na dvuh urovnyah. // Primenenie matematiki v ekonomicheskih issledovaniyah. – M.: Mysl'. – 1965. – S. 79-83.

5. Ul'm S. Metody dekompozicii dlya resheniya zadach optimizacii. T.:Valgus. – 1979. –132 s.

6. Znnusie YU.A. Princip dekompozicionnogo analiza optimal'nogo planirovaniya. T.: Valgis. – 1976. – 174 s.

7. Zlobin A.S. Parametricheskie metody resheniya minimaksnyh zadach /Dissertaciya na soiskanie uchyonoj stepeni kand. fiz-mat. nauk /A.S. Zlobin. – M.: VC RAN. 1984. – 127 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Зазуля Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: zazulia_an@rambler.ru.

Бышов Николай Владимирович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева», Россия, г. Рязань, e-mail: byshov63@mail.ru.

Макарова Ольга Владимировна – доктор экономических наук, профессор Федерального казенного образовательного учреждения высшего образования «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний», Россия, г. Рязань, e-mail: m_ov+2302@bk.

Гаспарян Светлана Валентиновна – кандидат экономических наук, доцент Федерального казенного образовательного учреждения высшего образования «Академия права и управления Федеральной службы исполнения наказаний», Россия, г. Рязань, e-mail: gasparyan.svetlana@yandex.ru.

Борычев Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор РАН Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева», Россия, г. Рязань, e-mail: 896066486088@mail.ru.

Макаров Валентин Алексеевич – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева», Россия, г. Рязань, e-mail: va_makarov@ ramble.ru.

Author credentials

Affiliations

Zazulya Alexander – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: zazulia_an@rambler.ru.

Byshov Nikolai – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Educational “Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev”, Russia, Ryazan, e-mail: byshov63@mail.ru.

Makarova Olga – Full Doctor of Economics, Professor of Federal Fiscal Educational Institution of Higher Education “Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service”, Russia, Ryazan, e-mail: m_ov + 2302 @ bk.

Gasparyan Svetlana – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of Federal Fiscal Educational Institution of Higher Education “Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service”, Russia, Ryazan, e-mail: gasparyan.svetlana@yandex.ru.

Borychev Sergey – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Educational “Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev”, Russia, Ryazan, e-mail: 896066486088@mail.ru.

Makarov Valentin – Full Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Educational “Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev”, Russia, Ryazan, e-mail: va_makarov @ ramble.ru.

Поступила в редакцию (Received): 13.02.2020 Принята к публикации (Accepted): 23.03.2020

УДК 681.3:631.333.5
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-65-73

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУЗА ПО РАБОЧЕМУ ОРГАНУ ЛОПАСТНОГО РАЗБРАСЫВАТЕЛЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ УДОБРЕНИЙ

[1]Шварц Анатолий Адольфович
[1]Шварц Сергей Анатольевич
[1]Секретарев Александр Петрович
[1]Ветров Иван Юрьевич
[1]ФГБОУ ВО «Курская государственная сельскохозяйственная академия имени И.И. Иванова»

Реферат. *Известно, что конструктивно режимные параметры лопастных рабочих органов разбрасывателей, особенно для поверхностного внесения гранулированных удобрений, зависят от многих факторов, в том числе от физико-механических свойств удобрений – геометрических размеров, влажности, удельного веса и др. Исследованы основные характеристики движения груза по лопаткам и в струе, выброшенного под углом к горизонту рабочим органом ротора с горизонтальной осью вращения. Использование метода математического моделирования позволило изучить сущность процесса на основе теории подобия и анализа размерностей. Установлены понятия ламинарного и турбулентного движения потока груза, изменение характера и параметров компонентов, движущихся с различной скоростью и плотностью. В ядре струи удобрений сосредоточено 75-90% компонентов, содержащихся в поперечном сечении струи. Ядро струи создает попутный поток воздуха, увлекающий остальные компоненты, включая мелкие. Траектория движения груза в воздухе приближается к параболе, а конечная скорость меньше начальной. На всем протяжении пути свободного полета изменяется функциональная зависимость между сопротивлением среды и относительной скоростью летящего груза. С повышением производительности машины компоненты оседают на площади более концентрированно. Получено аналитическое уравнение движения центра массы свободно летящего единичного тела в безвоздушном пространстве и с учетом сопротивления воздуха, под действием силы, возникающей при сходе груза с лопатки ротора. По результатам моделирования выведены математические зависимости траектории и дальности полета от начальных условий, а также установлены выводы о влиянии воздушной среды на характеристику полета гранулы удобрений.*

Ключевые слова: *разбрасыватель, лопастные рабочиеорганы, гранулированные удобрения, траектория полета, уравнение движения, окружная скорость, угловая скорость.*

MATHEMATICAL DEPENDENCES OF THE MOVEMENT OF CARGO ON THE WORKING BODY OF THE BLADE SPREADER OF GRANULAR FERTILIZERS

[1]Schwartz Anatoly
[1]Schwartz Sergey
[1]Secretarev Alexander
[1]Vetrov Ivan
[1]FSBEI HE "Kursk State Agricultural Academy"

Abstract. *It is known that the structurally operational parameters of the blade working bodies of the spreaders, especially for the surface application of granular fertilizers, depend on many factors, including the physicomechanical properties of the fertilizers - geometric dimensions, humidity, specific gravity, etc. The basic characteristics of the movement of cargo along the blades and in the jet ejected at an angle to the horizontal by the working body of the rotor with a horizontal axis of rotation are investigated. Using the method of mathematical modeling allowed us to study the essence of the process based on the theory of similarity and analysis of dimensions. The concepts of laminar and turbulent movement of the cargo flow, a change in the nature and parameters of components moving with different speeds and densities are established. 75-90% of the components contained in the cross section of the stream are concentrated in the core of the stream of fertilizers. The nucleus of the jet creates a concurrent*

air flow that carries away the remaining components, including small ones.The trajectory of the cargo in the air is approaching the parabola, and the final speed is less than the initial one. The functional relationship between the resistance of the medium and the relative speed of a flying load varies throughout the length of the free flight path. Components settle on the area in a more concentrated manner with increased machine performance.An analytical equation is obtained for the motion of the center of mass of a freely flying single body in an airless space and taking into account air resistance, under the action of a force arising when the load leaves the rotor blade. Mathematical dependences of the trajectory and flight range on the initial conditions are derived from the simulation results, and conclusions about the influence of the air on the flight characteristics of fertilizer granules are established.

***Keywords**: spreader, blade working bodies, granular fertilizers, flight path, equation of motion, circumferential speed, angular speed.*

Введение. Гранулированные минеральные, органические удобрения и их смеси в общем случае представляют собой механическую смесь твердых тел различной формы и крупности, промежутки между которыми в сухих условиях заполнены воздухом, во влажных – полностью или частично влагой (водой).

Тип конструкции и параметры разбрасывающих машин обуславливаются физико-механическими свойствами гранулированных удобрений, подлежащих разбрасыванию[1]. К ним относятся кусковатость, влажность и гигроскопичность, плотность (объемная масса) и удельный вес, взаимная подвижность частиц (сыпучесть, текучесть, слеживаемость, смерзаемость) и угол естественного отскока гранул, склонность к сводообразованию, истирающая способность (абразивность), хрупкость и т.д.

При проектировании разбрасывателей удобрений необходимо учитывать перечисленные свойства гранул, а также требования к технологическому процессу их обработки: не повреждать частицы, охлаждать и сушить их впроцессе переброски, принимать во внимание степень уплотнения гранул при укладке.

Физические явления, происходящие в струе компонентов гранулированных минеральных удобрений, брошенных под углом к горизонту, изучены еще недостаточно. Чтобы полнее представить себе этот процесс, необходимо составить, а затем исследовать аналитическое уравнение движения центра массы свободно летящего единичного тела, брошенного под углом к горизонту в безвоздушном пространстве, под действием силы, возникающей при отрыве гранулы от лопатки разбрасывателя.

Материалы и методика. Экспериментально установлено, что параметры струи насыпного груза, бросаемого метательной машиной, в реальных условиях несколько отличаются от параметров струи газа, найденных без учета сопротивления воздуха. Опытами Центральногонаучно-исследовательского института водного транспорта (ЦНИИВТ), проведенными на специально созданной и изготовленной лабораторной установке, отмечены следующие особенности формы струи гранулированных удобрений. С увеличением производительности метательной машины струя сжимается в вертикальном направлении. С повышением скорости бросания вся струя приподнимается и одновременно как бы сжимается в вертикальном направлении. Отдельные зерна вылетают под большим углом, чем угол наклона сбрасывающей части рабочего органа к горизонту. Было доказано также, что механически переносить теоретические исследования свободного полета единичной гранулы удобрения на их движение струей нельзя.

Каковы же причины, отклоняющие свободный полет любого из системы тел, движущихся струей, от траектории полета этого же тела, летящего вне системы.

Когда происходит непрерывное обтекание тела вязкой средой, то на больших расстояниях позади тела, в сравнительно узкой области вокруг продольной оси движения, истинная скорость движения среды несколько отличается от скорости набегающего потока среды на тело. В эту область, называемую ламинарным следом, попадают частицы среды из числа движущихся вдоль обтекаемого тела на сравнительно небольших расстояниях от него. Такое движение среды является по существу вихревым. При обтекании тел тупой формы появляется дорожка Кармана, которая зависит от формы тела, турбулентности набегающего потока и от других факторов [1].

С увеличением турбулентности потока усиливается турбулентность пограничного слоя тела, что, в свою очередь, сужает турбулентный след за телом. С сужением этого следа уменьшается сопротивление движению тела. [2, 3].

Еще Н.Е. Жуковский, ссылаясь на опыты Эйфеля, обратил внимание, что расстоянием между дисками, движущимися один за другим, влияет на величину коэффициента сопротивления среды. Описанные явления объясняются тем, что когда расстоянием между дисками незначительно, то вслед идущий диск попадает в среду воздушных вихрей, образуемых впереди движущимся диском, из-за чего турбулентный след за последующим диском сужается, и, как следствие, силы сопротивления его движению уменьшаются. Основываясь на выводах Н.Е. Жуковского, постараемся объяснить причины, изменяющие характер и параметры компонентов, движущихся с различной скоростью и плотностью струи гранулированных удобрений[4].

С повышением плотности струи уменьшается расстояние между соседними компонентами как в продольном, так и в поперечном направлениях. В этом случае вихри, образуемые за каждым из тел струи, сближаются один с другим, создавая ансамбль элементарных вихрей, характеризирующих вращательное и поступательное движение воздушной среды в струе компонентов груза. Хотя ансамбль таких вихрей существует ограниченное время, он соответствует определённым циклам разрушения и восстановления системы вихрей, благодаря которым с повышением плотности струи компонентов груза увеличивается скорость движения попутного потока воздуха, вызываемого струей груза, и уменьшается скорость движения компонентов относительно попутного потока воздуха. Отсюда, как следствие, несколько снижается лобовое сопротивление воздуха движению единичного тела, характеризуемого такими же параметрами движения. Это является первопричиной, увеличивающей дальность полета всех компонентов струей, в том числе и отличающихся большим сопротивлением воздуха, что также сказывается на повышении траектории ядра струи удобрений по отношению к траектории свадебного полета единичного тела, брошенного при тех же начальных параметрах.

С увеличением скорости метания компоненты движутся более концентрированной струей. При этом за каждым телом струи интенсивнее образуются вихри, в результате чего уменьшается лобовое сопротивление воздуха их движению и возрастают подъемные силы. Благодаря этому дальность свободного полета компонентов увеличивается, значительно повышается скорость метания, а траектория движения струи удобрений несколько приподнимается по отношению к траектории свободного полета единичного тела, брошенного при тех же начальных параметрах [5].

Высокие угловые скорости вращающихся компонентов струи удобрений усиливают интенсивность вихреобразования в пределах струи и, как следствие, уменьшают лобовое сопротивление воздуха и увеличивают подъемную силу. При этом следует обращать внимание на направление вращения компонентов, которое определяет направление действия подъемной силы на каждое тело в отдельности: вверх или вниз. Таким образом, вращение компонентов в определенной степени влияет на их дальность свободного полета, на отклонение траектории ядра струи удобрений от траектории свободного полета единичного тела и на размеры поперченного сечения струи удобрений.

Изложенное о причинах, влияющих на параметры струи удобрений, в одинаковой степени действительно при полете компонентов, как в неподвижной воздушной среде, так и при ветре. Ветер влияет не только на дальность и форму траектории свободного полета единичного тела, но и на свободный полет компонентов струи удобрений. Однако с увеличением плотности струи удобрений (концентрация компонентов в струе повышается), а также с возрастанием скорости бросания компонентов, действие ветра на них уменьшается. Тем самым снижается эффект выдувания особенно тех компонентов, которые характеризуются высокой парусностью. Следовательно, при увеличении плотности струи удобрений и скорости бросания ее компонентов повышается точность прицельного бросания и снижается качество сортирования компонентов струи удобрений под воздействием ветра.

Результаты и их обсуждение. Физические явления, органически связанные со свободным полетом компонентом струей, в действительностиболее сложны, чем они изложены выше. Необходимо учитывать то, что у истоков струи насыпного груза размеры ее поперечного сечения минимальны, а плотность компонентов в струе максимальная. Свободный полет компонентов начинается наиболее компактной системой тел. По мере удавления от исполнительного органа

метательной машины поперечные сечения струи удобрений непрерывноувеличиваются, а концентрация компонентов в струе непрерывно уменьшается. В связи с этим на всем протяжении пути свободного полета любого из тел изменяется функциональная зависимость между сопротивлением среды и относительной скоростью летящего тела. Это изменение связано со степенью удаления тел от исполнительного органа метательной машины и степенью начальной разреженности струи удобрений (производительности разбрасывателя).

С повышением производительности метательной машины компоненты оседают на площади более концентрировано; при этом центр их разбрасывания удаляется от точки метания. Когда перебрасываются насыпные грузы, компоненты которых характеризуются различными скоростями витания, то они начинают оседать на площади разбрасывания, расположенной значительно ближе к исполнительному органу разбрасывателя, чем тогда, когда используются однородные компоненты.

В центральной части струи удобрений сосредотачивается 75 - 90 % компонентов от их количества, содержащегося в поперченном сечении струи. Здесь компоненты груза более концентрированы, чем у наружного очертания струи. Они составляют ядро струи, которое создает попутный поток воздуха, увлекающий остальные компоненты, в том числе и мелкие, примеси.

Свободный полет тела, брошенного под углом к горизонту без сопротивления воздуха

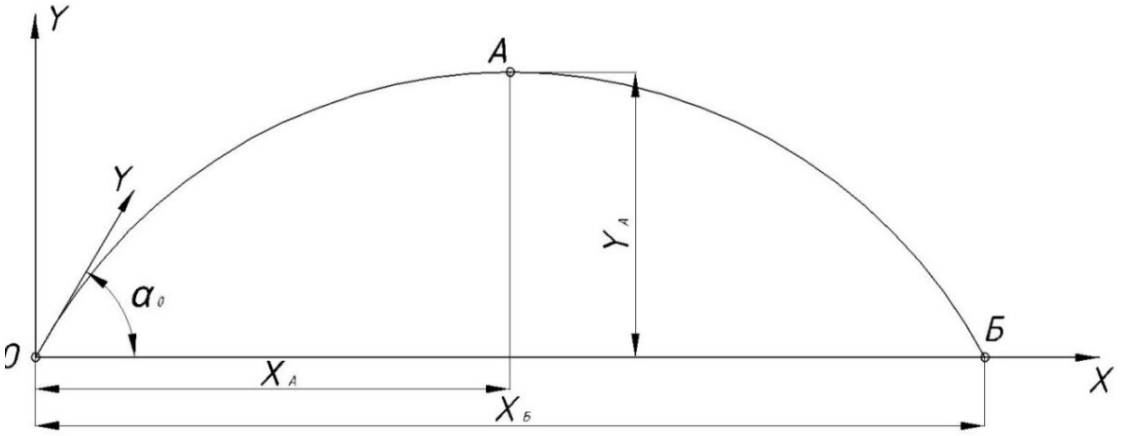


Рисунок 1 – Траектория свободного полета единичного тела

Известно, что траектория свободного полета единичного тела без сопротивления воздуха представляет собой параболу (рисунок 1), уравнение которой в прямоугольных координатах с началом в точке вылета О имеет вид

$$y = xtg\alpha_0 - \frac{gx^2}{2\vartheta_0^2 \cos^2 \alpha_0}, \tag{1}$$

где x и y – координаты центра массы гранулы;

α_0 – угол наклона к горизонту касательной к траектории в начале свободного полет, т. е. угол вылета гранулы, который в дальнейшем будем называть углом метания (бросания);

υ_0 – начальная скорость вылета тела, в дальнейшем ее будем называть скоростью метания (бросания).

Дальность полета брошенного тела равно расстоянию от точки О (рисунок 1) до точки Б пересечения траектории с осью x – точки падения тела на горизонтальную плоскость x. Ордината точки падения$y=0$.

Приняв в уравнении (1) $y=0$, имеем

$$xtg\alpha_0 - \frac{gx^2}{2\vartheta_0^2 \cos^2 \alpha_0} = x\left(tg\alpha_0 - \frac{gx}{2\vartheta_0^2 \cos^2 \alpha_0}\right) = 0\,. \tag{2}$$

При решении уравнения (2) возможны два случая:

1) $x_1=0$, что соответствует точке О начала бросания тела;

2) $$x_Б = \frac{\vartheta_0^2}{g}\sin 2\alpha_0, \quad (3)$$

что соответствует абсциссе точки Б падения тела.

Наибольшая дальность полета будет при $\sin 2\alpha_0 = 1$, т.е. при $\alpha_0 = 45^\circ$ или $\frac{\pi}{2} - 45^\circ$. Она будет одинакова независимо от того, направлена начальная скорость под углом к α_0 горизонту или к вертикали. Тогда

$$x_{\max} = \frac{\vartheta_0^2}{g}. \quad (4)$$

Уравнение движения центра массы гранулы в параметрической форме запишется

$$x = \vartheta_0 t \cos\alpha_0; \quad (5)$$

$$y = \vartheta_0 t \sin\alpha_0 - \frac{gt^2}{2}, \quad (6)$$

где t – время свободного полета тела.

Точка А (рисунок 1)соответствует наивысшему положению тела на траектории. Найдем выражения, определяющие ординату точки А. Для этого из уравнения (6) определим

$$\frac{dy}{dt} = \vartheta_0 \sin\alpha_0 - gt, \quad (7)$$

где $\frac{dy}{dt} = \vartheta_y$ – проекция истинной скорости движения тела на ось *y*.

В точке А

$$\vartheta_y = \frac{dy}{dt} = 0. \quad (8)$$

Следовательно

$$\vartheta_0 \sin\alpha_0 - gt_A = 0, \quad (9)$$

или

$$t_A = \frac{\vartheta_0 \sin 2\alpha_0}{g}. \quad (10)$$

Из совместного решения уравнений (5), (6) и (10) получим систему уравнений для нахождения координаты точки А (рисунок 1)

$$\begin{cases} x_A = \frac{\vartheta_0^2}{2g}\sin 2\alpha_0 \\ y_A = \frac{\vartheta_0^2}{2g}\sin^2\alpha_0 \end{cases}. \quad (11)$$

Однако в полученной системе уравнений множитель ϑ_0 равенскоростив момент отрыва частицы от лопатки разбрасывателя.

Рассмотрим подробнее эту составляющую.

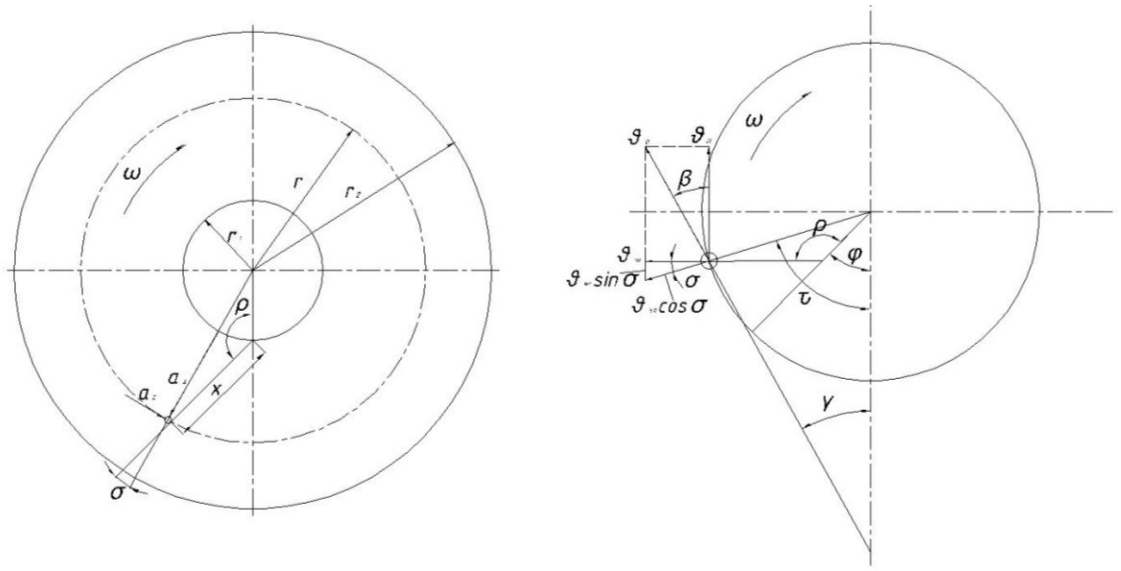
Скорость частицы в момент отрыва от лопатки разбрасывателя

Максимальная окружная скорость *υ* частицы груза наблюдается при достижении ей кожуха. Скорость *υ* равна окружной скорости лопасти $\upsilon_л$ (рисунок 2).

$$\vartheta = \vartheta_л = 2\pi r_2 n = 6{,}28 r_2 n, \text{ м/мин}, \quad (12)$$

где r_2 – радиус лопасти в м;

n – частота вращения лопастей в минуту.



а б

Рисунок 2 – Схемы для определения:
а – ускорения движения частицы груза; б – величины и направления скорости бросания груза

Скорость передвижения частицы вдоль лопасти переменная, что определяется тангенциальным a_T и радиальным $a_ч$ ускорениями частицы. В подвижной системе координат ускорения [5]

$$a_T = r\frac{d\omega}{dt} + 2\omega\frac{dr}{dt}; \tag{13}$$

$$a_ч = \frac{d^2r}{dt^2} - \omega^2 r; \tag{14}$$

где r – расстояние от частицы до центра вращения;
ω – угловая скорость частицы и соответственно лопасти;
t – время передвижения частицы.

При постоянной угловой скорости $\frac{d\omega}{dt} = 0$ центростремительное ускорение $\omega^2 r = 0$, так как частица свободно перемещается от центра по лопасти. При этих условиях уравнения (13) и (14) запишутся

$$a_T = 2\omega\frac{dr}{dt} = 2\omega\vartheta_{чл} = a_c; \tag{15}$$

$$a_ч = \frac{d^2r}{dt^2} = \omega^2 r = a_ц, \tag{16}$$

где $\upsilon_{чл}$ – относительная скорость частицы по отношению к лопасти;
a_c – ускорение Кориолиса;
$a_ц$ – центростремительное ускорение.

Из векторной суммы a_T и $a_ч$ получим результрующее ускорение a_p, которое определяется длиной пути, пройденного частицей вдоль лопасти (ускорение a_p определяет величину скорости частицы).

Обозначим x – координата, направленная вдоль лопасти (рисунок 2, а). В таком случае $\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \upsilon_{чл}$ – скорость вдоль лопасти, а $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = a_{чл}$ – результирующее ускорение вдоль

лопасти. Скорость $\upsilon_{чл}$ можно определять без учета ускорения силы тяжести, что допустимо при достаточно большой скорости $\upsilon_л$.

Использую обозначения, приведенные на рисунке 2 и μ – коэффициент трения между частицей и лопастью, получим

$$a_{чл} = a_ц \cos\sigma - \mu(a_ц \sin\sigma + a_c) = \omega^2 r(\cos\sigma - \mu\sin\sigma) - 2\mu\omega\vartheta_{чл} \tag{17}$$

или

$$\ddot{x} = \omega^2 r(\cos\sigma - \mu\sin\sigma) = 2\mu\omega x. \tag{18}$$

Из чертежа (рисунок 2) имеем

$$r^2 = r_1^2 + x^2 - 2r_1 x\cos\rho \tag{19}$$

и

$$\frac{\sin\sigma}{r_1} = \frac{\sin\rho}{r}. \tag{20}$$

В таком случае

$$\begin{aligned} r(\cos\sigma - \mu\sin\sigma) &= \sqrt{r^2(1-\sin^2\sigma)} - \mu r_1 \sin\beta = \\ &= \sqrt{r_1^2 + x^2 - 2r_1 x\cos\rho - r_1^2\sin^2\rho} - \mu r_1 \sin\rho = \\ &= \sqrt{r_1^2\cos^2\rho + x^2 - 2r_1 x\cos\rho} - \mu r_1\sin\rho = x - r_1\cos\rho - \mu r_1\sin\rho. \end{aligned} \tag{21}$$

После подстановки из уравнения (21) в уравнение (18) получим

$$\ddot{x} + 2\mu\omega\dot{x} - \omega^2 x + \omega^2 r_1(\cos\rho + \mu\sin\rho) = 0. \tag{22}$$

Это есть линейное дифференциальное уравнение вида $\ddot{x} + 2A\dot{x} - Bx + C = 0$ с постоянными коэффициентами $A = \mu\omega,\ B = \omega^2,\ C = \omega^2 r_1(\cos\rho + \mu\sin\rho)$ [4]

При начальных условиях ($t = 0,\ x = 0,\ \dot{x} = \vartheta_1$), где ϑ_1 – окружная скорость частицы) решением уравнения (22) является

$$\begin{aligned} x = &\frac{\frac{\vartheta_1}{\omega} - r_1(\cos\rho + \mu\sin\rho)(\sqrt{1+\mu^2} + \mu)}{2\sqrt{1+\mu^2}} e^{-(\sqrt{1+\mu^2}-\mu)\omega t} - \\ &- \frac{\frac{\vartheta_1}{\omega} + r_1(\cos\rho + \mu\sin\rho)(\sqrt{1+\mu^2} - \mu)}{2\sqrt{1+\mu^2}} e^{-(\sqrt{1+\mu^2}+\mu)\omega t} + r_1(\cos\rho + \mu\sin\rho). \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned} \dot{x} = \vartheta_{чл} = \omega\Bigg[&(\sqrt{1+\mu^2} - \mu)\frac{\frac{\vartheta_1}{\omega} - r_1(\cos\rho + \mu\sin\rho)(\sqrt{1+\mu^2} + \mu)}{2\sqrt{1+\mu^2}} \times \\ &\times e^{(\sqrt{1+\mu^2}-\mu)\omega t} + (\sqrt{1+\mu^2} + \mu) \times \\ &\times \frac{\frac{\vartheta_1}{\omega} + r_1(\cos\rho + \mu\sin\rho)(\sqrt{1+\mu^2} - \mu)}{2\sqrt{1+\mu^2}} e^{-(\sqrt{1+\mu^2}+\mu)\omega t} \Bigg]. \end{aligned} \tag{24}$$

В рассматриваемой лопастной метательной машине частицы груза, подаваемые в торец ротора, падают по вертикали и подхватываются на лету лопастями. Поэтому угол поворота лопасти $\varphi = \omega t$ отсчитывают от вертикали. Считая радиус r_2 постоянным, видим, что при коротких, нормальных и длинных лопастях r_1 различно, следовательно, не одинакова и начальная

скорость $\vartheta_1 = r_1\omega$. Таким образом, величины μ и υ_1, а также значения x и $\dot{x}$ (уравнения (19) и (21)) могут быть различными.

Известно, что тангенциальное бросание груза зависит от величины коэффициента трения μ и угла наклона лопасти a к рукоятке (рисунок 2, б). Если коэффициент трения незначителен, то тангенциальное бросание груза при наклоненных назад лопастях будет осуществляться при больших углах φ, чем у радиальных лопастей. С увеличением значения μ тангенциальное бросание осуществляется при углах φ, мало отличающихся один от другого при наклонённых назад и радиальных лопастях [6].

Обозначим τ – угол на корпусе ротора (рисунок 2, б), который характеризует положение конца лопасти в момент отрыва частицы груза от лопасти

$$\tau = (180^\circ - \rho - \sigma) + \varphi. \tag{25}$$

Если в этом месте сделать отверстие в кожухе, то бросание груза будет только тангенциальное с окружной скоростью лопастей $\upsilon_л$. Это обеспечивается при лопастях, наклоненных назад и коротких [5].

Когда частица груза подходит к отверстию корпуса со скоростью $\upsilon_{чл}$, то величина скорости бросания (рисунок 2, б)

$$\vartheta_0 = \sqrt{\vartheta_{чл}^2 \cos^2\sigma + (\vartheta_л + \vartheta_{чл}\sin\sigma)^2}\ , \tag{26}$$

а направление скорости бросания определяется углом β

$$tg\beta = \frac{\vartheta_{чл}\cos\sigma}{\vartheta_л + \vartheta_{чл}\sin\sigma}. \tag{27}$$

Таким образом, уравнение движения центра масс гранулы примет вид

$$\begin{cases} x_A = \dfrac{\vartheta_0^{\,2}}{2g}\sin 2\alpha_0 \\ y_A = \dfrac{\vartheta_0^{\,2}}{2g}\sin^2\alpha_0 \end{cases}. \tag{28}$$

Выводы.

1. Если в безвоздушном пространстве горизонтальная проекция скорости постоянна, то при свободном полете тела в воздухе, горизонтальная проекция скорости υ убывает по мере удаления тела от точки бросания.
2. В безвоздушном пространстве траектория симметрична. Траектория свободного полета тела в воздухе не является симметричной кривой. Несимметричность проявляется тем больше, чем значительнее начальная скорость и парусность тела. Угол падения всегда больше угла бросания.

Траектория свободного полета тела в воздухе приближается к параболе, когда начальная скорость полета тела невелика, а парусность значительна. При этом минимум скорости свободного полета тела соответствует точке траектории, расположенной недалеко от вершины траектории.

3. В безвоздушном пространстве абсцисса вершины траектории соответствует половине дальности полета тела. При свободном полете тела в воздухе абсцисса вершины траектории всегда больше половины дальности полета тела.
4. В безвоздушном пространстве скорости бросания и падения равны. При свободном полете тела в воздухе конечная скорость меньше начальной.

Список литературы

1. ГОСТ 28714-90. Машины и тракторы сельскохозяйственные и лесные. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний. введ. 1991-07-01.-М: Стандартинформ, 2005.-14с.

2. Кукибный А.А. О причинах непостоянства величины и направления скоростей зерен, бросаемых зернометом. // Труды Киевского технологического института пищевой промышленности. – Вып. 24, 1961.-195с.

3. Баранов А.А. Ктеории измельчающего аппарата кормоуборочных машин. // Техника в сельском хозяйстве.– 1998. – №3. – С.13-17.

4. Долголенко А.А. Теория движения сыпучего материала по вращающемуся диску. // Труды Ленинградского институту инженеров водного транспорта. – 1985. – Вып. 11. – 137 с.

5. Ужаков Т.М. Моделирование работы центробежных аппаратов для внесения минеральных удобрений на склонах. // Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения И.И. Смирнова. – 2004. – С.126-127.

6. Шварц А.А., Шварц С.А. Экспериментально-теоретическое обоснование рабочего органа разбрасывателя удобрений. // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сборник научных статей 4-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием.- Курск: Юго-Западный гос. ун.. – 2019. – С.301-319.

References

1. GOST 28714-90. Mashiny i traktory sel'skohozyajstvennye i lesnye. Mashiny dlya vneseniya tverdyh mineral'nyh udobrenij. Metody ispytanij. vved. 1991-07-01.-M: Standartinform, 2005.-14s.

2. Kukibnyj A.A. O prichinah nepostoyanstva velichiny i napravleniya skorostej zeren, brosaemyh zernometom. // Trudy Kievskogo tekhnologicheskogo instituta pishchevoj promyshlennosti. – Vyp. 24, 1961.-195s.

3. Baranov A.A. Kteorii izmel'chayushchego apparata kormouborochnyh mashin. // Tekhnika v sel'skom hozyajstve.– 1998. – №3. – S.13-17.

4. Dolgolenko A.A. Teoriya dvizheniya sypuchego materiala po vrashchayushchemusya disku. // Trudy Leningradskogo institutu inzhenerov vodnogo transporta. – 1985. – Vyp. 11. – 137 s.

5. Uzhakov T.M. Modelirovanie raboty centrobezhnyh apparatov dlya vneseniya mineral'nyh udobrenij na sklonah. // Materialy Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya I.I. Smirnova. – 2004. – S.126-127.

6. SHvarc A.A., SHvarc S.A. Eksperimental'no-teoreticheskoe obosnovanie rabochego organa razbrasyvatelya udobrenij. // Perspektivy razvitiya tekhnologij obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii. Sbornik nauchnyh statej 4-j Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem.- Kursk: YUgo-Zapadnyj gos. un.. – 2019. – S.301-319.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Шварц Анатолий Адольфович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор Федерального государственно бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Курская государственная сельскохозяйственная академия», Россия, г. Курск, e-mail: aashwarz@mail.ru.

Шварц Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, директор ООО «Меридиан», Россия, г. Курск, e-mail: shwarz@inbox.ru.

Секретарев Александр Петрович – аспирант Федерального государственно бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Курская государственная сельскохозяйственная академия», Россия, г. Курск, e-mail: a_sekretarev@inbox.ru.

Ветров Иван Юрьевич – аспирант Федерального государственно бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Курская государственная сельскохозяйственная академия», Россия, г. Курск, e-mail: Iva-vetrov2008@yandex.ru.

Information about authors

Organization affiliation

Shvarts Anatoly Adolfovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kursk State Agricultural Academy”, Russia, Kursk, e-mail: aashwarz@mail.ru.

Shvarts Sergey – Candidate of Technical Sciences, Director of LLC “Meridian”, Russia Kursk, e-mail: shwarz@inbox.ru.

Sekretarev Alexander – graduate student of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kursk State Agricultural Academy”, Russia, Kursk, e-mail: a_sekretarev@inbox.ru.

Vetrov Ivan – graduate student of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kursk State Agricultural Academy”, Russia, Kursk, e-mail: vetrov2008@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 20.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 23.04.2020

УДК 631.145
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-74-82

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РАСТЕНИЕВОДСТВЕ

[1]Романенкова Мария Сергеевна
[1]Балабанов Виктор Иванович
[1]ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Реферат. *Концепция точного земледелия предусматривает применение физико-математических, технических и программных средств для получения и обработки информации об агроэкосистемах, а также для реализации агроприемов непосредственно в поле. Рассмотрены некоторые особенности и перспективы применения цифровых технологий в сельском хозяйстве. Дан анализ основных направлений применения цифровых технологии в растениеводства, в том числе «Интернета вещей». Показаны примеры датчиков, применяемых для мониторинга окружающей среды, а также программное обеспечение для управления производством сельскохозяйственной продукции. Обоснована роль сенсоров, устанавливаемых в контрольных точках, являющихся основой системы определения характеристик почвы, предназначенных для мониторинга изменений: влажности, температуры, кислотности и т.д. Представлена возможная реализация контроля почвенных показателей восемнадцатью датчиками АМТ-300 в Центре точного земледелия Полевой опытной станции Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К.А. Тимирязева, позволяющая сельхозпроизводителям принимать более обоснованные решения о выборе агрокультур для каждого участка поля. Отмечается, что в последние годы активизировалась работа по разработке робототехнических (беспилотных) систем для выполнения повторяющихся операций при возделывании сельскохозяйственных культур с целью минимизации человеческого труда, вредного воздействия химических средств на человека и окружающую среду, повышение производительности труда и урожайности возделываемых культур.Делается вывод, что внедрение цифровых технологий в сельском хозяйстве позволит автоматизировать мониторинг сельскохозяйственных угодий и техники, более эффективно управлять процессами производства продукции, сократив непосредственное участие человека во многих агротехнологических операциях в растениеводстве.*

Ключевые слова*: цифровые технологии, координатное земледелие, мониторинг окружающей среды, Интернет вещей, автоматизация, датчики (сенсоры), параллельное и автоматическое вождение, беспилотные системы.*

APPLICATION OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN PLANT CROPS

[1]Romanenkova Maria
[1]Balabanov Victor
[1]FSBEI HE "Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy"

Abstract. *The concept of precision farming provides for the use of physical, mathematical, technical and software tools for obtaining and processing information about agroecosystems, as well as for implementing agricultural practices directly in the field. Some features and prospects of using digital technologies in agriculture are considered. Analysis of the main directions of the application of digital technology in crop production, including the "Internet of things" has been given. Examples of sensors used for environmental monitoring, as well as software for managing agricultural production have been shown. The role of sensors installed at control points, which are the basis of the system for determining the characteristics of the soil, designed to monitor changes: humidity, temperature, acidity, etc., is substantiated. A possible implementation of the monitoring of soil indicators by eighteen AMT-300 sensors at the Center for Precision Agriculture of the Field Experimental Station of the Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, which allows farmers to make more informed decisions about the choice of agricultural crops for each plot of the field. It is noted that in recent years, work has intensified on the development of robotic (unmanned) systems for*

performing repetitive operations in the cultivation of crops in order to minimize human labor, the harmful effects of chemicals on humans and the environment, increasing labor productivity and crop yields. It is concluded that the introduction of digital technologies in agriculture will automate the monitoring of agricultural land and equipment, more effectively manage the production processes, reducing the direct human participation in many agro-technological operations in crop production.

Keywords: *digital technologies, coordinate agriculture, environmental monitoring, Internet of things, automation, sensors (sensors), parallel and automatic driving, unmanned systems*

Главным моментом для увеличения производительности агропромышленного комплекса хозяйства является повышение эффективности использования сельскохозяйственной техники и агротехнологий. В связи с этим повышаются требования к качеству выполнения технологических процесса производства сельскохозяйственной продукции, что в свою очередь вызывают необходимость разработки, исследования и внедрения новых подходов и концепций в сельском хозяйстве, в числе которых «Точное земледелие», «Координатное земледелие», «Прецизионное земледелие», «Разумное земледелие», «Интеллектуальное сельское хозяйствование», основанных на применении геоинформационных и цифровых технологиях [1-16].

Указанные концептуальные подходы базируются на использовании роботизированных устройств, новых автоматизированных и информационных систем и технологий. Настоящий прорыв произошел в оснащении средствами электронного контроля мобильной сельскохозяйственной техники. На многих машинах использование терминалов уже является обязательным условием. Такие терминалы основываются на GPS и Isobus и поддерживаемых современным программным обеспечением. Усовершенствуется и увеличивается номенклатура устройств, позволяющих оценивать плодородие почвы, развитие растений в течение вегетационного периода и принимать обоснованные решения о необходимости примения тех или иных удобрений и подкормок, их дозировки [1-20].

В статье рассмотрены некоторые особенности и перспективы применения цифровых технологий, в том числе на базе «Интернета вещей» в растениеводстве.

В последнее время в сельском хозяйстве произошел ряд технологических преобразований. Благодаря «умным» гаджетам сельхозпроизводители получили не только полный контроль над выращиванием скота, но и смогли повысить производительность при выращивании сельскохозяйственных культур. В настоящее время эти процессы наиболее предсказуемы, тем самым это существенно повышает эффективность агробизнеса в целом [1-20].

Не смотря на то, что технологии «Интернета вещей» (англ. Internet of Things, IoT) и «Больших данных» (англ. Bigdata)в агропромышленном комплексе не достаточно распространены, все же их рынок очень быстро расширяется и тем самым использование IoT технологий в сельское хозяйство постоянно растет.

В виду того что «Интернет вещей» – развивающийся рынок, для компаний все еще есть широкие возможности для реализации своих проектов и внедрения новых программ для современных гаджетов.

Технологии «Интернета вещей» могут изменить производство сельскохозяйственных культур в нескольких аспектах. Существует пять способов как с помощью IoT можно улучшить производство продукции растениеводства [1-3].

Первый способ: большой массив данных (погодные условия, качество почвы, прогресс в росте урожая), которые можно получит с помощью интеллектуальных датчиков установленных по периметру поля, поступает в режиме онлайн на ваш смартфон. Эти данные можно использовать для отслеживания состояния вашего бизнеса как в целом, так и в отдельных аспектах.

Второй способ: контролирование внутренних процессов, что существенно помогает в снижении производственных рисков. Фермер может планировать лучше сбыт продукции, так как он может прогнозировать объем производства продукции растениеводства.

Третий способ: благодаря усиленному контролю за производством можно управлять затратами и сокращать отходы. Так отслеживая любые отклонения в процессе производства сельскохозяйственной продукции, можно значительно снизить риски потерь.

Четвертый способ: автоматизация таких процессов как орошение, внесение средств защиты растений или удобрений значительно повышает эффективность бизнеса.

Пятый способ: путем автоматизации улучшается контроль производства и поддерживаются более высокие стандарты качества и рост урожая.

В конечном итоге все эти факторы могут привести к увеличению прибыли.

Известно, что ежегодно отмечается прирост по всем возможным направлениям цифровизации агробизнеса. Наиболее востребованными цифровыми технологиями для аграрной сферы сегодня являются:

1. Постоянная в период вегитации оценка состояние развития сельскохозяйственных культур, в частности посредством нормализованного вегетационного индекса (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI**).** при этом активно используются аэро и космические снимки.

2. Прогнозная оценка потенциальной урожайности сельскохозяйственных культур на основании полученных данных о их биологическом состоянии.

3. Оценка качества зерна, включая влажность, фотометрические и колометрические характеристи и множество других показателей.

4. Оценка фитосанитарного состояния сельскохозяйственных посевов и их засоренности.

5. Оценка состояния почвы: гумусированность, дифференцированность почвенного покроя, засоленность, закисленность и т.д.

6. Программные платформы для управления сельскохозяйственными предприятиями, которые опираются при выработке рациональных решений на объединенные данные, используемые, например, в точном земледелии.

7. Использование платформ данных («Field View», «Farmers Business Network» и другие). При этом сельхозтоваропроизводитель имеет реальную возможность получить индивидуальную централизованную платформу. В результате информация, полученная из большого количества источников, объединяется и генерируется обобщенная и целостная картину состояния отрасли.

В настоящее время на отечественном рынке достаточно много различных IoT-датчиков, а также IoT-приложений для сельского хозяйства (рисунок 1).

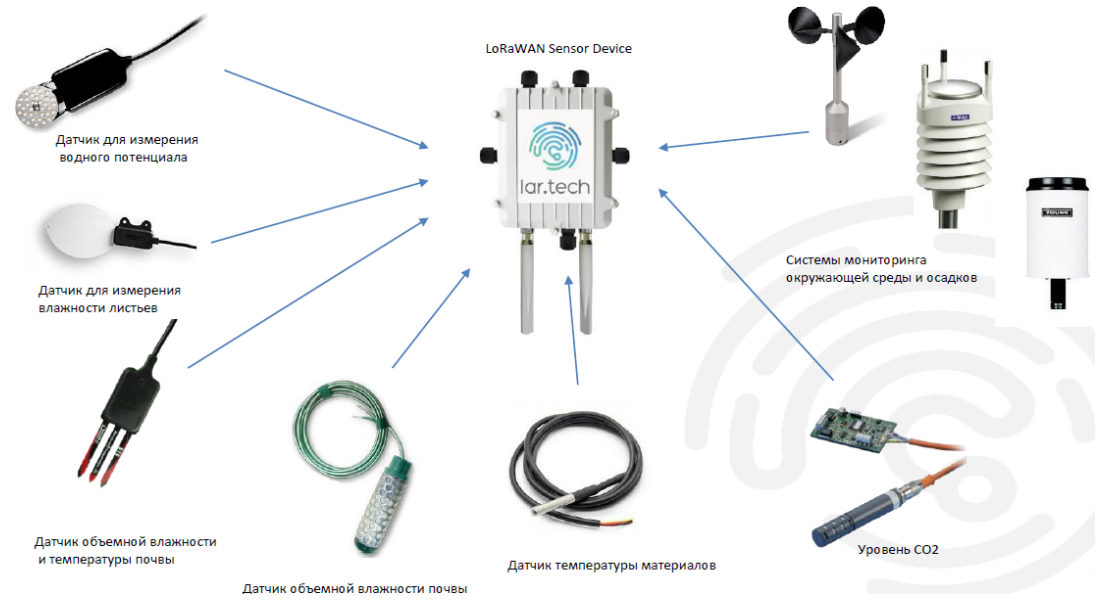


Рисунок 1– Примеры датчиков для мониторинга окружающей среды

Применение в практической агарной практике различного рода средств измерения – стратегическое направление создания современного интеллектуального сельскохозяйственного производства.

Датчики, охватывающие большие площади сельхозугодий, непрерывно передают информацию о состоянии контролируемых объектов, таких параметров, как влажность, температура почвы и воздуха, информацию о здоровье растений, наличии вредителей и т.д.

Например, сенсоры, устанавливаемые в контрольных точках, являются основой системы определения характеристик почвы, характеристик ее различий: рельефа, типа почв, освещенности и т.д. Зарегистрированные показатели отправляются на сервер, а оттуда – на устройства заинтересованных пользователей. Сельхозпроизводители принимают более обоснованные решения о том, какие сельскохозяйственные растения наиболее рационально размещать на том или ином земельном участвке. Ведь на одном поле могут находиться участки с различными агрокультурами. После того как неоднородности выявлены, появляется больше возможностей для эффективного ухода за растениями [14-20].

Самые распространенные датчики в сельском хозяйстве – это сенсоры влажности почвы, их применяют сельхозпроизводители, которые выращивают культуры на орошении. Как правило, такие сенсоры подключены к облачным сервисам для своевременной передачи информации. например, при ручном поливе, норма потребления определяется заранее. При этом невозможно должным образом учесть ту конкретиную ситуацию, которая сформируется непосредственно во время полива. В итоге возможен как избыточный полив, так недостаточный. Только датчики могут помочь определить реальную потребность в увлажнении при учете таких факторов, как тип агрокультуры, фаза ее роста и информировать о переувлажнении почвы или, наоборот, о необходимости полива.

Очевидно, что характеристики почвенных сенсоров имеют очень важное значение при их практическом применении. Сравнительная характеристика применяемых для исследований почвенных датчиков приведена в таблице.

Датчики дают необходимую информацию с помощью которой не только вырабатывается рациональная технологическая практика при производстве сельскохозяйственной продукции, не менее важна их роль и при сохранении полученного урожая. Постоянный мониторинг параметров воздушной среды, в том числе и в режиме реального времени, с учетом специфических особенностей той или иной культуры позволяет избежать неоправданных потерь продукции. В настоящее время подобного рода датчики своевременно обнаруживают очаг загнивания продукции даже в больших буртах.

Таблица. Сравнительная характеристика наиболее известных почвенных датчиков

Характеристика датчика		АМТ-300	АПЦ-1	LusterLeafRapitest 1818
Влажность почвы		+	+	+
Значение pH		+	+	+
Температура почвы		+	+	-
Освещенность		+	+	+
Уровень плодородия		-	-	+
Источник питания		батарейка 9V, тип Крона	батарейка 9V, тип Крона	-
Выключение датчика		через 5 минут бездействия	отключается автоматически при бездействии более 4,5минут	отключается при изменении положения кнопки включения
Рабочая температура		от +5°С до +40°С	от +5°С до +40°С	+3 до +40
Размеры	Корпус устройства	122х63х36мм	122 мм х 63 мм х 36 мм	260 х 60 х 38
	Длина датчика, см	20 (диаметр 5 мм)	20 (диаметр 5 мм)	19
Вес, г.		70	73	122

Для мониторинга климатических условий наиболее применимыми остаются метеорологические станции, которые в свою очередь состоят из нескольких интеллектуальных датчиков [1]. Такие станции располагаются непосредственно у поля, собирая данные о состоянии окружающей среды и почвы (рисунок 2).

Рисунок 2 – Метеостанция Центра точного земледелия РГАУ-МСХАимени К.А. Тимирязева

Еще один вид IoT, который используется при производстве сельскохозяйственной продукции это устройства, которые располагаются непосредственно на полях для сбора данных, которые относятся к земледелию.

Разработаны портативные датчики, которые могут работать в автономном режиме. Они могут вести онлайн-мониторинг требуемых показателей. Выпускаются биоразлагаемые беспроводные датчики второго поколения. Такие датчики позволяют решить еще один важный вопрос, связанный с экологией [1-3].

Такие датчики могут устанавливаться в строго установленные участки полей как вручную, так и автоматически с использованием дронов. Применение спутникового позиционирования позволяет устанавливать их с точностью до нескольких дециметров.

Концентрация датчиков определяется с учетом неоднородности рельефа сельскохозяйственных угодий. На рисунке 3 показана возможная реализация контроля почвенных показателей восемнадцатью датчиками АМТ-300 в Центре точного земледелия Полевой опытной станции Российского государственного аграрного университета – МСХА (РГАУ-МСХА) имени К.А. Тимирязева.

Удаленный доступ к ним обеспечивается системами подвижной связи. Использование альтернативных источников энергии и биоразлагаемых компонентов делает их обслуживание доступным и малозатратным.

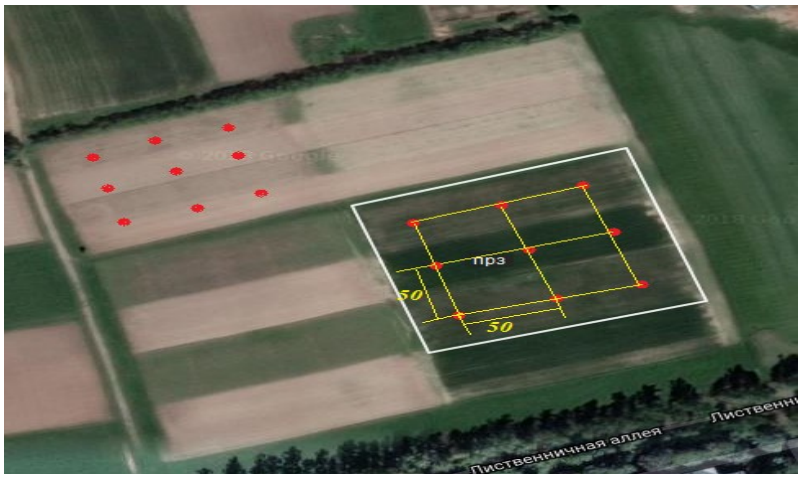


Рисунок 3 – Схема размещения датчиков на полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева

Аналитически систему анализа и выработки рациональных решений можно формализовать следующим образом:

$$Xo = F\,(A,\ B,\ C, \ldots.\ n),$$

где *Xo* – оптимальный показатель анализируемого параметра; *F* – математический (интеллектуальный) аппарат обработки массива данных; *A, B, C, n* – анализируемые (регистрируемые) показатели.

Результат моделирования представлен графиками зависимости показателей почвы и воздуха в зависимости от даты наблюдения (рисунок 4).

В связи с совершенствованием мобильных устройств: мобильных телефонов, планшетов, смартфонов, разрабатываются и активно используются приложения, которые подходят для реализации оптимизационных задач. Естественно, эти приложения могут с успехом использоваться и примительно к рассматриваемых нами задачам. Они создаются в основном на базе мобильных операционных систем iOS (компания «Apple»), Android (компания «Google») и WindowsPhone (компания «Microsoft»). Такие приложения можно приобрести в интернет-магазинах приложений AppStore, GooglePlayStore и WindowsPhoneStore. Сегодня «умный» телефон может быть эффективным ассистентом агронома, инженера, зоотехника или руководителя хозяйства, а не только средством связи, развлечения. В самом простом варианте смартфон может стать справочником, который всегда под рукой, для любого специалиста сельского хозяйства.

ExactFaming–программное обеспечение, которое может использоваться при реализации фермером технологий IoT.

Данное программное обеспечение обладает большими возможностями. С его помощью можно создавать не только электронные карты полей, но вести отчеты об осмотре этих полей, работать с космоснимками и индексом вегетации. На главной странице этого приложения «Центр мониторинга» собрана информация обо всем хозяйстве и вынесены важные показатели. Благодаря этому можно быстро оценивать текущую ситуацию [3].

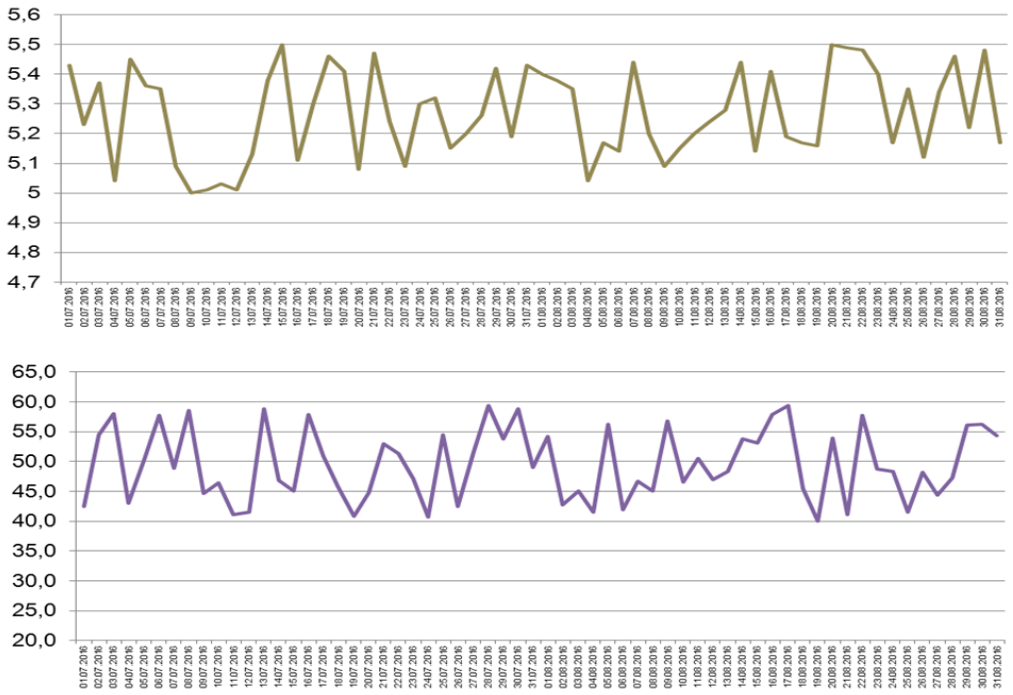


Рисунок 4 – Параметры кислотности, pH (верхний график)
и влажности почвы, % (нижний график) в динамике за период наблюдений

Трудно переоценить значение в современных условиях использования различного рода систем параллельного, автоматического вождения сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов. Их использование существенно раздвигает границы времени использования машин в течение суток, исключаются огрехи и необоснованное перекрытие при движении МТА. Резко сокращается утомляемость механизаторов, повышается их производительность. Появляется реальная возможность снизить требования к профессиональной подготовке механизаторов, без ущерба для качества выполнения сложнейших полевых механизированных работ.

Например, в настоящее время используются три способа практической реализации параллельного вождения машинно-тракторных агрегатов [8-16].

Первый способ: перемещение трактора корректируется механизатором посредством органов управления трактором. При этом он следует указаниям светодиодного или графического следоуказателя, смонтированного на панели управления.

Второй способ: траектория перемещени трактора корректируется подруливающим устройством, смонтированным на органах управления, с приводом от электродвигателя.

Третий способ: траектория перемещени трактора корректируется исполнительным механизмом, подсоединенным к гидросистеме органов управления.

В настоящее время активно ведутся разработки робототехнических (беспилотных) систем. Прежде всего они ориентированы на использовании при исполнении повторяющихся операций при возделывании сельскохозяйственных культур. Основная цель их применения: замена человеческого труда, минимизация вредного воздействия химических средств на человека и окружающую среду, повышение производительности труда и урожайности возделываемых культур.

Сельскохозяйственная отрасль является перспективным рынком для внедрения большинства разработок в области цифровых технологий, в том числе робототехники. Использование роботизированных машин в сельском хозяйстве позволяет создавать высокоинтеллектуальное автоматизированное производство сельхозпродукции.

Заключение. Разработка, исследование и внедрение цифровых технологий в агропромышленном комплексе позволят практически полностью автоматизировать мониторинг сельскохозяйственных угодий и использования техники, более эффективно управлять процессами производства продукции, сократив непосредственное участие человека во многих агротехнологических операций в растениеводстве.

В РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в Центре точного земледелия Полевой опытной станции планируется проведение исследований по использованию технологий «Интернета вещей» для управления продукционным процессом выращивания сельскохозяйственных культур.

Список литературы

1. Козубенко И.С., Балабанов И.В. «Интернет вещей» вуправлении агропромышленным комплексом // Техника и оборудование для села**.** – 2017**.** – № 8**.** – С. 46-48.

2. Романенкова М.С. Оборудование для проведения экспериментальных исследований технологии «Интернета вещей» в растениеводстве». Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения В.П. Горячкина. – 2018. – С. 211-214

3. Балабанов В.И., Романенкова М.С. «Интернет вещей» в сельском хозяйстве. Доклады ТСХА. Вып. 290. – Часть II. – 2018 – С.71-74

4. CHto takoe Internet veshchej. Internet of Things, IoT? http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A7%D1%82%D0%BE_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9_(Internet_of_Things,_IoT). (data obrashcheniya 1.03.2019).

5. Интернет_вещей. [Электронный ресурс, свободный доступ]. – URL. https://ru.wikipedia.org/wiki/ (дата обращения 1.03.2019).

6. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. №1632-р «Об утверждении программы «Цифровая экономика Российской Федерации» [Электронный ресурс]: URL: http://static.government.ru/media/files/ 9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf

7. Цифровизация в сельском хозяйстве: технологические и экономические барьеры в России [Электронный ресурс]/ J'son&PartnersConsulting. – URL: https://www.crn.ru/newsdetail. php?ID =121765 (дата обращения 21.05.2018 г.).

8. Балабанов В.И. Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие. [Учебное пособие]. / В.И. Балабанов, С.В Железова, Е.В. Березовский, А.И. Беленков, В.В. Егоров. М.: Из-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2013. - 143 с.

9. Балабанов В.И., Федоренко В.Ф. и др Технологии, техника и оборудование для координатного (точного) земледелия: учеб.. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех». – 2016. – 240 с.

10. Балабанов В.И. Полевая стратегия. Внедрение инноваций в координатном земледелии. Агротехника и технологии. – 2016. – № 5. – С. 50-53.

11. Балабанов В.И. Нужно заново учиться работать на селе // Новое сельское хозяйство. – 2010. – № 4.– С. 56–57.

12. Баутин В.М., Балабанов В.И., Березовский Е.В. // Умные кадры для «умных ферм» // Вестник ГЛОНАСС. – 2012. – № 1. – С. 41-44.

13. Шульга Е.Ф., Куприянов А.О., Хлюстов В.К., Балабанов В.И., Зейлигер А.М. Управление сельхозпредприятием с использованием космических средств навигации (ГЛОНАСС) и дистанционного зондирования Земли: Монография. – М.: Изда-во РГАУ –МСХА. – 2016. – 286 с.

14. Якушев В.П. На пути к точному земледелию – Санкт-Петербург : Изд-во ПИЯФ РАН,2002. – 458 с.

15. Якушев В.П., Якушев В.В. Информационное обеспечение точного земледелия – Санкт-Петербург: Изд-во ПИЯФ РАН – 2007. – 384 с.

16. Федоренко В.Ф. Информационные технологии в сельскохозяйственном производстве. М.: ФГБНУ "Росинформагротех" – 2014. – 223 с.

17. Dammer K.H., Wartenbergb G. Sensor-based weed detection and application of variable herbicide rates in real time / Crop Protection. Volume 26, Issue 3, March 2007. – P. 270–277.

18. Povh F.P. &AnjosW.P.G.. Optical Sensors Applied in Agricultural Crops. 2014. Ссылка доступа: http://dx.doi.org/10.5772/57145 Просмотрено 05.05.2016

19. The Yara N-Sensor™ Complete Solution to Precision Farming. 2015 / Ссылка доступа: www.yara.co.uk. Просмотрено 05.05.2016

20. Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1969 Ссылка доступа: http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/13479/ProceedingsSixthInternationalSymposiumRemoteSensing.pdf?sequence=1

References

1. Kozubenko I.S., Balabanov I.V. «Internet veshchej» vupravlenii agropromyshlennym kompleksom // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. – 2017. – № 8. – S. 46-48.

2. Romanenkova M.S. Oborudovanie dlya provedeniya eksperimental'nyh issledovanij tekhnologii «Interneta veshchej» v rastenievodstve». Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchyonyh i specialistov, posvyashchyonnoj 150-letiyu so dnya rozhdeniya V.P. Goryachkina. – 2018. – S. 211-214

3. Balabanov V.I., Romanenkova M.S. «Internet veshchej» v sel'skom hozyajstve. Doklady TSKHA. Vyp. 290. – CHast' II. – 2018 – S.71-74

4. CHto takoe Internet veshchej. Internet of Things, IoT? http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A7%D1%82%D0%BE_%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B5%D1%82_%D0%B2%D0%B5%D1%89%D0%B5%D0%B9_(Internet_of_Things,_IoT). (data obrashcheniya 1.03.2019).

5. Internet_veshchej. [Elektronnyj resurs, svobodnyj dostup]. – URL. https://ru.wikipedia.org/wiki/ (data obrashcheniya 1.03.2019).

6. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 28 iyulya 2017 g. №1632-r «Ob utverzhdenii programmy «Cifrovaya ekonomika Rossijskoj Federacii» [Elektronnyj resurs]: URL: http://static.government.ru/media/files/ 9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf

7. Cifrovizaciya v sel'skom hozyajstve: tekhnologicheskie i ekonomicheskie bar'ery v Rossii [Elektronnyj resurs]/ J'son&PartnersConsulting. – URL: https://www.crn.ru/newsdetail. php?ID =121765 (data obrashcheniya 21.05.2018 g.).

8. Balabanov V.I. Navigacionnye tekhnologii v sel'skom hozyajstve. Koordinatnoe zemledelie. [Uchebnoe posobie]. / V.I. Balabanov, S.V ZHelezova, E.V. Berezovskij, A.I. Belenkov, V.V. Egorov. M.: Iz-vo RGAU-MSKHA im. K.A. Timiryazeva, 2013. - 143 s.

9. Balabanov V.I., Fedorenko V.F. i dr Tekhnologii, tekhnika i oborudovanie dlya koordinatnogo (tochnogo) zemledeliya: ucheb.. – M.: FGBNU «Rosinformagrotekh». – 2016. – 240 s.: il.

10. Balabanov V.I. Polevaya strategiya. Vnedrenie innovacij v koordinatnom zemledelii. Agrotekhnika i tekhnologii. – 2016. – № 5. – S. 50-53.

11. Balabanov V.I. Nuzhno zanovo uchit'sya rabotat' na sele // Novoe sel'skoe hozyajstvo. – 2010. – № 4.– S. 56–57.

12. Bautin V.M., Balabanov V.I., Berezovskij E.V. // Umnye kadry dlya «umnyh ferm» // Vestnik GLONASS. – 2012. – № 1. – S. 41-44.

13. SHul'ga E.F., Kupriyanov A.O., Hlyustov V.K., Balabanov V.I., Zejliger A.M. Upravlenie sel'hozpredpriyatiem s ispol'zovaniem kosmicheskih sredstv navigacii (GLONASS) i distancionnogo zondirovaniya Zemli: Monografiya. – M.: Izda-vo RGAU –MSKHA. – 2016. – 286 s.

14. YAkushev V.P. Na puti k tochnomu zemledeliyu – Sankt-Peterburg : Izd-vo PIYAF RAN,2002. – 458 s.

15. YAkushev V.P., YAkushev V.V. Informacionnoe obespechenie tochnogo zemledeliya – Sankt-Peterburg: Izd-vo PIYAF RAN – 2007. – 384 s.

16. Fedorenko V.F. Informacionnye tekhnologii v sel'skohozyajstvennom proizvodstve. M.: FGBNU "Rosinformagrotekh" – 2014. – 223 s.

17. Dammer K.H., Wartenbergb G. Sensor-based weed detection and application of variable herbicide rates in real time / Crop Protection. Volume 26, Issue 3, March 2007. – P. 270–277.

18. Povh F.P. &AnjosW.P.G.. Optical Sensors Applied in Agricultural Crops. 2014. Ssylka dostupa: http://dx.doi.org/10.5772/57145 Prosmotreno 05.05.2016.

19. The Yara N-SensorTM Complete Solution to Precision Farming. 2015 / Ssylka dostupa: www.yara.co.uk. Prosmotreno 05.05.2016.

20. Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1969 Ssylka dostupa: http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/13479/ProceedingsSixthInternationalSymposiumRemoteSensing.pdf?sequence=1.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Романенкова Мария Сергеевна – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, г. Москва, e-mail: mashkaromanenkova@mail.ru

Балабанов Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», Россия, г. Москва, e-mail: vbalabanov@rgau-msha.ru.

Author credentials

Affiliations

Romanenkova Maria – postgraduate student of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy”, Russia, Moscow, e-mail: mashkaromanenkova@mail.ru.

Balabanov Victor - Doctor of Technical Sciences, Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy”, Russia, Moscow, e-mail: vbalabanov@rgau-msha.ru.

Поступила в редакцию (Received): 23.12.2019 Принята к публикации (Accepted): 16.03.2020

УДК 667.6: 532.542.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-83-92

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ КОНСЕРВАЦИОННОГО СОСТАВА

[1]Петрашев Александр Иванович
[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Известно, что производительность консервации сельскохозяйственных машин зависит от применяемого оборудования и расхода наносимого консервационного состава. Установлено, что эффективная вязкость тиксотропного консервационного состава понижаетсяв процессе его течения из напорного бака в краскораспылитель. Это происходит из-за механического разрушения структур состава под давлением нагнетания. Показано, что невысыхающие консервационные составы на масляной основе формируют покрытие за счет повышения их эффективной вязкости вследствие структурных изменений в нанесенной пленке. Предложен метод определения тиксотропности составов, получаемых введением присадки в масляную основу. Метод заключается в измерении расхода состава при двух значениях давления нагнетания с последующим расчетом показателя расхода по предлагаемой формуле. Если показатель расхода меньше единицы, то исследуемый состав обладает тиксотропными свойствами, он может удерживаться на вертикальных поверхностях. Если показатель расхода больше единицы, то предлагается повысить концентрацию загущающей присадки в масляной основе состава. Скорректировано уравнение для определения давления нагнетания консервационного состава. В этом уравнении учитывается гидравлическое сопротивление в шланге подачи и в сопле краскораспылителя. Получена эмпирическая формула для расчета потерь давления в сопле краскораспылителя. В этой формуле учитывается влияния вязкости и скоростного напора на потери давления. Установлена зависимость расхода состава от его вязкости и плотности, от давления нагнетания, диаметра сопла, длины и диаметра шланга. Показано, что при уменьшении длины шланга в 2 раза расход состава повышается на 64 %, а при увеличении его диаметра в 1,2 раза – на 67 %. Эти данные рекомендуется использовать при разработке оборудования для нанесения консервационных покрытий на рабочие органы сельскохозяйственной техники.*

Ключевые слова*: консервационное оборудование, тиксотропный состав, гидравлическое сопротивление, потери давления.*

HYDRAULIC BASES OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR APPLICATION OF CONSERVATION COMPOSITION

[1]Petrashev Alexandr
[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract. *It known that the performance of conservation of agricultural machines depends on the equipment used and the consumption of the applied conservation composition. It been established that the effective viscosity of the thixotropic preservation composition decreases during its flow from the pressure tank to the paint sprayer. This is due to the mechanical destruction of the structure of the composition under discharge pressure. It been shown that non-drying, oil-based preservation compositions form a coating by increasing their effective viscosity due to structural changes in the deposited film. A method for determining the thixotropic of compositions obtained by introducing an additive into an oil base proposed.The method consists in measuring the flow rate of the composition at two discharge pressures with the subsequent calculation of the flow rate using the proposed formula. If the flow rate is less than unity, then the studied composition has thixotropic properties, it can held on vertical surfaces. If the flow rate is greater than unity, it proposed to increase the concentration of the thickening additive in the oil-based composition. The equation for determining the discharge pressure of the preservation composition been adjusted. The hydraulic resistance in the feed hose and in the nozzle of the spray gun taken into*

account in this equation. The empirical formula for calculating the pressure loss in the nozzle of the spray gun obtained. The effect of viscosity and pressure head on pressure loss taken into account in this formula.The dependence of the flow rate of the composition on its viscosity and density, on the discharge pressure, nozzle diameter, hose length and diameter been established. It was shown that the consumption of the composition increases by 64% with a decrease in the length of the hose by 2 times, and with an increase in its diameter by 1.2 times - by 67%.These data recommended using when developing equipment for applying conservation coatings to the working bodies of agricultural machinery.

Keywords: *preservation equipment, thixotropic composition, hydraulic resistance, pressure loss.*

Введение. Необходимость защиты сельскохозяйственной техники консервационными покрытиями на срок до 10 месяцев вызвана сезонностью ее эксплуатации и длительным бездействием[1, 2]. Сменная производительность консервации определяется количеством машин, рабочие органы которых покрывают защитным составом в течение 1 ч сменного времени:

$$W_{см} = \frac{n_{см}}{t_{см}},$$

где $W_{см}$ – сменная производительность консервации (шт/ч); $n_{см}$ – количество машин одной марки, защищенных в течение смены, шт; $t_{см}$ – длительность смены, ч.

Сменная производительность нанесения консервационного покрытия на машины одной марки за 1 ч сменного времени:

$$B_{см} = S_1 \cdot W_{см},$$

где $B_{см}$ – сменная производительность нанесения консервационного покрытия, м^2/ч;
S_1 – покрываемая составом площадь поверхности рабочих органов одной машины, м^2/шт.

Сменная производительность $B_{см}$ нанесения консервационного покрытия зависит от технической (часовой) производительности $B_{т.ч}$ применяемого консервационного оборудования, а также от формы поверхностей рабочих органов машины и других эксплуатационно-технологических факторов, учитываемых коэффициентом $K_и$ технологического использования оборудования:

$$B_{см} = B_т \cdot K_и,$$

где $B_т$ – техническая (часовая) производительность оборудования для нанесения консервационного покрытия, м^2/ч; $K_и$ – коэффициент технологического использования оборудования.

Коэффициент $K_и$ технологического использования консервационного оборудования [3] представляет собой отношение сменной производительности нанесения консервационного покрытия к технической производительности оборудования:

$$K_и = \frac{B_{см}}{B_т}.$$

В таблице 1 показаны реальные значения производительности навесной установки УПХН-50 [4], полученные при нанесении консервационного состава Ингибит-С. Эти результаты приведены в протоколе № 8-44-96 (4200152) государственных приемочных испытаний установки на Поволжской МИС. Во время испытаний установки состав Ингибит-С подавали из напорного бака по шлангу и наносили посредством пневматического краскораспылителя СО-71.

Таблица 1 – Эксплуатационно-технологические показатели для установки УПХН-50

Показатель	Значение при консервации техники				
	ПЛН-8-40	КПС-4	КСМ-4	Дон-1500	СЗП-3,6
Объем работы, шт	6	9	5	7	9
Производительность $W_{см}$ консервации за 1 ч времени смены, шт/ч	7,8	4,6	2,6	0,9	1,8
Производительность нанесения, м^2/ч: - техническая, $B_т$ - за 1 ч времени смены, $B_{см}$	 192 32,4	 192 31,2	 192 26,4	 192 23,4	 192 24,6
Коэффициент $K_и$ технологического использования оборудования	0,17	0,16	0,14	0,12	0,13

Как видно из таблицы 1, значения коэффициентов технологического использования консервационного оборудования зависели от вида консервируемых машин и находилась в интервале $0{,}17 \geq K_{и} \geq 0{,}12$, в среднем $K_{и.ср} = 0{,}14$.

Техническая (секундная) производительность $B_{т.с}$ оборудования определялась по времени нанесения покрытия краскораспылителем на плоский лист:

$$B_{т.с} = \frac{S_{п}}{t_{п}},$$

где $S_{п}$ – площадь плоского листа, м^2; $t_{п}$ – время нанесения покрытия, с.

Скорость $U_{р}$ (м/с) перемещения факела краскораспылителя в процессе окраски листа влияет на техническую производительность оборудования:

$$B_{т.с} = U_{р} D (1 - k_{н}), \quad (1)$$

где D – ширина (диаметр) факела распыла, м; $k_{н}$ – коэффициент перекрытия смежных полос при нанесении покрытия, $k_{н}$ = 0,25-0,3.

По эргономическим требованиям скорость $U_{р}$ перемещения факела краскораспылителя должна быть 0,23-0,3 м/с для того, чтобы иметь оптимальную производительность и качество технологического процесса нанесения. При этом расход состава через краскораспылитель следует определять с учетом рекомендуемой величине удельного расхода:

$$Q_{к} = B_{т.с} \cdot m_{к}, \quad (2)$$

где $Q_{к}$ – расход состава (по массе), кг/с; $m_{к}$ – удельный расход состава на 1 м^2 поверхности, кг/м^2.

Чтобы получить номинальную толщину защитного слоя и для экономичности технологического процесса нанесения покрытия, удельный расход $m_{к}$ состава должен соответствовать нормативной величине $A_{г}$:

$$m_{к} = \frac{k_{п} A_{г}}{1000}, \quad (3)$$

где $k_{п}$ – коэффициент, учитывающий потери состава при нанесении, для пневматического краскораспылителя $k_{п}$ = 1,2-1,3; $A_{г}$ – норматив расхода состава, г/м^2; 1000 – число для перевода норматива расхода из (г/м^2) в (кг/м^2).

Из выражений (1), (2) и (3) получена зависимость расхода $Q_{г}$ состава (г/с) через краскораспылитель, учитывающая технологические факторы (D, $U_{р}$, $k_{н}$), необходимый уровень защиты ($A_{г}$) и экономичность ($k_{п}$) процесса нанесения:

$$Q_{г} = k_{п} A_{г} \cdot U_{р} \cdot D (1 - k_{н}). \quad (4)$$

Для скорости $U_{р}$ = 0,3 м/с, коэффициентов $k_{п}$ = 1,25 и $k_{н}$ = 0,25, ширины факела D = 0,1 м, нормативов расхода $A_{г}$ = 70-360 г/м^2 определены значения возможных расходов составов при нанесении пневматическими краскораспылителями: $Q_{г}$ = 2-10 г/с. Анализ технических характеристик пневматических краскораспылителей показал, что максимальный уровень расхода состава достигается при работе краскораспылителя с напорным баком. Для краскораспылителя КРП-11 величина расхода состава – 6 г/с, для краскораспылителя СО-71 – 11 г/с.

Экспериментальные гидравлические исследования. Для того чтобы подать состав из напорного бака в краскораспылитель с расходом не ниже $Q_{г}$, необходимо в бак ввести сжатый воздух с давлением нагнетания P. Энергия давления сжатого воздуха расходуется в процессе течения состава на преодоление им гидравлических сопротивлений в напорной магистрали, включающей шланг, патрубки и штуцеры, а также в канале и сопле краскораспылителя. Гидравлические потери давления зависят как от геометрических параметров напорной магистрали и краскораспылителя, так и от реологических свойств консервационного состава.

Исследование реологические свойств консервационных составов, полученных из отходов нефтепереработки, обычно состоит из определения зависимости их вязкости от температуры и концентрации компонентов [5]. Тиксотропность относится к одному из самых важных свойств невысыхающих консервационных покрытий на основе отработанных масел. Если использовать высыхающие защитные составы, то нанесенное покрытие формируется за счет повышения вязкости при испарении растворителей. В случае применения невысыхающих составов на масляной основе – за счет повышения эффективной вязкости в результате структурных изменений в нанесенной пленке.

Связь давления нагнетания с расходом состава может быть установлена экспериментально с привлечением формулы Ньютона, приведенной в работе [6]:

$$P_н = Бq^2 + Дq. \quad (5)$$

где $P_н$ – давление нагнетания, МПа; q – расход состава по объему, мл/с (см^3/с); Б – квадратичный коэффициент давления, МПа /(мл/с)^2; Д – линейный коэффициент давления, МПа /(мл/с).

Расход состава по объему q (мл/с) связан с расходом состава по массе $Q_г$ (г/с) формулой:

$$q = \frac{Q_г}{\rho} = \frac{Q_г}{0{,}001\rho_к}.$$

где ρ – плотность состава, измеренная в г/см^3; $\rho_к$ – плотность состава, измеренная в кг/м^3.

Коэффициенты (Б) и (Д)учитывают суммарное влияние конструктивных параметров оборудования и реологических свойств состава на падение давления в напорной магистрали и сопле краскораспылителя. Коэффициенты рассчитывают по данным двух опытов, при которых измеряют давления P_1 и P_2 нагнетания и соответствующие им расходы q_1 и q_2:

$$Б = \frac{P_2q_1 - P_1q_2}{q_1q_2(q_2 - q_1)}, \quad Д = \frac{P_1q_2^2 - P_2q_1^2}{q_1q_2(q_2 - q_1)}. \quad (6)$$

Авторы работы [7] приводят степенную эмпирическую формулу, связывающую давление нагнетания с расходом жидкости:

$$P_с = Kq^b, \quad (7)$$

где $P_с$ – давление нагнетания, МПа; K – степенной коэффициент давления, МПа/(мл/с); b – показатель расхода.

Показатель b расхода и степенной коэффициент K давления устанавливают экспериментальным путем по данным 2-х опытов:

$$b = \frac{\ln(P_2/P_1)}{\ln(q_2/q_1)}; \qquad K = \frac{P_1}{q_1^b}. \quad (8)$$

Значения коэффициентов давления определяли опытным путем при подаче состава из напорного бака по шлангу $d_ш$ = 9 мм длиной $L_ш$ = 9 м через открытое сопло краскораспылителя СО-71. В качестве экспериментального состава использовали индустриальное масло И-20А, вязкость которого изменяли добавлением кубовых аминов (загущение) или уайт-спирита (разжижение). Вязкость состава измеряли на вискозиметрах типа ВЗ-4 ($\nu_{ус}$ – условная, секунды) и ВНЖ (ν – кинематическая, мм^2/с). Полученные результаты показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментальные данные по расходу состава

Вязкость состава		Давление нагнетания, P, МПа				
кинематическая, ν, мм^2/с	условная, $\nu_{ус}$, с ВЗ-4	0,02	0,04	0,06	0,1	0,2
		Расход состава, q, мл/с				
22	14	26	37	-	-	-
60	21	-	12,6	16,6	24	-
227	52	-	7	-	17,5	34
432	90	-	-	4	7,2	15

Там, где на одной вязкости состава выполнено по 3 опыта, то коэффициенты давления рассчитывали по данным первого и второго, второго и третьего опытов. Получив значения коэффициентов, вычисляли их среднюю геометрическую величину, например, Б = $(Б_1 \cdot Б_2)^{0,5}$. Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов давления

Вязкость состава кинематическая ν, мм^2/с	Квадратичный коэффициент, Б, МПа /(мл/с)^2	Линейный коэффициент, *Д*, МПа/(мл/с)	Показатель расхода, *b*	Степенной коэффициент, *K*, МПа/(мл/с)
22	$3{,}0 \cdot 10^{-5}$	$3{,}07 \cdot 10^{-5}$	1,96	$0{,}035 \cdot 10^{-3}$
60	$9{,}1 \cdot 10^{-5}$	$2{,}06 \cdot 10^{-3}$	1,43	$1{,}08 \cdot 10^{-3}$
227	$0{,}5 \cdot 10^{-5}$	$5{,}62 \cdot 10^{-3}$	1,02	$5{,}39 \cdot 10^{-3}$
432	$-16{,}0 \cdot 10^{-5}$	$15{,}39 \cdot 10^{-3}$	0,91	$16{,}75 \cdot 10^{-3}$

По результатам вычислений установлено, что при загущении масла кубовыми аминами и увеличении его вязкости до 432 мм^2/с, линейный коэффициент (Д) давления повысился, а квадратичный коэффициент (Б) принял отрицательное значение. Отрицательная величина квадратичного коэффициента (Б) противоречила известным закономерностям течения ньютоновской жидкости. Аномальное изменение коэффициента (Б) свидетельствовало о проявлении свойств структурированной жидкости у экспериментального состава при повышении концентрации кубовых аминов. Отрицательное значение коэффициента (Б) для структурированного состава имело место при условии:

$$P_2 q_1 - P_1 q_2 < 0.$$

Для этого условия справедливо неравенство:

$$1 < \frac{P_2}{P_1} < \frac{q_2}{q_1}. \quad (9)$$

Так как отношения обеих сторон неравенства (9) больше единицы, то при вычитании из них единицы знак неравенства не меняется:

$$\frac{P_2}{P_1} - 1 < \frac{q_2}{q_1} - 1.$$

Отсюда получаем

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} < \frac{q_2 - q_1}{q_1}, \quad \text{далее} \quad \frac{\Delta P}{P_1} < \frac{\Delta q}{q_1},$$

где ΔP – прирост давления, МПа; Δq – прирост расхода, мл/с.

Таким образом, при подаче структурированного тиксотропного состава из напорного бака на распыление, относительный прирост расхода ($\Delta q/q_1$) состава через краскораспылитель опережает относительный прирост давления ($\Delta P/P_1$) в баке. Это связано с понижением эффективной вязкости состава в результате механического разрушения образующихся структур при повышении давления нагнетания от P_1 до P_2.

С ростом вязкости состава от 22 до 227 мм^2/с (в 10 раз) отмечалось увеличение степенного коэффициента K давления в 154 раза и снижение показателя b расхода от 1,96 до 1,02. При отрицательных значениях квадратичного коэффициента Б = -16,0·10^{-5} МПа/(мл/с)^2 величина показателя расхода опустилась ниже единицы: b = 0,92. Приведенные данные показывают взаимосвязь коэффициентов *Б*, *Д* с показателем b.

Для определения диапазона изменений показателя b расхода, сравним формулы (5) и (7). На рисунке 1 в виде точек нанесены экспериментальные данные из таблицы 2 и проведены графики давлений, исчисленные по формулам (5) и (7).

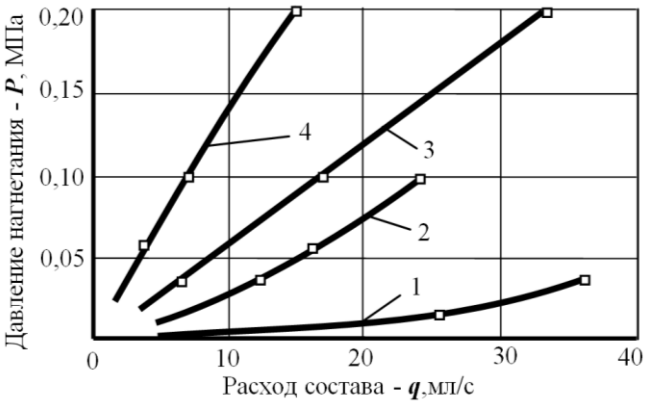


Рисунок 1 – Эмпирические зависимости давления (***P***) нагнетания от расхода (***q***) состава при вязкости **ν**: 1 – 22 мм^2/с; 2 –60 мм^2/с; 3 – 227 мм^2/с; 4 – 432 мм^2/с

Так как графики в границах опытных данных практически накладываются друг на друга, то допустимо считать, что обе формулы адекватно описывают экспериментальную связь давлений $P_н$

и $P_с$ с расходом q состава. Исходя из равенства рассчитанных давлений ($P_н = P_с$), приравняем выражения (5) и (7):

$$Kq^b = Бq^2 + Дq \quad \text{или} \quad Kq^{b-1} = Бq + Д. \tag{10}$$

Решим уравнение (10) относительно показателя b по данным двух опытов:

$$b = 1 + \frac{\ln\left(\frac{Бq_2+Д}{Бq_1+Д}\right)}{\ln\left(\frac{q_2}{q_1}\right)}. \tag{11}$$

По данным таблицы 3 для маловязкого состава (ν = 22 мм^2/с) линейный коэффициент давления Д = 3,07·10^{-5} МПа/(мл/с), что намного ниже произведения Бq_1 = 78·10^{-5} МПа/(мл/с), т.е. Д ≪ Бq_1. Поэтому допустима запись:

$$\ln\left(\frac{Бq_2 + Д}{Бq_1 + Д}\right) \approx \ln\left(\frac{Бq_2}{Бq_1}\right) = \ln\left(\frac{q_2}{q_1}\right). \tag{12}$$

Подставив выражение (12) в (11), найдем максимальное значение показателя расхода для маловязких составов: $b_{н.max} \to 2{,}0$.

Для вязкого состава (ν = 227 мм^2/с) линейный коэффициент давления Д = 562,1·10^{-5} МПа/(мл/с) намного выше произведения Бq_2 = 17·10^{-5} МПа/(мл/с), т.е. Д ≫ Бq_2. В этом случае допустима запись:

$$\ln\left(\frac{Бq_2 + Д}{Бq_1 + Д}\right) \approx \ln\left(\frac{Д}{Д}\right) = 0. \tag{13}$$

Подставив выражение (13) в (11), найдем минимальное значение показателя расхода для вязких составов: $1{,}0 \leftarrow b_{н.min}$. Проведенным исследованием установлено, что показатели расхода $b_н$ консервационных составов, проявляющих свойства ньютоновской жидкости, могут иметь значения в диапазоне: $1{,}0 < b_н < 2{,}0$.

Показатель расхода $b_т$ для структурированного состава определим с учетом неравенства (9), при котором:

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) < \ln\left(\frac{q_2}{q_1}\right). \tag{14}$$

Подставив выражение (14) в формулу (8), найдем область определения значений показателя расхода структурированных тиксотропных составов: $b_т < 1{,}0$. По данным опытов, показатели расхода $b_т$ тиксотропных консервационных составов со свойствами неньютоновской структурированной жидкости были действительны в диапазоне: $0{,}9 \le b_т < 1{,}0$.

Выполненные исследования позволили предложить метод выявления тиксотропности составов, получаемых введением присадки в масляную основу. Метод заключается в измерении расходов (q_1,q_2) состава при двух значениях давления нагнетания (P_1, P_2). При этом состав подается из нагнетательного бака через шланг и краскораспылитель в мерный цилиндр без распыления. После проведения опытов рассчитывается показатель b расхода по формуле (8). Если значение b< 1,0, то исследуемый состав обладает тиксотропными свойствами и может удерживаться на вертикальных поверхностях. Если b > 1,0, то необходимо повысить концентрацию загущающей присадки в масляной основе состава.

Экспериментально-аналитическая оценка расхода состава и потерь давления нагнетания в консервационном оборудовании. Формула (7) представляется более удобной для определения взаимосвязи расхода q состава с давлением P его нагнетания из напорного бака. Однако, эмпирические зависимости, рассчитанные по формуле (7), являются частными и применимы только для конкретных конструкционных параметров оборудования и реологических характеристик состава. Любые изменения вязкости состава, длины или диаметра шланга сопряжены с проведением новых экспериментальных исследований.

В работах [8, 9] приводится обобщенная формула для расчета давления нагнетания консервационного состава, а также результаты оценки гидравлических сопротивлений напорной магистрали и краскораспылителя. Авторами было установлено, что при расходе состава 6 г/с, примерно 95 % гидравлических потерь давления приходится на шланг длиной 10 м и на сопло распылителя. Полученные результаты позволяют упростить обобщенную формулу, исключив из нее расчеты малозначимых потерь давления в патрубках, штуцерах и каналах краскораспылителя.

Малозначимую часть потерь предлагается учитывать повышающим коэффициентом – 1,1, а расчет давления нагнетания $P_к$ (Па) вести по приближенной формуле:

$$P_к = 1{,}1(\Delta P_ш + \Delta P_с), \quad (15)$$

где $\Delta P_ш$ – потери давления в шланге, Па; $\Delta P_с$ – потери давления при истечении состава из сопла краскораспылителя, Па.

При расходе состава $q_к$ (м^3/с) потери давления в шланге рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_ш = \frac{2q_к\rho_к\nu_к}{\pi}(\lambda \cdot \mathrm{Re})\frac{L_ш}{d_ш^4}, \quad (16)$$

где $L_ш$, $d_ш$ – длина и диаметр шланга, м; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; Re – число Рейнольдса для шланга; $\nu_к$ – вязкость состава кинематическая, м^2/с.

В источнике [10] для гидравлических расчетов маслопроводов рекомендована величина произведения (λ·Re) = 75. С учетом этой рекомендации уточнена формула (16):

$$\Delta P_ш = 150q_к\rho_к\nu_к \cdot \frac{L_ш}{\pi d_ш^4}, \quad (17)$$

Потери давления при истечении состава из сопла рассчитываются по формуле:

$$\Delta P_с = \frac{8q_к^2\rho_к}{\mu^2\pi^2 d_с^4} = \frac{2q_к\nu_к\rho_к\mathrm{Re}_с}{\mu^2\pi d_с^3}, \quad (18)$$

где $\mathrm{Re}_с$ – число Рейнольдса для сопла; $d_с$ – диаметр сопла, м; μ – коэффициент расхода.

Число Рейнольса $\mathrm{Re}_с$ определяется по формуле:

$$\mathrm{Re}_с = \frac{4q_к}{\pi d_с \nu_к}.$$

Результаты исследования процесса истечения консервационных составов через сопла краскораспылителей отражены на рисунке 2.

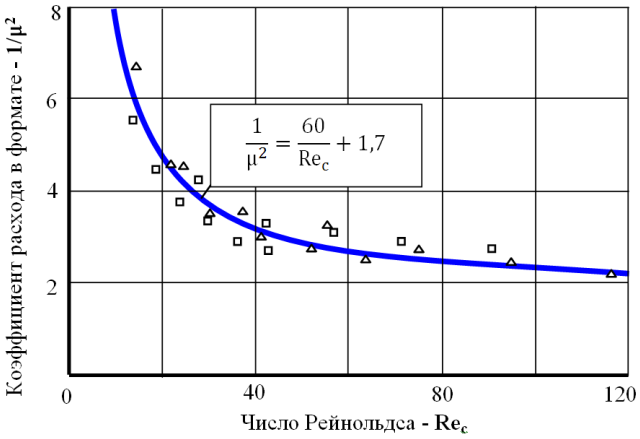


Рисунок 2 – Связь коэффициента расхода (**1/μ²**) с числом Рейнольдса(**Re$_с$**)

При обработке полученных данных получена эмпирическая зависимость коэффициента расхода состава через сопло от числа Рейнольса:

$$\frac{1}{\mu^2} = \frac{60}{\mathrm{Re}_с} + 1{,}7. \quad (19)$$

Подставляем зависимость (19) в формулу (18):

$$\Delta P_с = 120q_к\nu_к\rho_к \cdot \frac{d_с}{\pi d_с^4} + \frac{13{,}6q_к^2\rho_к}{\pi^2 d_с^4}, \quad (20)$$

В формуле (20) первое слагаемое учитывает влияние вязкости на потери давления по длине сопла, равнозначной его диаметру. Полагаем, что второе слагаемое в определенной мере учитывает затраты давления в сопле на увеличение кинетической энергии истекающего состава. Для проверки этого предположения определим давление $P_н$ скоростного напора состава на выходе из сопла краскораспылителя:

$$P_н = \frac{\alpha u_с^2\rho_к}{2} = \frac{8\alpha q_к^2\rho_к}{\pi^2 d_с^4}, \quad (21)$$

где α – коэффициент кинетической энергии; $u_с$ – средняя скорость струи на выходе из сопла, м/с.

Сравнением выражения (21) со вторым слагаемым формулы (20), определим опытное значение коэффициента кинетической энергии для сопла: α = 1,7. Значение коэффициента кинетической энергии соответствует ламинарному режиму течения состава: $1{,}05 \le \alpha \le 2$ [7, с. 101].

Подставляем выражения (17) и (20) в (15) и после преобразований получаем уравнение, устанавливающее зависимость давления нагнетания от расхода состава, его вязкости и плотности, длины и диаметра шланга, диаметра сопла краскораспылителя:

$$P_к = 165\frac{q_к \rho_к \nu_к L_ш}{\pi d_ш^4} + 132\frac{q_к \rho_к \nu_к}{\pi d_с^3}\left(1 + \frac{0{,}113 q_к}{\pi d_с \nu_к}\right). \quad (22)$$

В первом слагаемом уравнения (22) учитывается влияние параметров шланга, а во втором – сопла. Для графической интерпретации этого уравнения зададим значения входящих в него показателей: плотность состава $\rho_к = 9\cdot10^2$ кг/м^3 (0,9 г/мл); кинематическая вязкость $\nu_к = 4\cdot10^{-4}$ м^2/с (400 мм^2/с); длина шланга $L_ш$= 10 м; его диаметр $d_ш$= 10^{-2} м (10 мм); диаметр сопла$d_с$=$1{,}8\cdot10^{-3}$ м (1,8 мм); диапазон изменения расхода $q_к$ = (2-10)·10^{-6} м^3/с (2-10 мл/с). Результаты расчета, отражающие влияние расхода q состава на потери давления в шланге ($\Delta P_ш$), сопле ($\Delta P_с$) и суммарно ($P_к$), показаны на рисунке 3.

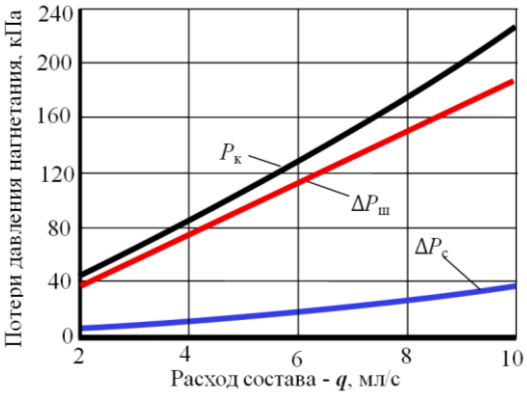


Рисунок 3 – Зависимость потерь давления нагнетания (**$\Delta P_с$**, **$\Delta P_ш$**, **$P_к$**) от расхода (***q***) состава

Из рисунка 3 видно, что при увеличении расхода состава в 5 раз (от 2 до 10 мл/с) суммарные потери давления нагнетания $P_к$ возросли в 5,3 раза (от 43 до 230 кПа). Опережающий темп прироста потерь давления ($\Delta P_с$) в сопле обусловлен наличием слагаемого с квадратичной зависимостью от расхода.

Для установления влияния параметров процесса нагнетания состава на его расход, используем уравнение (22), в котором параметры сгруппируем по показателям степени расхода:

$$P_к = \frac{\rho_к}{\pi}\left(\frac{15}{\pi d_с^4}\right) q_к^2 + \frac{\rho_к}{\pi}\left(\frac{165\nu_к L_ш}{d_ш^4} + \frac{132\nu_к}{d_с^3}\right) q_к,$$

и представим его в виде квадратичного уравнения:

$$\left(\frac{15}{\pi d_с^4}\right) q_к^2 + \nu_к\left(\frac{165 L_ш}{d_ш^4} + \frac{132}{d_с^3}\right) q_к - \frac{\pi P_к}{\rho_к} = 0. \quad (23)$$

Действительным корнем решения квадратичного уравнения (23) является выражение:

$$q_к = \frac{\pi d_с^4}{15}\left(\sqrt{\nu_к^2\left(\frac{82{,}5 L_ш}{d_ш^4} + \frac{66}{d_с^3}\right)^2 + \frac{15}{d_с^4}\cdot\frac{P_к}{\rho_к}} - \nu_к\left(\frac{82{,}5 L_ш}{d_ш^4} + \frac{66}{d_с^3}\right)\right),$$

которое представим в виде, удобном для расчетов:

$$q_к = \pi\left[\sqrt{\nu_к^2\left(5{,}5 L_ш \frac{d_с^4}{d_ш^4} + 4{,}4 d_с\right)^2 + \frac{P_к d_с^4}{15\rho_к}} - \nu_к\left(5{,}5 L_ш \frac{d_с^4}{d_ш^4} + 4{,}4 d_с\right)\right]. \quad (24)$$

Формула (24) устанавливает зависимость расхода $q_к$ (м^3/с) состава от его вязкости $\nu_к$ (м^2/с) и

плотности $\rho_к$ (кг/м^3), от давления нагнетания $P_к$ (Па), диаметра сопла $d_с$ (м), длины $L_ш$ (м) и диаметра $d_ш$(м) шланга. Из анализа зависимости (24) просматривается прямая связь расхода состава только с давлением нагнетания. Степень влияния других параметров уравнения (24) на расход q состава выражена не явно. Для того, чтобы ее раскрыть, были проведены вычисления, результаты которых представлены на рисунке 4 в виде графиков зависимости расхода q состава от давления $P_к$ нагнетания.

График q_1 характеризует расход состава для базовых значений параметров: $L_ш$ = 10 м, $d_ш$ = 10 мм, $d_с$ = 1,8 мм; $\nu_к$ = 400 мм^2/с. При давлении нагнетания $P_к$ = 200 кПа базовый расход состава q_1 = 8,8 мл/с.

График q_2 показывает увеличение расхода при увеличении диаметра сопла относительно базового с 1,8 до 2,5 мм (рост площади сечения в 1,93 раза). При давлении $P_к$ = 200 кПа расход состава повысился до q_2 = 9,9 мл/с, то есть возрос на 12,5 % в сравнении с базовым расходом.

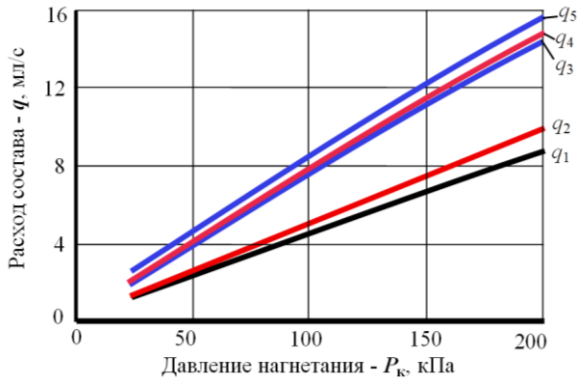


Рисунок 4 – Изменение расхода (***q***)состава в зависимости от давления нагнетания (***P*$_к$**):
q_1 – для базовых значений параметров сопла, шланга и вязкости состава; q_2 – при увеличении площади сечения сопла в 1,93 раза; q_3 – при уменьшении длины шланга в 2 раза; q_4– при увеличении площади сечения шланга в 1,44 раза; q_5 – при уменьшении вязкости состава в 2 раза

График q_3 показывает увеличение расхода при уменьшении длины шланга относительно базовой с 10 до 5 м (в 2 раза). При давлении $P_к$ = 200 кПа расход состава повысился до q_3 = 14,4 мл/с, т.е. возрос на 63,6 % в сравнении с базовым.

График q_4 показывает увеличение расхода при увеличении диаметра шланга относительно базового с 10 до 12 мм (рост площади сечения шланга в 1,44 раза). При давлении $P_к$ = 200 кПа расход состава повысился до q_3 = 14,7 мл/с, то есть возрос на 67 % в сравнении с базовым.

График q_5 показывает увеличение расхода при уменьшении вязкости состава относительно базовой с 400 до 200 мм^2/с (в 2 раза). При давлении $P_к$ = 200 кПа расход состава повысился до q_3 = 15,6 мл/с, то есть возрос на 77,3 % в сравнении с базовым.

Анализ представленных графиков позволил выявить существенный резерв повышения подачи вязких составов на распыление (в 1,67 раза) за счет незначительного (в 1,2 раза) увеличения диаметра шланга.

Заключение. Производительность консервации сельхозмашин зависит от технических возможностей применяемого оборудования и расхода наносимого консервационного состава. При подаче тиксотропного консервационного состава из напорного бака на распыление эффективная вязкость состава понижается из-за механического разрушения образующихся структур в результате увеличения давления нагнетания. Невысыхающие консервационные составы на масляной основе формируют покрытие за счет последующего повышения эффективной вязкости вследствие структурных изменений в нанесенной пленке.

На основе выполненных исследований предложен метод установления тиксотропности составов, получаемых введением присадки в масляную основу. Метод заключается в измерении расхода состава при двух значениях давления нагнетания с последующим расчетом показателя расхода по предлагаемой формуле. Если показатель меньше единицы, то исследуемый состав обладает тиксотропными свойствами и может удерживаться на вертикальных поверхностях. Если показатель больше единицы, то необходимо повысить концентрацию загущающей присадки в масляной основе состава.

Скорректировано уравнение для определения давления нагнетания консервационного состава, учитывающее гидравлическое сопротивление течению состава в шланге подачи и в сопле краскораспылителя. Получена эмпирическая формула для расчета потерь давления в сопле краскораспылителя с учетом влияния вязкости и скоростного напора истекающего состава. Установлена зависимость расхода состава от его вязкости и плотности, от давления нагнетания, диаметра сопла, длины и диаметра шланга. Показано, что при уменьшении длины шланга в 2 раза расход состава увеличивается на 64 %, а при увеличении его диаметра в 1,2 раза – на 67 %.

Список литературы

1. Кузьмин В.Н., Федоренко В.Ф., Мишуров Н.П. и др. Справочник фермера М.: Изд-во «Росинформагротех», 2017. 708 с.
2. Петрашев А.И. Пневматическая установка для нагрева и распыления вязких красок и мастик в условиях АПК // Практика противокоррозионной защиты. 2001. № 4 (22). С. 23-26.
3. Петрашев А.И., Князева Л.Г., Клепиков В.В. Технологические решения по консервации сельскохозяйственной техники отработанными моторными маслами // Труды ГОСНИТИ. 2013. Т. 112. № 2. С. 61-65.
4. Петрашев А.И., Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Ивойлов А.А. Совершенствование навесных средств консервации машин // Техника в сельском хозяйстве. 2008. № 6. С. 49-51.
5. Корякина М.И. Испытания лакокрасочных материалов и покрытий. М.: Химия, 1988. 272 с.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 832 с.
7. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М.: Энергоатомиздат, 1984. 640 с.
8. Петрашев А.И. Распределение гидравлических потерь давления в напорной магистрали при течении консервационной жидкости // Наука в центральной России. 2018. № 2. С. 92-100.
9. Губашева А.М. Разработка технологии консервации тукоразбрасывающих машин с обоснованием параметров агрегата для нанесения защитных составов: автореф. дисс. … канд. техн. наук: 05.20.03 / Губашева Алмагуль Мустафаевна. Мичуринск. 2018. 23 с.
10. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод. М.: Недра, 1991. 331 с.

References

1. Kuz'min V.N., Fedorenko V.F., Mishurov N.P. i dr. Spravochnik fermera. M.: Izd-vo «Rosinformagrotekh», 2017. 708 s.
2. Petrashev A.I. Pnevmaticheskaya ustanovka dlya nagreva i raspyleniya vyazkih krasok i mastik v usloviyah APK // Praktika protivokorrozionnoj zashchity. 2001. № 4 (22). S. 23-26.
3. Petrashev A.I., Knyazeva L.G., Klepikov V.V. Tekhnologicheskie resheniya po konservacii sel'skohozyajstvennoj tekhniki otrabotannymi motornymi maslami // Trudy GOSNITI. 2013. T. 112. № 2. S. 61-65.
4. Petrashev A.I., Prohorenkov V.D., Knyazeva L.G., Ivojlov A.A. Sovershenstvovanie navesnyh sredstv konservacii mashin // Tekhnika v sel'skom hozyajstve. 2008. № 6. S. 49-51.
5. Koryakina M.I. Ispytaniya lakokrasochnyh materialov i pokrytij. M.: Himiya, 1988. 272 s.
6. Lojcyanskij L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza. M.: Nauka, 1973. 832 s.
7. SHterenliht D.V. Gidravlika. M.: Energoatomizdat, 1984. 640 s.
8. Petrashev A.I. Raspredelenie gidravlicheskih poter' davleniya v napornoj magistrali pri techenii konservacionnoj zhidkosti // Nauka v central'noj Rossii. 2018. № 2. S. 92-100.
9. Gubasheva A.M. Razrabotka tekhnologii konservacii tukorazbrasyvayushchih mashin s obosnovaniem parametrov agregata dlya naneseniya zashchitnyh sostavov: avtoref. diss. … kand. tekhn. nauk: 05.20.03 / Gubasheva Almagul' Mustafaevna. Michurinsk. 2018. 23 s.
10. Gejer V.G., Dulin V.S., Zarya A.N. Gidravlika i gidroprivod. M.: Nedra, 1991. 331 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Петрашев Александр Иванович – доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vitin-10.pet@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Petrashev Alexandr – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vitin-10.pet@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 24.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2020

УДК 631.017.3: 621.181
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-93-99

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛО– МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОИСПОЛЬЗУЮЩЕМ КОРМОВАРОЧНОМ КОТЛЕ С САМОРЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ

[1]Шувалов Анатолий Михайлович
[1]Машков Алексей Николаевич
[1]Чернов Денис Серафимович
[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *В настоящее время фермерские и личные подсобные хозяйства (ЛПХ) производят значительную долю мясо – молочной и овощной продукции. При содержании скота и птицы наибольшие энергозатраты возникают при приготовлении для них кормов. Основным способом обработки кормов в ЛПХ и фермерских хозяйствах является энергозатратная тепловая обработка. Существует широкий спектр кормоварочных котлов различных по производительности, конструктивному исполнению, используемых энергоносителей, средств автоматического управления тепловыми процессами. Самым дешевым энергоносителем в тепловых процессах для приготовления кормов является природный газ. В настоящее время серийно выпускаются газоиспользующие варочные котлы для приготовления кормов и пищи. Общим недостатком их является отсуствие автоматики регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку, что приводит к значительному перерасходу природного газа. Следует отметить, что в России на выращивание и переработку сельхозпродукции тратится энергии в 2 – 2,5 раза больше чем в странах Западной Европы. По этой причине в начале 2010 года вступил в силу федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности…». В результате информационно – патентных исследований установлено, что совершенствованием средств автоматики системы энергообеспечения варочных котлов можно достигнуть значительной экономии газа. Для совершенствования средств автоматики, обоснования эффективных режимов работы системы энергообеспечения варочного котла разработана математическая модель, описывающая его теплоэнергетические процессы. Разработано дифференциальное уравнение теплового баланса, позволяющее исследовать процессы в динамических режимах. Приведены формулы для определения полезной теплоты, потерь теплоты на нагрев металлоконстркций котла, с уходящими газами, от химического недожога, от кожуха котла в окружающую среду. Разработанная математическая модель позволяет исследовать режимы работы котла и обосновать параметры эффективной системы его энергообеспечения.*

Ключевые слова: *газ, кормоварочный котел, саморегулирование, мощность, математическая модель.*

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES IN A GAS-USED FEEDING AND COOKING BOILER WITH POWER SELF-REGULATION

[1]Shuvalov Anatoliy
[1]Mashkov Alexey
[1]Chernov Denis
[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Annotation. *Currently, farms and personal subsidiary plots produce a significant share of meat - dairy and vegetable products. When keeping livestock and poultry, the greatest energy consumption occurs during the preparation of feed for them. The main method of processing feed in private household plots and on farms is energy-consuming heat treatment. There is a wide range of feed boiler boilers of various capacities, designs, energy carriers used, and automatic control of thermal processes. The cheapest energy carrier in thermal processes for preparing feed is natural gas. In our country and*

abroad, gas-powered cooking boilers for the preparation of feed and food are serially produced. Their common drawback is the lack of automatic control of gas flow in proportion to the consumed heat flow, which leads to a significant overrun of natural gas. It should be noted that in Russia fuel consumption is 2–2.5 times more than in Western Europe for the production of a unit of gross domestic product. It is no coincidence that at the beginning of 2010 federal law No. 261 "On energy conservation and improving energy efficiency ..." entered into force. As a result of information and patent research, it has been established that by improving the automation equipment of the energy supply system of digesters, significant gas savings can be achieved. To improve automation, justify the effective modes of operation of the energy supply system of the digester, a mathematical model has been developed that describes its heat and energy processes. A differential heat balance equation has been developed that allows one to study processes in dynamic modes. Formulas are given for determining useful heat, heat loss due to heating of metal constructions of the boiler, with flue gases, from chemical underburning, from the boiler casing to the environment. The developed mathematical model allows us to study the modes of operation of the boiler and justify the parameters of an effective system of its energy supply.

Keywords: *gas, feed boiler, self-regulation, power, mathematical model.*

Введение. За прошедшее 30 – летие в сельском хозяйстве были созданы и успешно функционируют фермерские хозяйства. В настоящее время более 70 % мяса, молока, овощей и фруктов производят фермерские и личные подсобные хозяйства (ЛПХ). Производство животноводческой продукции и овощей связано с значительным расходом энергии на приготовление кормов, содержание скота, выращивание овощей в теплицах. Проведённый нами мониторинг по использованию энергетических ресурсов в сельхозпредприятиях различной формы собственности показал (1),что удельная доля затрат на электроэнергию в себестоимости продукции сельхозпредприятия животноводческого направления составляет в растениеводстве – 3,74 %, в животноводстве при производстве: молока 22,32 %, свинины – 11 %, говядины – 8,27 %. Эти цифры подтверждают, что самым энергоёмким производством является животноводство.

График потребления энергии суммарно (рисунок 1), в четырёх районах Тамбовской области (Тамбовский, Рассказовский, Сампурский, Знаменский) по месяцам года показывает, что в зимний период (декабрь, январь, февраль) расход энергии в 4 раза больше, чем летом (июнь, июль). Это подтверждает то, что в зимний период наибольший расход энергии идёт на тепловые цели, то есть заложен огромный потенциал в экономии дорогостоящей электроэнергии за счет самого дешевого энергоносителя - природного газа.

Наиболее эффективно использовать природный газ в тепловых процессах на приготовление кормов кормозапарниками, варочными котлами и другим кормоприготовительным оборудованием, а так же на приготовление пищи и горячей воды.

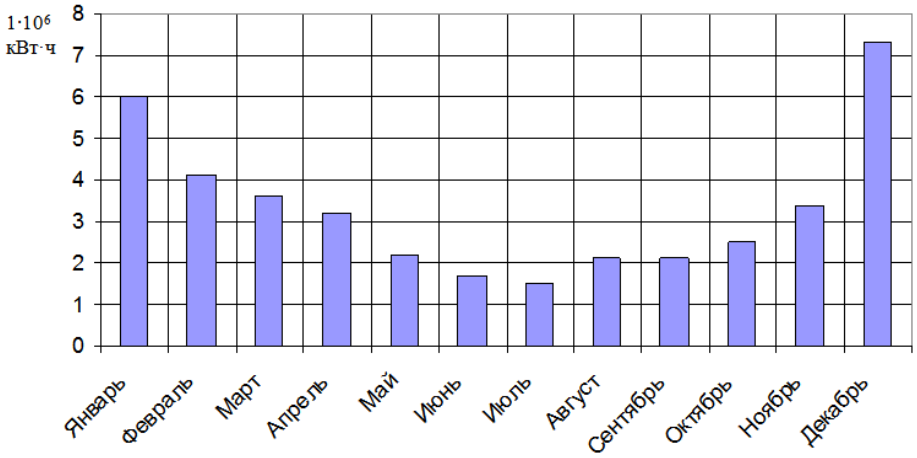


Рисунок 1 - Потребление электроэнергии в четырёх районах Тамбовской области по месяцам года.

Общеизвестно, что в России и в других странах выпускается широкий спектр газоиспользующих варочных котлов для приготовления пищи, горячей воды и кормов. Общим недостатком их является отсутствие автоматики регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку, что приводит к изменению расхода газа. Следует отметить, что в нашей стране на выращивание и переработку сельскохозяйственной продукции тратится энергии в 2-2,5 раза больше, чем в странах Западной Европы. Не случайно в конце 2009г. был опубликован Федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности».

Информационно-патентные исследования показывают, что существующая газовая автоматика применяется в основном для обеспечения безопасности процесса сжигания газовоздушной смеси в газогорелочном устройстве и для обеспечения нормальной работы котла. С точки зрения энергообеспечения варочного котла особенностью его является постепенное снижение потребляемого теплового потока пропорционально повышению температуры нагреваемого продукта в варочной емкости. В существующих варочных котлах предусмотрены средства автоматизации с ступенчатым режимом регулирования мощности («включено-выключено»). Однако при повышении температуры содержимого варочной емкости близко к закипанию продукта, при ступенчатом регулировании значительно увеличивается частота включения и отключения газогорелочного устройства. Такой режим работы газовой горелки снижает надежность работы, происходит повышенный износ средств автоматизации и устройств горелки, а также при частом включении возможен срыв пламени или неправильный розжиг, что может привести к тяжелым последствиям. И конечно, отсутствие плавного регулирования мощности горелки пропорционально потребляемому тепловому потоку сопровождается перерасходом газа. Кроме того для поддержания «тихого» кипения оператор должен дополнительно настраивать вручную топочное устройство, что увеличивает трудозатраты обслуживающего персонала. В этой связи является актуальным проведение научно-исследовательских работы по обоснованию и применению перспективных средств автоматизации газоиспользующей системы энергообеспечения кормоварочного котла с пропорциональным регулированием теплового потока [2].

Цель исследования – Разработать математическую модель, описывающая процессы тепло – массообмена в кормоварочном котле с саморегулированием мощности.

Материалы и методы. Для разработки математической модели применили методы системного анализа и синтеза существующих знаний в области проводимых исследований.

Результаты и их обсуждение. Чтобы теоретически исследовать режимы работы системы энергообеспечения газоиспользующего варочного котла и определить энергетические параметры необходимо разработать математическую модель, описывающая процессы тепло-массообмена.

Весь процесс энергообеспечения кормоварочного котла при нагреве продукта до кипения в варочной ёмкости и последующей его термической обработки описывается математическим выражением

$$dQ_{\text{кк}(1-2)} = dQ_1 + dQ_2 + dQ_3^{'} + dQ_4^{'} + dQ_4^{''} + dQ_5 + dQ_6 + dQ_7,$$

где $dQ_{\text{кк}(1\text{-}2)}$ - энергия газогорелочного устройства, Дж.

Расход энергии на доведение воды до кипения в пароводяном сосуде:

$$dQ_1 = C_{\text{в}} \cdot dt_{\text{в}} \cdot d\,\text{t}_{\text{в}},$$

где $C_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С).

Теплопотери на разогрев металлоконструкций пароводяного сосуда:

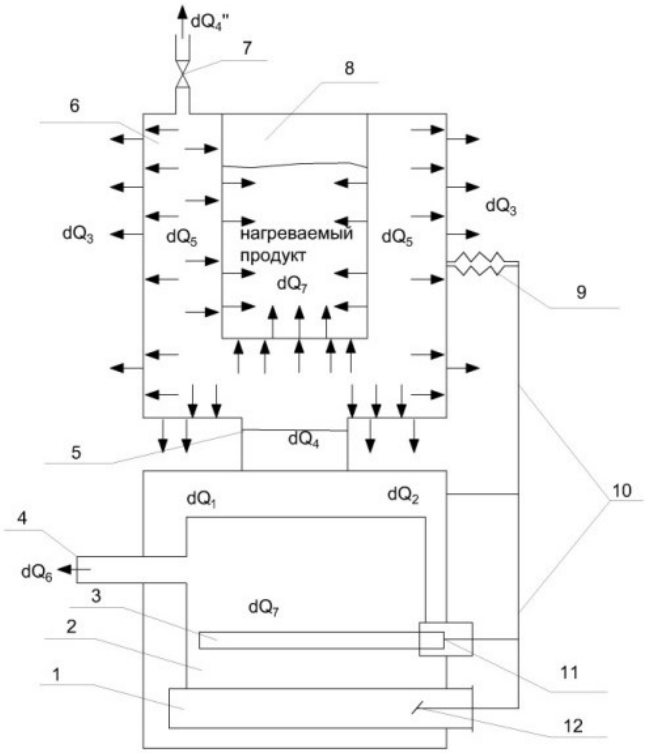
$$dQ_2 = \sum_{i=1}^{n} C_{\text{эi}} \cdot m_{\text{эi}} \cdot dt_{\text{эi}},$$

где $C_{\text{эi}}$ – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·°С); $m_{\text{эi}}$ – масса пароводяного сосуда, кг.

Потерю теплоты от кожуха котла в окружающую среду определим

$$dQ_3^{'} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{\text{эi}} \cdot F_{\text{эi}} \cdot (t_{\text{ср}} - t_{\text{о}}) d\tau,$$

где $\alpha_{\text{эi}}$ – коэффициент теплоотдачи от кожуха окружающему воздуху, Вт/(м^2·°С); $F_{\text{эi}}$ – теплоотдающая поверхность кожуха, м^2; $t_{\text{о}}$ и tср – начальная и конечная температура кожуха, °С.



1 – воздушная камера; 2 – топочное устройство; 3 – газовая горелка; 4 – патрубок для отвода газов; 5 – переходной патрубок; 6 – корпус котла; 7 – продувочный вентиль; 8 – варочная емкость; 9 – сильфон; 10 – система рычагов; 11 – газовый клапан; 12 – воздушная заслонка

Рисунок 2 – Схема к расчету тепло- массообменных процессов кормоварочного котла на газовом топливе

Передача тепла от кипящей воды в паровую рубашку:

$$dQ_4^{'} = \alpha_{\text{зерк}} \cdot F_{\text{зерк}} \cdot (t_{\text{вср}} - t_{\text{оруб}}) d\tau ,$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплоотдачи от воды пароводяного сосуда, Вт/(м^{2}·°С); $F_{\text{зерк}}$ – поверхность воды в пароводяном сосуде, м^{2}; $t_{\text{вср}}=(t_{\text{вн}}+t_{\text{вк}})/2$ – средняя температура воды в пароводяном сосуде, °С, где $t_{\text{вн}}$ – начальная температура воды в водяной камере, °С; $t_{\text{вк}}$– конечная температура воды в водяной камере, °С; $t_{\text{оруб}}$ – температура воздуха в паровой рубашке, °С.

Теплопотери в процессе продувки паровой рубашки:

$$dQ_4^{''} = V_{\text{во}} \cdot \rho_{\text{во}} \cdot C_{\text{во}} \cdot dt_{\text{во}} ,$$

где $V_{\text{во}}$ – обьем, м^{3}; $\rho_{\text{во}}$ – плотность, кг/м^{3}; $C_{\text{во}}$ – удельная теплоемкость продувочного воздуха, Дж/(кг·°С.

Теплота для нагрева металлический частей паровой рубашки:

$$dQ_5 = \sum_{i=1}^{n} C_{1\text{i}} \cdot m_{1\text{i}} \cdot dt_{1\text{iк}} ,$$

где $C_{1\text{i}}$ – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·°С); $m_{1\text{i}}$ – масса металлических частей,кг.

Потери тепла с уходящими газами определяют по формуле[3]:

$$Q_6 = I_{\text{ух}} - I_{\text{х.вз}}$$

$$dQ_6 = \left[V_{\text{г}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot C_{\text{рг}} \left(T_{\text{ух}} - 273\right) - \alpha_{\text{ух}} \cdot V_{\text{вз}} \cdot \rho_{\text{вз}} \cdot C_{\text{рв}} \left(T_{\text{х.вз}} - 273\right)\right] d\tau ,$$

где $V_г$ – объем сгоревшего газа, м^3; $\rho_г$ – плотность отработанных газов, кг/м^3; $C_{рг}$ – теплоёмкость отработанных газов, кВт·ч/кг·К; $T_{ух}$ – температура отработанных газов, К; $\alpha_{ух}$ – коэффициент избытка воздуха; $V_{вз}$ – объем воздуха, поступающего в топку, м^3; $\rho_{вз}$ – плотность воздуха, кг/м^3; $C_{рв}$ – средняя теплоемкость воздуха, кВт·ч/кг·К; $T_{х.вз}$ – температура воздуха поступающего в топку, К.

Воздух, поступающий в топку котла, частично не успевает вступить в процесс горения. Поэтому для обеспечения полного сгорания топлива необходимо подвести к нему несколько большее количество воздуха, чем это требуется теоретически [4], которое учитывается коэффициентом избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{V_д}{V_о},$$

Расход газа на нагрев корма до кипения:

$$V_г = \frac{c_в \cdot M_в \cdot (T_{кип} - T_{нач})}{Q_н^р \cdot \eta}, \text{ м}^3$$

Чтобы поддерживать оптимальное соотношение горючей смеси необходимо регулировать подачу воздуха и газа:

$$dV_в = \frac{V_в^Д \cdot dV_г}{V_в^0}, \text{ м}^3$$

В процессе горения газа в топке выделится теплота:

$$dQ = dQ_н^р \cdot dV_г$$

Выделившаяся теплота нагревает воду в пароводяном сосуде до кипения. В результате образуется пар:

$$dm_п = \frac{dQ - \sum Q_{пот}}{r},$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; $Q_{пот}$ – суммарные теплопотери кормоварочного котла,Дж.

Сконденсирующий пар в паровой рубашке определится:

$$dm_с = (k \cdot F_{ве}(T_п - T_в) + \sum Q_{пот})\frac{d\tau}{r}, \text{ кг}$$

где k – коэффициент теплопередачи, который определяется по формуле:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{пс}} + \frac{1}{\alpha_{сс}}\right)}$$

где δ – толщина стенки; λ – теплопроводность материала из которого она изготовлена, $\alpha_{пс}$ – коэффициент теплоотдачи от пара в парогенераторе стенке варочной емкости; $\alpha_{сс}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки к содержимому варочной емкости.

Температура, до которой нагреется содержимое в варочной емкости, определится из выражения:

$$dT_в = \frac{k \cdot F_{ве}(T_п - T_в)}{c_в \cdot m_в} d\tau, \text{ К}$$

где $F_{ве}$ – площадь поверхности стенок варочной емкости.

Если масса пара вырабатываемая топочным устройством с пароводяной рубашкой превысит величину сконденсирующего пара, то образуется избыток пара.

Масса несконденсированного пара изменяется следующим образом:

$$dm_н = dm_п - dm_с, \text{ кг.}$$

Давление пара в парогенераторе определяется [5]:

$$P_{\text{п}} = n \cdot k_{\text{Б}} \cdot T_{\text{п}}, \text{ Па}$$

где $k_{\text{Б}}$ – постоянная Больцмана, n – концентрация молекул воды в паровом пространстве, м$^{-3}$.

Избыточное давление пара с помощью сильфона передаётся на воздушную заслонку и блок-кран газогорелочного устройства, управляющий подачей газа. Все это приводит к уменьшению количества поступающей топливовоздушной смеси и снижению тепловой производительности топки.

Обобщая выше изложенное и представляя уравнение в канонической форме получаем математическую модель, описывающую энергетические и тепло-массообменные процессы кормоварочного котла с саморегулированием мощности.

$$V_{\text{г}} = \frac{c_{\text{в}} \cdot M_{\text{в}} \cdot (T_{\text{кип}} - T_{\text{нач}})}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta}$$

$$dV_{\text{г}} = G_{\text{г}} \cdot d\tau$$

$$dV_{\text{в}} = \frac{\alpha \cdot V_{\text{г}}^{0} \cdot dV_{\text{г}}}{V_{\text{г}}}$$

$$dQ = dQ_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot dV_{\text{г}}$$

$$dm_{\text{п}} = \frac{dQ - \sum Q_{\text{пот}})}{r}$$

$$dm_{\text{с}} = (k \cdot F_{\text{ве}}(T_{\text{п}} - T_{\text{в}}) + \sum Q_{\text{пот}})\frac{d\tau}{r}$$

$$dT_{\text{в}} = \frac{(k \cdot F_{\text{ве}}(T_{\text{п}} - T_{\text{в}})}{c_{\text{в}} \cdot m_{\text{в}}} d\tau$$

$$dm_{\text{н}} = dm_{\text{п}} - dm_{\text{с}}$$

$$dQ_{\text{j}} = (\sum Q_{\text{пот}} + k \cdot F_{\text{ве}} \cdot (T_{\text{п}} - T_{\text{в}}))d\tau$$

Выводы: разработанная математическая модель теплоэнергетических процессов газоиспользующего кормоварочного котла с саморегулированием мощности позволяет установить закономерности изменения энергетических и режимных параметров.

Список литературы

1. Шувалов А.М., Калинин В.Ф., Набатов К.А. Мониторинг энергопотребления сельхозпредприятий Тамбовской области // Труды 6-й Международной конференции. Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. –М., ГНУ ВИЭСХ. – 2008. - С.260 - 265.

2. Пат. №2708097 РФ МПК A47J 27/06. Котёл кормоварочный. / Шувалов А.М., Машков А.Н., Чернов Д.С.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. - №201420554/13, №2019116589, заяв. 29.05.2019; опубл. 04.12.2019. Бюл. №34.

3. Панин В.И. Котельные установки малой и средней мощности. – М.:Стройиздат,1975. – 384с.

4. Хазмалян Д.М. Теория топочных процессов.- М.: Энергоатомиздат, 1990.- 352с.

5. ЩукинА.А, Сушкин И.Н. Теплотехника. –М.: Металлургия, 1973.- 482с

References

1. SHuvalov A.M., Kalinin V.F., Nabatov K.A. Monitoring energopotrebleniya sel'hozpredpriyatij Tambovskoj oblasti // Trudy 6-j Mezhdunarodnoj konferencii. Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom hozyajstve. –M., GNU VIESKH. – 2008. - S.260 -265.

2. Pat. №2708097 RF MPK A47J 27/06. Kotyol kormovarochnyj. / SHuvalov A.M., Mashkov A.N., CHernov D.S.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBNU VNIITiN. - №201420554/13, №2019116589, zayav. 29.05.2019; opubl. 04.12.2019. Byul. №34.

3. Panin V.I. Kotel'nye ustanovki maloj i srednej moshchnosti. – M.:Strojizdat,1975. – 384s.

4. Hazmalyan D.M. Teoriya topochnyh processov.- M.: Energoatomizdat, 1990.- 352s.

5. SHCHukinA.A, Sushkin I.N. Teplotekhnika. –M.: Metallurgiya, 1973.- 482s

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Шувалов Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniiti@mail.ru.

Машков Алексей Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniiti@mail.ru.

Чернов Денис Серафимович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vniiti@mail.ru.

Author credentials
Affiliations

Shuvalov Anatoliy – Full Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniiti@mail.ru.

Mashkov Alexey – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniiti@mail.ru.

Chernov Denis – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: vniiti@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 14.02.2020 Принята к публикации (Accepted): 20.03.2020

УДК 621.899
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-99-104

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И ХАРАКТЕРИСТИК МОТОРНОГО МАСЛА НА ИЗМЕНЕНИЕ ЕГО СВОЙСТВ В ДВС И СРОК СЛУЖБЫ

[1]Остриков Валерий Васильевич
[1]Нагдаев Владимир Константинович
[1]Забродская Алла Владимировна
[1]Кошелев Александр Викторович

[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *В процессе работы двигателей тракторов в моторных маслах в зависимости от свойств используемого дизельного топлива и качества масла происходит накопление загрязнений, способствующих снижению эксплуатационных характеристик двигателя и срока службы масла до замены. Установлено, что изменение свойств масла также связано с техническим состоянием двигателя и сроком его эксплуатации. Получены зависимости изменения содержания загрязненности и щелочного числа моторного масла в двигателе Д-245 первого года эксплуатации и после 5 лет работы при условии высокого качества используемого дизельного топлива и смазочного масла. Определено, что за период наработки 250 часов содержание загрязнений в масле нового двигателя имело значение на 20 % ниже, чем после 5 лет эксплуатации. Аналогично изменялось щелочное число масла, свидетельствующее об остаточном содержании присадок в масле. В результате исследований по оценке влияния качества дизельного топлива на изменение загрязненности масла установлено, что топливо, имеющее отклонения от требований стандартов, снижает срок службы масла до замены более чем на 20 %. При использовании в двигателях тракторов моторных масел, имеющих отклонения от нормативных значений, установлен рост загрязнений уже в первые 50 часов работы двигателей и первого года эксплуатации и после 5 лет работы. При этом уже к 150 часам наработки содержание*

загрязнений в масле и его щелочное число имели значения, близкие к браковочным. В целом по результатам исследований можно утверждать, что качество используемого дизельного топлива и моторного масла значительно влияют на его срок службы до замены. Срок службы масла также значительно зависит и от срока службы машины, ее технического состояния. При этом определяющим фактором, влияющим на срок службы масла до его замены, является качество используемого моторного масла.

***Ключевые слова**: моторное масло, дизельное топливо, качество, загрязненность, двигатель, щелочное число, наработка, эксплуатация.*

ASSESSMENT OF INFLUENCE OF QUALITY OF DIESEL FUEL AND CHARACTERISTICS OF MOTOR OIL ON CHANGE OF ITS PROPERTIES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES AND SERVICE LIFE

[1]Ostrikov Valery
[1]Nagdaev Vladimir
[1]Zabrodskaya Alla
[1]Koshelev Alexander
[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

***Abstract.** The accumulation of contaminants that contribute to the reduction of engine performance and oil life before replacement occurs during the operation of tractor engines in engine oils, depending on the properties of the diesel fuel used and the quality of the oil. It is established that the change in the properties of oil is also associated with the technical condition of the engine and its life. The dependences of changes in the pollution content and alkaline number of motor oil in the D-245 engine of the first year of operation and after 5 years of operation, provided that the diesel fuel and lubricating oil are of high quality, were obtained. It was determined that the content of contaminants in the oil of the new engine for a running time of 250 hours was 20% lower than after 5 years of operation. The alkaline number of oil, indicating the residual content of additives in the oil, changed similarly. As a result of studies evaluating the effect of diesel fuel quality on the change in oil pollution, it was found that fuel that deviates from the requirements of the standards reduces the life of the oil before replacement by more than 20%. When using motor oils in tractor engines with deviations from standard values, an increase in pollution was established already in the first 50 hours of engine operation and the first year of operation and after 5 years of operation. The content of contaminants in the oil and its alkaline number had values close to rejects already by 150 hours of operation in this case. t can be argued on the basis of research results that the quality of the diesel fuel and motor oil used significantly affect its service life before replacement. The service life of the oil also greatly depends on the service life of the machine, its technical condition.At the same time, the quality of the engine oil used is a determining factor affecting the life of the oil before it is replaced.*

***Keywords**: engine oil, diesel fuel, quality, pollution, engine, alkaline number, operating time, operation.*

Введение. Накопление продуктов старения в работающем моторном масле зависит от многих факторов, в том числе от наработки, технического состояния двигателя, качественного состава и свойств, используемых топлива и смазочного материала [1,2].

Практически все перечисленные факторы являются управляемыми, однако в условиях реальной эксплуатации не всегда представляется возможным управлять всеми факторами одновременно [3, 4]. Особенно следует выделить влияние качества дизельного топлива и моторного масла на интенсивность образования смол, асфальтенов, продуктов старения в маслах.

По мере их накопления ухудшаются не только эксплуатационные характеристики двигателя, но увеличивается износ основных деталей цилиндропоршневой группы [5, 6].

Результаты и их обсуждение. На основании проведенных исследований установлено, что в двигателе первого года эксплуатации и в двигателе, имеющем значительную степень износа, работающих при одних и тех же условиях на качественном топливе и моторном масле М-10ДМ, накопление продуктов старения и загрязнений в масле происходит по-разному.

На рисунке 1 представлена зависимость изменения содержания нерастворенного осадка и щелочного числа в масле за период наработки 250 часов в двигателях с различной степенью износа и технического состояния

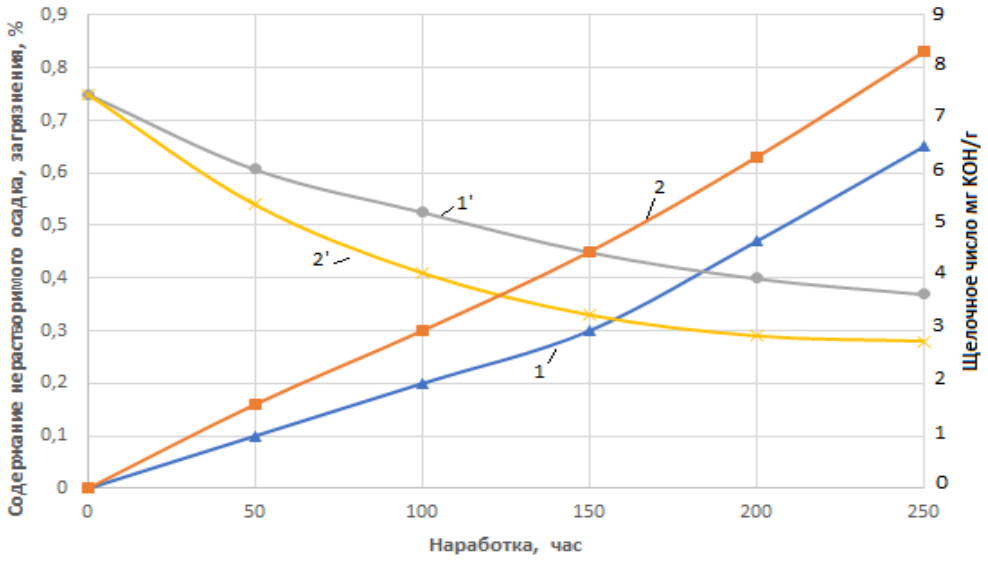


Рисунок 1 – Зависимость изменения содержания загрязненности (1, 2) и щелочного числа моторного масла (1′, 2′) от наработки: 1, 1′ - двигатель Д-245 первого года эксплуатации; 2, 2′ – двигатель после 5 лет эксплуатации

В результате исследований установлено, что за период наработки 250 часов в «новом» двигателе содержание загрязнений в масле составляло 0,65%, в двигателе после 5 лет эксплуатации превышало 0,85%. Аналогично снижалось и содержание присадок в масле, оцениваемое по щелочному числу (линии 1′, 2′). В двигателе первого года эксплуатации щелочное число составляло 3,5 мг КОН/г и 2,7 мг КОН/г в двигателе, имеющем длительный срок использования.

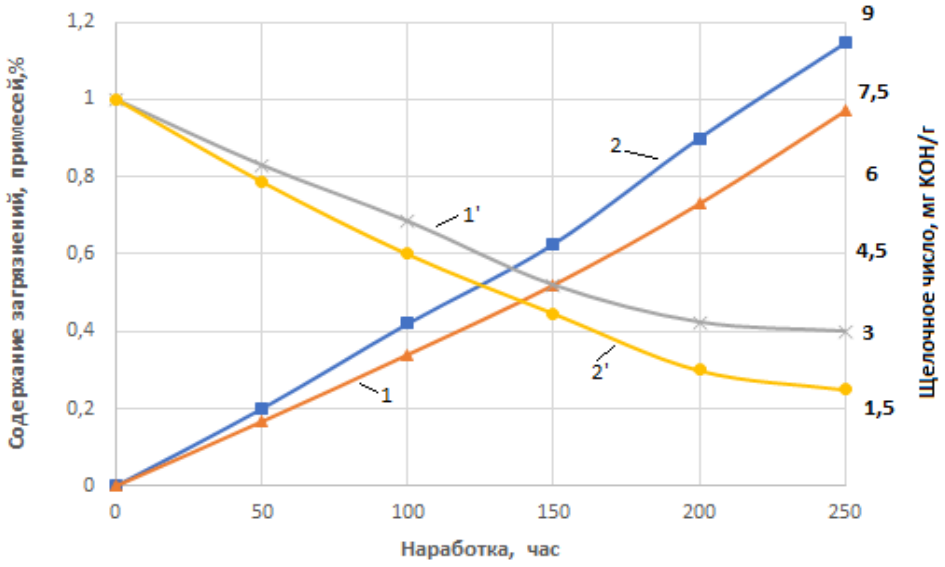


Рисунок 2 – Зависимость изменения содержания загрязнений (1, 2) и щелочного числа моторного масла (1′, 2′) от наработки при использовании топлив утяжеленного фракционного состава с повышенным содержанием серы: 1,1′ - двигатель Д-245 первого года эксплуатации; 2,2 ′– двигатель после 5 лет эксплуатации

На следующем этапе исследования определялось изменение тех же показателей при работе на дизельном топливе утяжеленного фракционного состава с повышенным содержанием серы и фактических смол с отклонением от требования ГОСТ 32511-2013 на 10…20%.

Определено, что при использовании дизельных топлив утяжеленного фракционного состава, содержание загрязнений в масле (рисунок 2, линии 1, 2) увеличивается по сравнению с использованием топлив, соответствующих ГОСТ. При этом в двигателе со значительным сроком эксплуатации содержание загрязнений в масле больше, что подтверждает закономерность влияния технического состояния двигателя, срок его эксплуатации на срок службы моторного масла до замены. Данные факты подтверждает и зависимость изменения щелочного числа масла (линии 1′, 2′), одного из показателей, характеризующего интенсивность срабатывания присадок.

Далее рассматривалось влияние качества моторного масла на срок его службы до замены. В ходе проведения исследования анализировались закономерности изменения свойств моторного масла М-10ДМ в двигателе первого года эксплуатации и двигателя трактора после 5 - ти лет эксплуатации с повышенным расходом топлива и пониженным давлением в системе смазки (2-2,5 кгс/см^2) и компрессией в цилиндрах на 15 % отличающейся от нормативного значения.

На рисунке 3 представлена зависимость изменения свойств масла от его исходных характеристик. В двигатели заливалось масло М-10ДМ, соответствующее требованиям ГОСТ 8581-78 и масло с щелочным числом 5,1 мг КОН/г, т.е. имеющее отклонения от нормативных значений.

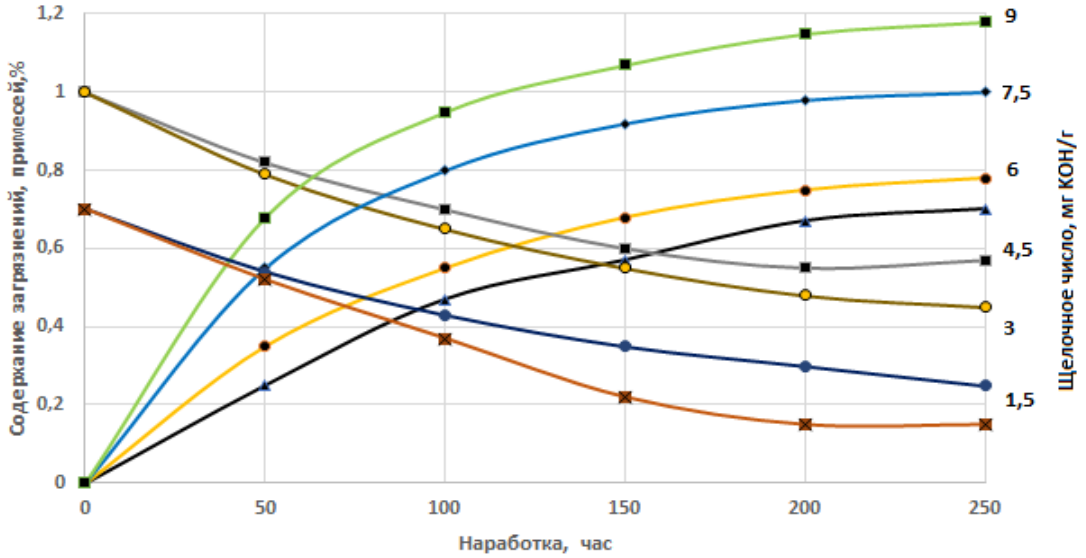


Рисунок 3 - Зависимости изменения физико-химических характеристик масла от наработки и качества используемого моторного масла: 1- изменение щелочного числа масла в двигателе первого года эксплуатации; 2- изменение щелочного числа масла в двигателе 5-ти лет эксплуатации; 3- изменение щелочного числа масла с отклонениями от требований стандартов (новый трактор); 4- изменение щелочного числа масла с отклонениями от требований стандартов (трактор после 5-ти лет эксплуатации); 1′, 2′, 3′, 4′ - изменения загрязненности моторного масла (при тех же условиях).

В результате анализа установлено, что процесс образования загрязнений и изменения щелочного числа в большой степени зависят от качества используемого моторного масла. При этом определено, что уже к 150 – 170 часам наработки щелочное число масла и у трактора с новым двигателем и у трактора, ранее эксплуатирующегося, имело браковочное значение (линии 3, 4). Аналогично изменялось и содержание загрязнений в моторном масле (линии 3′, 4′) .

Выводы. На основании проведенных исследований установлено, что наибольшее влияние на образование загрязнений в моторном масле оказывает качество дизельного топлива и используемого

моторного масла. Изменение щелочного числа в большей степени характеризуется составом и физико-химическими свойствами исходного заправленного в двигатель моторного масла.

Список литературы

1. Арабян С.Г., Виппер А.Б., Холомонов И.А. Масла и присадки для тракторных и комбайновых двигателей. М.: Машиностроение. 1984. 207 с.

2. Аллилуев В.А. Техническая эксплуатация машинно-тракторного парка. Москва: Агропромиздат. 1991. 367 с.

3. Григорьев М.А. Очистка масла и топлива в двигателях внутреннего сгорания. М.: Машиностроение. 1970. 217 с.

4. Соколов А.И. Изменение качества масла и долговечность автомобильных двигателей. Томск: Томский университет. 1976. 120 с.

5. Чиченадзе А.В. Практическая трибология (мировой опыт). М.: Центр «Наука и техника». 1994. 249 с.

6. Остриков В.В., Клейменов О.А., Тупотилов Н.Н., Шелохвостов В.П. и др. Повышение эффективности использования смазочных материалов в узлах и агрегатах сельскохозяйственной техники (анализ, теория, исследования и практика). Воронеж: «Истоки». 2008. 160 с.

References

1. Arabyan S.G., Vipper A.B., Holomonov I.A. Masla i prisadki dlya traktornyh i kombajnovyh dvigatelej. M.: Mashinostroenie. 1984. 207 s.

2. Alliluev V.A. Tekhnicheskaya ekspluataciya mashinno-traktornogo parka. Moskva: Agropromizdat. 1991. 367 s.

3. Grigor'ev M.A. Ochistka masla i topliva v dvigatelyah vnutrennego sgoraniya. M.: Mashinostroenie. 1970. 217 s.

4. Sokolov A.I. Izmenenie kachestva masla i dolgovechnost' avtomobil'nyh dvigatelej. Tomsk: Tomskij universitet. 1976. 120 s.

5. CHichenadze A.V. Prakticheskaya tribologiya (mirovoj opyt). M.: Centr «Nauka i tekhnika». 1994. 249 s.

6. Ostrikov V.V., Klejmenov O.A., Tupotilov N.N., SHelohvostov V.P. i dr. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya smazochnyh materialov v uzlah i agregatah sel'skohozyajstvennoj tekhniki (analiz, teoriya, issledovaniya i praktika). Voronezh: «Istoki». 2008. 160 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Остриков Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Нагдаев Владимир Константинович – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Забродская Алла Владимировна – научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Кошелев Александр Викторович – инженер-исследователь Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Author credentials

Affiliations

Ostrikov Valery – Full Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Nagdaev Vladimir – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Zabrodskaya Alla – Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Koshelev Alexander – Research Engineer of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Поступила в редакцию (Received): 06.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 10.04.2020

УДК 621.899:539.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-104-111

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК МАСЕЛ МЕТОДОМ СИНХРОННОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

[1]Нагдаев Владимир Константинович
[1]Жерновников Дмитрий Николаевич
[1]Остриков Валерий Васильевич
[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Методом синхронного термического анализа определялся угар товарного и отработанного моторного масла М-10 Г2 при нагреве до 300^{0}С. Измерения проводились на термографе модели NETZCH – 449F1 Jupiter. Термическое разложение товарного и отработанного масел начинается выше 220^{0}С. Очищенное отработанное масло имеет достаточно высокую устойчивость к термическому разложению в интервале температур от 40 до 140 ^{0}С. После 140 ^{0}С начинается термическое разложение масла, вызванное остаточным содержанием изопропилового спирта после очистки. При температуре 300^{0}С наиболее термически устойчивы к угару товарное и отработанное масла (потеря массы около 10%). Очищенное отработанное масло при нагреве теряет около 20%. Изменения теплового потока у образцов товарного и отработанного масла идентичны – от 30 до 90^{0}С происходит поглощение тепла около 0,1 мкВт/мг, а с 90 до 150^{0}С незначительное выделение тепла. У очищенного отработанного масла эффект поглощения тепла меньше, чем у товарного и отработанного масел на 0,2 мкВт/мг.Содержание воды и углеродной составляющей (сажи) определялось при нагреве образца масла до 800^0 С на воздухе со скоростью нагрева 10^0 С/мин. При нагреве товарного масла установлено, что в интервале температур 40 – 160^{0}С происходит удаление воды (эндотермическая реакция). От 160 до 450^{0}С протекает пять экзотермических реакций разложения масла и происходит значительная потеря массы образца – 92%. В интервале от 450 до 600^{0}С протекает реакция окисление углеродной составляющей моторного масла. Результаты исследований показали, что очищенное отработанное масло можно использовать как базовый компонент при разработке состава обкаточного и промывочного масел для тракторных двигателей.*

Ключевые слова: *масла моторные товарные, отработанные, очищенные отработанные, обкаточные, промывочные, синхронный термический анализ, угар масла, содержание воды и сажи.*

RESULTS OF RESEARCHES OF PROPERTIES AND CHARACTERISTICS OF OILS BY THE METHOD OF SYNCHRONOUS THERMAL ANALYSIS

[1]Nagdaev Vladimir
[1]Zhernovnikov Dmitry
[1]Ostrikov Valery
[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract. *The fumes of marketable and used engine oil M-10 G_2 when heated to 300 ^{0}C were determined by synchronous thermal analysis. Measurements were carried out on a thermograph model NETZCH – 449F1 Jupiter. The thermal decomposition of commercial and waste oils begins above 220^{0}C.Refined waste oil has a fairly high resistance to thermal decomposition in the temperature range from 40 to 140 ^{0}C.Thermal decomposition of oil caused by the residual content of isopropyl alcohol after cleaning begins after 140 ^{0}C. Commodity and waste oil (weight loss of about 10%) are most thermally resistant to fumes at a temperature of 300^{0}C.Refined waste oil loses about 20% when heated.The changes in the heat flux in the samples of commercial and waste oil are identical - from 30 to 90^{0}C, heat is absorbed at about 0.1 μW /mg, and from 90 to 150^{0}C there is a slight heat release.The heat absorption effect of the refined waste oil is less than 0.2 μW / mg for commercial and waste oils.The water content and the carbon component (soot) were determined by heating the oil sample to 800^{0}C in air with a heating rate of 10^0 C / min.It was established that water removal occurs (endothermic reaction) in the temperature range of 40 - 160^{0}C when heating commercial oil.Five exothermic reactions of oil decomposition proceeds from 160 to 450^{0}C and there is a significant loss in sample weight - 92%.The oxidation reaction of the carbon component of engine oil proceeds in the range from 450 to 600^{0}C. The research results showed that refined used oil can be used as a basic component in the development of the composition of break-in and flushing oils for tractor engines.*

Keywords: *commercial motor oils, used, refined used, break-in, flushing, synchronous thermal analysis, oil burn, water and soot content.*

Введение. В процессе работы двигателя внутреннего сгорания под действием высоких температур происходит, так называемое, «угорание» моторного масла. На этот естественный процесс влияет техническое состояние ДВС и свойства исходного моторного масла.

Свойства основы моторного масла и состав присадок преимущественно определяют его стойкость к угару [1]. Более интенсивно угорает масляная основа с более высокой вязкостью из-за формирования на нагретых поверхностях более «толстых» пленок.

Срабатывание присадок в моторных маслах ухудшает отвод тепла от нагретых поверхностей двигателя. Механохимические процессы, происходящие в масле, ухудшают его трибологические свойства [2]. Поэтому актуальным является изучение изменение веса масла (угар) и тепла по мере повышении температуры моторного масла.

С развитием технологий при производстве смазочных материалов, а также конструкции двигателей увеличился срок службы моторных масел. Увеличение интервала замены масла приводит к увеличению содержания загрязнений в масле. Для дизельных двигателей на первый план выходит содержание продуктов неполного сгорания топлива, в частности сажи и воды. Своевременный мониторинг содержания сажи и воды в моторном масле является необходимым условием для бесперебойной работы дизельного двигателя.

Существующие технологии производства моторных масел сегодня, основанные на дорогостоящих и ограниченных ресурсах, таких как нефтяные базовые масла и присадки, энергоемки и высоко затратны [3].

Отработанные моторные масла, представляющие собой продукты, требующие утилизацию, тем не менее содержат остаточный запас присадок и загрязненную масляную основу, которые при определенных условиях могут быть вторично использованы, например, при производстве промывочных и обкаточных масел [4].

Материалы и методы. Метод синхронного термического анализа (СТА) изучает физико-химические и структурные превращения, происходящие в веществе при изменении его температуры [5,6]. При выполнении СТА образцов масла получают кривые термо-гравиметрии (ТГ – изменение веса образца)и кривые дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК – изменение теплового потока) [7, 8].

Измерения проводились на термографе модели NETZCH – 449F1 Jupiter при температуре 40 -800^{0}C, скорости нагрева – 10 ^{0}C/мин, навеске масла 25-30 мг. В качестве рабочей среды использовали поток воздуха 30 мл/мин, аргона – 20 мл/мин, тигли из оксида алюминия (при нагреве образца до 800^{0}C) и платины (при нагреве до 300 ^{0}C).

Для очистки отработанных моторных масел использовали методику, описанную в работе [9].

Результаты и их обсуждение. Анализ полученных зависимостей позволяет говорить о термической устойчивости к угару образцов товарного и отработанного минерального масла М-10$Г_{2к}$ (рисунок 1, кривые 1 и 2), так как они меньше всего теряют массу (потеря составляет около 20%). Эти масла меньше всего подвержены угару в процессе обкатки двигателя трактора.

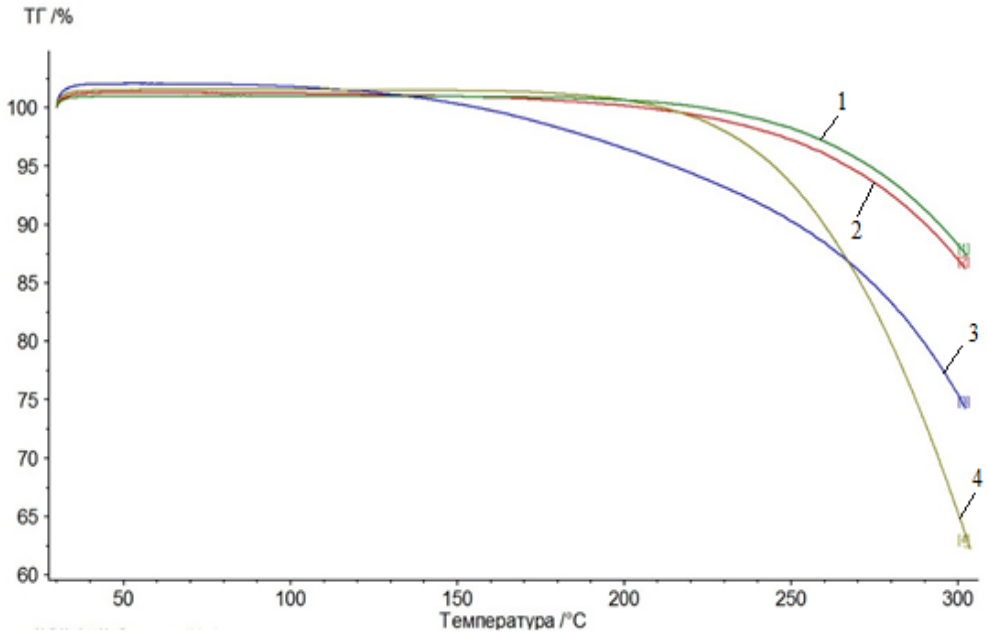


Рисунок 1 – Кривые ТГ исследуемых моторных масел.
Изменение веса (%) проб масла М-10$Г_{2К}$: 1 – товарного; 2 – отработанного; 3 – очищенного отработанного и товарного обкаточного масла John Deere (4).

При температуре выше 220^{0}С можно говорить о термическом разложении образцов. Лучший результат показало товарное моторное масло М-10$Г_{2К}$, потеря веса у образца которого составила 12%. Анализ кривых ТГ, свидетельствует об их схожести для очищенного отработанного М-10$Г_{2К}$; (образец № 3) и для других исследованных образцов масел (образцы №1, №2, №4) при нагреве до 140^{0}С. При дальнейшем увеличении температуры начинается термическое разложение масла №3, вероятнее всего спровоцированное остаточным содержанием изопропилового спирта, используемого для очистки масла.

Анализ термо-гравиметрии образца товарного обкаточного масла фирмы John Deerene (образец № 4), показал, что при нагреве до 220^{0}С, образец товарного обкаточного масла фирмы John Deerene не уступает товарному и отработанному маслу М-10$Г_{2К}$, но дальнейшее повышение температуры вызывает интенсивную потерю веса образца. Определенная после окончания эксперимента величина угара масла (> 35% массы) соответствовала худшему результату. Полученные результаты представляют большой интерес, так как обработка поверхностей трения в условиях ремонтных мастерских АПК, как правило, не отличается высоким качеством, поэтому после ремонта при приработке температура масляной пленки на поверхностях трения с повышенной шероховатостью может кратковременно повышаться до температуры 230 - 300^{0}С.

Высокая устойчивость очищенного отработанного моторного масла М-10$Г_{2К}$ (образец №3) к термическому разложению при температурах 20 - 140^{0}С, позволяет говорить о его пригодности в качестве базовой основы обкаточного масла, потому что для температуры в картере двигателя во время обкатки характерны значения 70-80^{0}С, а наибольшую температуру масляной пленки (140-150^{0}С) вблизи камеры сгорания наблюдают на стенках гильзы цилиндров.

Для начального периода обкатки характерны повышенные температуры в зонах трения, поэтому для обкаточного масла важна способность к охлаждению трущихся деталей. Влияние температуры нагрева на тепловой поток проб масел отображено на рисунке 2.

Анализ полученных зависимостей показал, что наибольший эффект поглощения тепла показывает товарное обкаточное масло John Deere (рисунок 2, кривая 4), нагревание пробы этого масла приводит к поглощению тепла (0 до 0,9 мкВт/мг). Идентична картина изменения теплового потока у образцов товарного (кривая №1) и отработанного моторного масел М-10$Г_{2К}$ (кривая № 2).

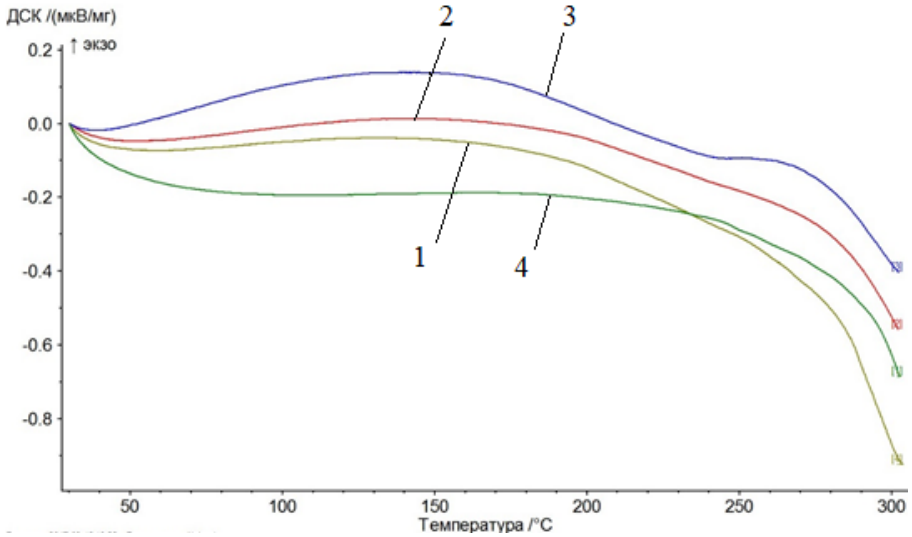


Рисунок 2 – Зависимость от температуры нагрева теплового потока образцов масла М-10$Г_{2К}$ (мкВт/мг): 1 – товарного; 2 - отработанного; 3 – очищенного моноэтанолом с изопропанолом; и образцов товарного обкаточного масла JohnDeere (4).

Тепло (около 0,1 мкВт/мг) поглощается при температуре в интервале 30 - 90^{0}С, в интервале температур 90 - 150^{0}С тепло незначительно выделяется, при дальнейшем повышении температуры вновь происходит поглощение тепла, только более интенсивное.

Анализ изменения теплового потока у очищенного отработанного моторного масла М-10$Г_{2К}$ (кривая 3), показывает несколько меньший эффект поглощения тепла, чем у отработанного (кривая 2) и товарного (кривая 1) масла М-10$Г_{2К}$. При температурах в диапазоне 30 - 150^{0}С тепло выделяется (около 0,1 мкВт/мг), а при дальнейшем с росте температуры происходит поглощение тепла (0,4 мкВт/мг).

В целом проведенные исследования свидетельствуют о пригодности очищенного отработанного масла (образец № 3) к использованию базовым компонентом в составе обкаточного масла для дизельных двигателей.

Важным элементом процесса очистки ДВС, являющийся бесспорным, является удаление из системы смазки сажи и воды. Для снижения влияния загрязнений системы смазки на эксплуатационные характеристики двигателя предусмотрена его промывка при проведении операции технического обслуживания специальными промывочными маслами. СТА анализ, при программированном нагреве образца, позволяет определить содержание воды и углеродистых структур, а также температуры их окисления в сложной системе масло-сажа. Содержание воды определяется по потере веса образца масла в диапазоне температур от 50 до 180^{0}С. Расчет содержания сажи проводится по потере веса образца в интервале температур 450 – 700^{0}С.

Изменение веса и теплового потока товарного моторного масла указывает на сложный состав масла: при 98^{0}С протекает эндотермическая реакция (с поглощением тепла) удаления воды из масла (рисунок 3). При температурах 200 ^{0}С - 450^{0}С протекает пять экзотермических реакций, при этом происходит значительная потеря массы образца – 92%. От 450 до 600^{0}С наблюдается два экзотермических пика которые соответствуют реакциям окисления углеродных составляющих моторного масла. Следует отметить, что окисление углерода происходит в две стадии – при 480 и 537^{0}С. Другими словами в моторном масле две модификации углеродной составляющей. Приблизительное содержание углеродной составляющей моторного масла – 4,94%.

Очищенное отработанное моторное масло М-10$Г_{2К}$ имеет упрощенный состав с учетом ДСК кривой: эндотермический пик удаления воды (98 ^{0}С, содержание воды около 3,5%), экзотермический пик (334^{0}С) и экзотермический окисления углеродной составляющей (497^{0}С) Содержание сажи составляет около 8%. Наибольшее уменьшение веса пробы масла происходит в интервале температур от 200 до 400^{0}С – 88% (рисунок 4).

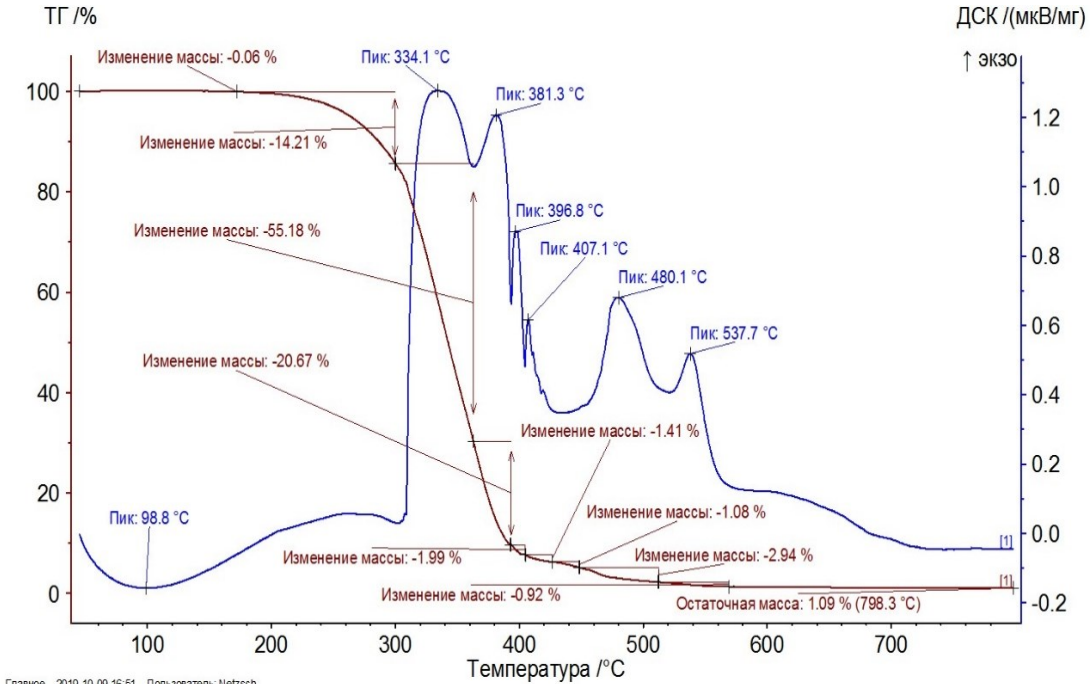


Рисунок 3 – Изменение веса и теплового потока товарного моторного масла М-10$Г_{2К}$ при нагревании образца до 800^{0}С на воздухе.

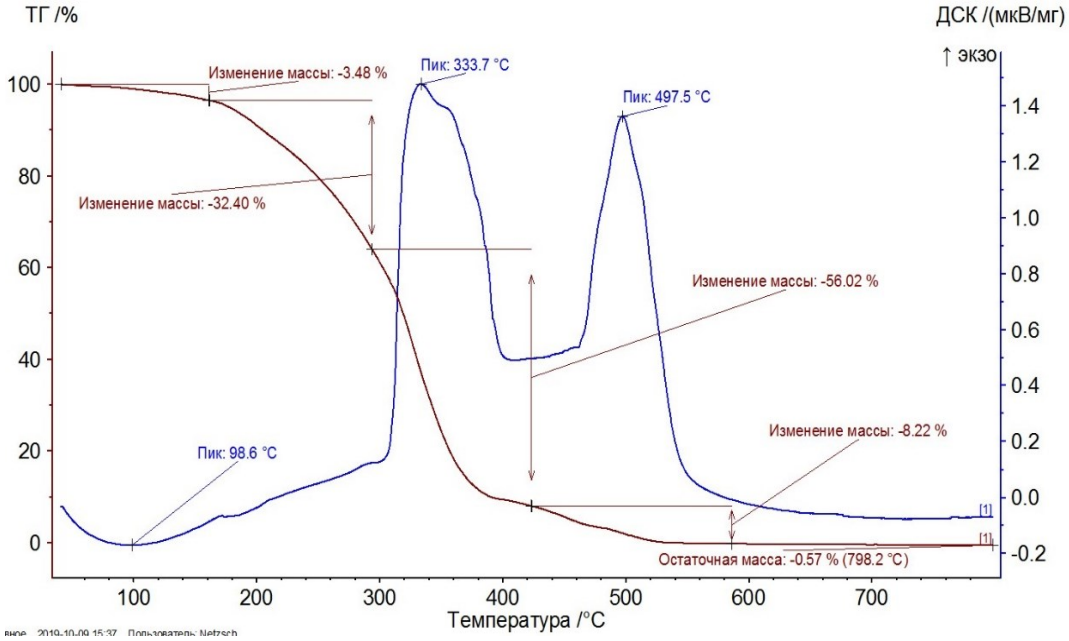


Рисунок 4 – Изменение веса и теплового потока очищенного отработанного моторного масла М-10$Г_{2К}$(нагревание образца до 800^{0}С на воздухе).

Очищенное отработанное моторное масло М-10$Г_{2К}$ после промывки двигателя имеет усложненный состав. Эндотермический пик испарения воды (96^{0}С, потеря массы 2%), экзотермические пики 335, 410, 419^{0}С (общая потеря массы 87 %) и экзотермические пики

окисления углеродной составляющей моторного масла 452 и 492^{0}С (рисунок 5). Содержание сажи составляет около 10%. Усложнение состава очищенного отработанного моторного масла М-10Г$_{2К}$ после промывки двигателя, вероятнее всего, связано с влиянием остатков масла в картере двигателя. Этот остаток масла разбавил очищенное отработанное моторное масло.

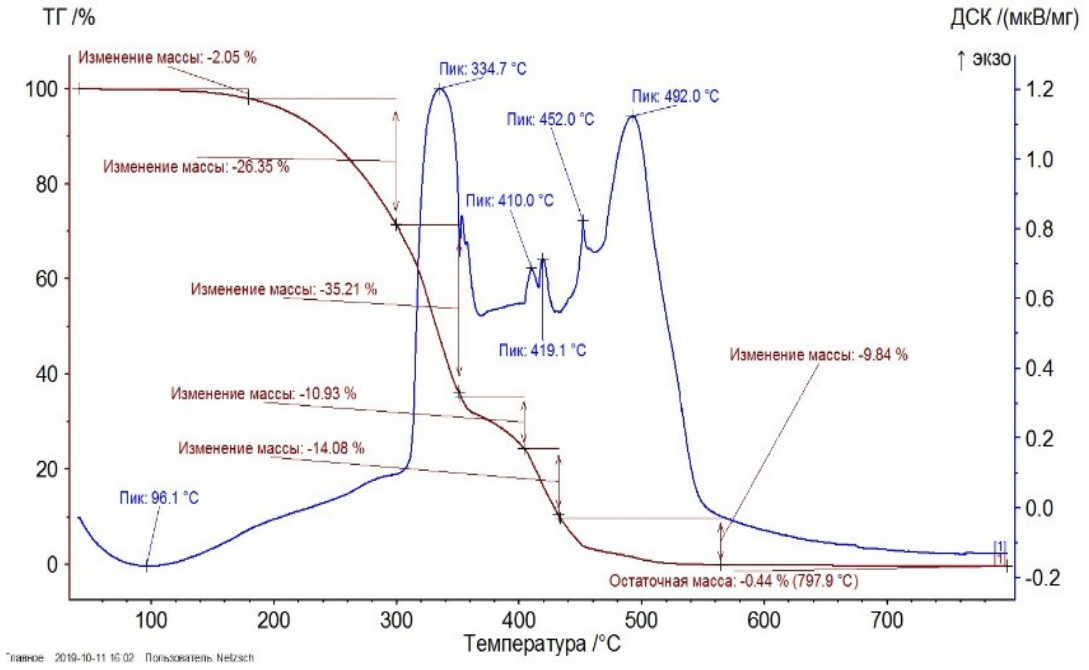


Рисунок 5 – Изменение веса и теплового потока очищенного отработанного моторного масла М-10Г$_{2К}$ после промывки двигателя (нагревание образца до 800^{0}С на воздухе).

В таблице 1 приведены результаты определения воды и углеродной составляющей в товарном, очищенном отработанном и масле после промывки двигателей тракторов МТЗ 82.1 в ПЗ «Пригородный» и ПЗ им. Ленина Тамбовского района Тамбовской области.

Таблица 1 – Содержание воды и углеродной составляющей (сажи) в товарном, отработанном очищенном и масле после промывки двигателя.

Товарное М-10Г$_2$к	Вода (40-180^{0}С)		Углеродная составляющая (450-700^{0}С)	
	0,06		4,94	
ФГУП ПЗ «Пригородный» Тамбовского р-на, Тамбовской обл.			Колхоз ПЗ им.Ленина Тамбовского р-на, Тамбовской обл.	
Масло отработанное очищенное	Вода	Углеродная составляющая	Вода	Углеродная составляющая
	4,23	8,78 (3,84)	3,48	8,22 (3,28)
Масло отработанное очищенное, после промывки двигателя	1,15	7,93 (2,99)	2,05	9,84 (4,90)

Примечание: цифры в круглых скобках получены вычитанием из содержания сажи пробы содержания сажи в товарном масле – 4,94%.

Заключение. Представлены результаты применения синхронного термического анализа для изучения свойств и характеристик моторных масел. Метод позволяет одновременно оценить «угар» моторного масла и определить количественное содержание воды и сажи. Кроме этого подтверждено, что очищенное отработанное моторное масло пригодно для использования в качестве базового компонента при разработке состава обкаточного масла для тракторных двигателей.

Список литературы

1. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. Л.: Химия, 1985. 312 с.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989.- 328 с.
3. Динуес А.Н., Потоловский Л.А. Основы технологии нефтехимического синтеза. М.: Гостоптехиздат. 1960. 846 с.
4. Остриков В.В., Тупотилов Н.Н., Попов С.Ю. Исследование очистки отработанных синтетических моторных масел специфическими растворителями // Наука в центральной России. – 2013. – №5. – С. 27 – 30.
5. Хабибулина Н.А., Ситников Н.Н., Казаков В.А., Сигалаев С.К. Синхронный термический анализ и спектроскопия комбинационного рассеяния как взаимодополняющие методы диагностики аллотропных форм углерода // Изв.вузов. Химия и хим.технология. 2016, Т.59. Вып.8, С.34-39.
6. Ефанова О.Ю., Ростовцев В.О., Карпов А.Б. Определение сажи в моторных маслах с применением СТА-анализа. // XXII Всероссийская конференция молодых ученых химиков. Тезисыдокладов. – Нижний Новгород: НИНГУ, 2019. С.468.
7. Wu H., Al-Rashed A.A.A.A., Barzinjy A.A., Shahsavar A., Karimi A., Talebizadehsardari P. Curve-fitting on experimental thermal conductivity of motor oil under influence of hybrid nano additives containing multi-walled carbon nanotubes and zinc oxide. – 2019. – Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – № 122128. 535 P.
8. Post E. STA 449 F5 Jupiter®-Simultaneous Thermal Analysis (STA) considerably simplified (2015) CFI Ceramic Forum International. – 92 (5-6). – pp. E33-E36
9. Пат. № 2554357 РФ МПК С10М 175/02(2006.01) Способ очистки отработанного масла / Остриков В.В, Корнев А.Ю., Попов С.Ю., Шихалев И.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИТиН. – 2014131692/04. – заявл. 30.07.2014; опубл. 27.06.2015. Бюл. № 18.

References

1. Kuliev A.M. Himiya i tekhnologiya prisadok k maslam i toplivam. L.: Himiya, 1985. 312 s.
2. Garkunov D.N. Tribotekhnika. – M.: Mashinostroenie, 1989.- 328 s.
3. Dinues A.N., Potolovskij L.A. Osnovy tekhnologii neftekhimicheskogo sinteza. M.: Gostoptekhizdat. 1960. 846 s.
4. Ostrikov V.V., Tupotilov N.N., Popov S.YU. Issledovanie ochistki otrabotannyh sinteticheskih motornyh masel specificheskimi rastvoritelyami // Nauka v central'noj Rossii. – 2013. – №5. – S. 27 – 30.
5. Habibulina N.A., Sitnikov N.N., Kazakov V.A., Sigalaev S.K. Sinhronnyj termicheskij analiz i spektroskopiya kombinacionnogo rasseyaniya kak vzaimodopolnyayushchie metody diagnostiki allotropnyh form ugleroda // Izv.vuzov. Himiya i him.tekhnologiya. 2016, T.59. Vyp.8, S.34-39.
6. Efanova O.YU., Rostovcev V.O., Karpov A.B. Opredelenie sazhi v motornyh maslah s primeneniem STA-analiza. // HKHII Vserossijskaya konferenciya molodyh uchenyh himikov. Tezisydokladov. – Nizhnij Novgorod: NINGU, 2019. S.468.
7. Wu H., Al-Rashed A.A.A.A., Barzinjy A.A., Shahsavar A., Karimi A., Talebizadehsardari P. Curve-fitting on experimental thermal conductivity of motor oil under influence of hybrid nano additives containing multi-walled carbon nanotubes and zinc oxide. – 2019. – Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – № 122128. 535 R.
8. Post E. STA 449 F5 Jupiter®-Simultaneous Thermal Analysis (STA) considerably simplified (2015) CFI Ceramic Forum International. – 92 (5-6). – pp. E33-E36
9. Pat. № 2554357 RF MPK S10M 175/02(2006.01) Sposob ochistki otrabotannogo masla / Ostrikov V.V, Kornev A.YU., Popov S.YU., SHihalev I.N.; zayavitel' i patentoobladatel' FGBNU VNIITiN. – 2014131692/04. – zayavl. 30.07.2014; opubl. 27.06.2015. Byul. № 18.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Нагдаев Владимир Константинович – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-

исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Жерновников Дмитрий Николаевич – инженер Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Остриков Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Author credentials

Affiliations

Nagdaev Vladimir – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Zhernovnikov Dmitry – Engineer of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Ostrikov Valery – Full Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Поступила в редакцию (Received): 18.03.2020 Принята к публикации (Accepted): 20.04.2020

УДК 636.087.7:637.5.05'64
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-111-117

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТКОРМА СВИНЕЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

[1]Шулаев Генаадий Михайлович
[1]Милушев Ринат Келимулович
[1]Энговатов Вячеслав Фёдорович

[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Разрабатывали состав и технологию приготовления функциональной кормовой добавки с комплексом биологически активных веществ и природным адсорбентом. В качестве природного адсорбента использовали природный бентонит. Производственными испытаниями установлено, что использование разработанной добавки в составе комбикормов за 10 дней до убоя свиней интенсифицирует обмен веществ, повышает содержание в крови общего белка, гемоглобина, гамма глобулина, свидетельствующего о высоком иммунном статусе животных. Среднесуточные приросты живой массы у свиней выросли на 2,8 %, улучшились потребительские качества продукции. В мясе опытной группы повысилась биологическая полноценность белка за счёт большего содержания в нём незаменимых аминокислот на 0,44 % (триптофан, лейцин, изолейцин). В результате белково-качественный показатель мяса этих животных превосходил контрольные образцы на 3,35 единицы. Влагосвязывающая способность мяса в опытной группе была выше на 6,0 % (p < 0,05), а интенсивность окраски на 3,0 ед. экстинкции (p < 0,05), что согласуется с большим на 1,5 г/л содержанием в крови гемоглобина. Эти показатели характеризуют высокие технологические и потребительские качества свиноводческой продукции. Мясо этих животных отличалось по количеству витаминов (рибофлавин, биотин и фолиевая кислота), при этом в нём свинца было меньше на 2,4 мкг. Дегустационная оценка дала положительные результаты.*

Ключевые слова: *функциональная кормовая добавка, природный адсорбент, качественные показатели свиноводческой продукции.*

PERFECTION TECHNOLOGY OF FEEDING PIGS FOR IMPROVEMENT THEY ARE PRODUCTION QUALITY

[1]Shulaev Gennady
[1]Milushev Rinat
[1]Engovatov Vyacheslav
[1]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

Abstract. *The composition and technology for the preparation of a functional feed additive with a complex of biologically active substances and a natural adsorbent were developed. Natural bentonite was used as a natural adsorbent. It was established by production tests that the use of the developed additive in the composition of animal feed 10 days before slaughter of pigs intensifies the metabolism, increases the blood protein content of total protein, hemoglobin, gamma globulin, indicating a high immune status of animals. The average daily gain in live weight in pigs increased by 2.8%, and consumer-quality products improved. The biological usefulness of the protein increased in the meat of the experimental group due to the higher content of essential amino acids in it by 0.44% (tryptophan, leucine, isoleucine). As a result, the protein-quality indicator of the meat of these animals exceeded the control samples by 3.35 units. The moisture-binding ability of meat in the experimental group was higher by 6.0% (p <0.05), and the color intensity by 3.0 units. extinction (p <0.05), which is consistent with a large hemoglobin content of 1.5 g / L. These indicators characterize the high technological and consumer qualities of pig production. The meat of these animals differed in the amount of vitamins (riboflavin, biotin and folic acid), while the lead in it was 2.4 micrograms less. Tasting evaluation gave positive results.*

Keywords: *functional feed additive, natural adsorbent, quality indicators of pig production.*

Введение. Тамбовская область является зоной интенсивного свиноводства. За последние годы область занимает четвёртое место в стране по валовому производству свиноводческой продукции. Однако перевод производства свинины на промышленную основу, где содержание поголовья в закрытых помещениях без прогулок, концентратный тип кормления и односторонняя селекция на мясность, снизили адаптационную способность животных к окружающей среде, к стрессфакторам. В результате возникла проблема с качеством продукции: стало больше животных с бледным, рыхлым, водянистым мясом (признаки PSE), имеющим низкое содержание внутримышечного жира, что сказывается на нежности, сочности, вкусе и аромате [1].

Качественные показатели мяса свиней зависят от многих факторов, влияя на которые можно изменять его свойства. Поэтому в России и за рубежом создаются специальные программы получения органической продукции, технологии, которые обеспечивают благополучие животных, здоровье людей, а также высокое качество продуктов питания [2]. Проблема повышения биологической полноценности и безопасности свиноводческой продукции имеет в настоящее время приоритетное значение. Поэтому одним из направлений научных исследований является разработка технологического процесса, позволяющего при жизни животного формировать качество мясного сырья, а также получать на его основе продукты, предназначенные для здорового питания [3,4].

Актуальным в решении этой проблемы является использование на разных стадиях откорма свиней функциональных кормовых добавок с направленным действием, с помощью которых можно изменять обмен веществ и прижизненно осуществлять оптимизацию качественных показателей продукции, обогащать её витаминами, микроэлементами, полиненасыщенными жирными кислотами и другими полезными веществами [5,6]. Положительные результаты дают на заключительных стадиях откорма повышение дозы витаминов Е, С, органические соединения селена, микроэлементы, L-карнитин, различные адсорбенты [7-12].

Было установлено, что карнитин, бетаин, витамины Е, С и B_4, B_{12} контролируют адаптационную способность животных к стрессу, обеспечивают эффективную антиоксидантную защиту клетки [9,10]. Осмопротектор бетаин способствует поддержанию осмотического баланса в клетке, предупреждает нарушения в обмене веществ в стрессовых ситуациях, снижает отрицательное воздействие других вредных факторов, например, микотоксинов, тяжёлых металлов [11].

Целью этой работы было улучшение качественных показателей свинины за счёт использования на заключительной стадии откорма новой кормовой добавки с функциональными свойствами.

Материалы и методы. Впервые был научно обоснован состав кормовой добавки из комплекса современных биологически активных веществ и природных компонентов, обладающих направленным синергическим взаимодействием – изменять у животных на заключительной стадии откорма (за 10 дней до убоя) обмен веществ, обеспечивая получение биологически полноценной, экологически чистой свиноводческой продукции. Состав добавки, в %: витамин Е – 0,32; витамин $Д_3$ – 0,30; витамин С - 0,30; витамин $В_4$ - 1,56; витамин $В_{12}$ – 0,004; бетаин (осмопротектор, удерживающий влагу в мышечной ткани) – 10,00; бентонит (природный адсорбент) – 77,166; соевая мука (наполнитель) – 10,00. В добавке использованы препараты с активностью: витамин Е-50,0 %; $Д_3$ – 15,0 тыс. МЕ в 1г; $В_4$ - 60,0 %; $В_{12}$ – 1,0 %; Омек J – 2,0 %; селено-КИ – 0,2 %. Разработана технология приготовления функциональной кормовой добавки с использованием в качестве наполнителя соевой муки, прошедшей термическую обработку методом микронизации для инактивации антипитательных веществ. Чтобы улучшить сыпучесть и одновременно выполнять функцию адсорбента был взят природный бентонит. Параметры, отражающие технологию получения функциональной добавки представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Технологические параметры приготовления функциональной добавки на основе полножирной сои и биологически активных веществ

№ п/п	Этапы	Параметр	Значение показателя
1	Микронизация полножирной сои	исходная влажность, %	18
		температура ^{o}С	130
2	Темперирование при 90-92^{0} С	время выдержки, мин.	15
3	Кондиционирование	температура,^{o}С	15 - 18
		активность уреазы после обработки	0,2Δ pH
4	Размол сои на молотковой дробилке:	фракционный состав помола, мм	0,2 – 0,5
5	Смешивание компонентов	последовательность	размолотые семена сои + бентонит + БАВ –биологически активные вещества по рецепту
6	Получение готового продукта	цвет	бежевый
		запах	жареных семечек
		влажность, %	7,0
		слеживаемость	отсутствует
		сыпучесть	присутствует
7	Транспортировка	Тара: крафт – мешок, кг	25

Производственные испытания добавки были выполнены в колхозе-племзаводе им. В. И. Ленина Тамбовской области, в качестве опытных животных использовали крупную белую породу свиней. Контрольная группа (24 гол.) получала комбикорм этого хозяйства, опытная – такой же комбикорм, но с функциональной добавкой в количестве 1 %, за 10 дней до убоя.

В состав комбикорма входили следующие компоненты: пшеница – 22,9 %; ячмень – 70,0 %; БВМК – 5,0 %; соль – 0,4 %; кормовой мел– 0,7 %; премикс КС-6 – 1,0 %. Установили, что 1 кг комбикорма обеспечивал 12,0 МДж обменной энергии и 12,99 % сырого протеина.

Приготовление комбикормов проводилось в кормоцехе хозяйства на комбикормовом оборудовании «Доза». Измельчение зерновых кормов было на молотковой дробилке. Дозирование зерновых компонентов осуществлялось объёмным, а кормовых добавок – весовым методом. Фракционный состав комбикорма был следующий – массовая доля размера частиц диаметром 3 мм составляла в нём не более 1,0 %. Все животные содержались в одинаковых условиях, получали комбикорма дважды в день, поение из автопоилок. Средняя живая масса при постановке свиней на опыт составляла 95,7-95,8 кг, при снятии - 114,1-114,7 кг. Опыт продолжался 30 дней.

Изучали микробиоценоз кишечной флоры, продуктивность животных, показатели крови и качество продукции. В конце опыта проведён убой 3 голов из каждой группы, отобраны образцы мышечной ткани и шпика для анализа.

Влагосвязывающую способность мышечной ткани определяли в лаборатории института «прессметодом», интенсивность окраски спектральным методом, дегустационную оценку продукции проводили по 5 балльной шкале. Аминокислотный, витаминный и минеральный состав мяса от подопытных свиней определяли в ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

При статистической обработке первичного материала, полученного в исследованиях, был использован t-критерий Стьюдента. Достоверной считали разницу при значении $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение. В процессе проведения опыта не было выявлено разницы в использовании комбикормов, не регистрировались расстройства работы желудочно-кишечного тракта.

В микробиоценозе кишечника у всех подопытных животных преобладала полезная микрофлора – бифидо- и лактобактерии (10^7-10^9) микробных клеток в 1 г фекалий. Такие значения соответствовали нормативным показателям.

В кишечнике свиней опытной группы в меньшем количестве присутствовали патогенные микроорганизмы, не обнаружены условно-патогенные энтеробактерии. Видимо, этому способствовало наличие в функциональной кормовой добавке адсорбента бентонита, который получали с комбикормом животные опытной группы, что можно расценивать как положительный фактор, благотворно отражающийся на снижение интоксикации их организма всевозможными микотоксинами. Определённое воздействие на данный процесс оказали и присутствующие в кормовой добавке биоплексы микроэлементов йода и селена, влияние которых на микрофлору кишечника и снижение количества тяжёлых металлов в организме животных подтверждается другими исследователями [12].

В крови свиней опытной группы повысилось на 5,1 г/л количество общего белка, на 1,9 ммоль мочевины ($p < 0,01$) и на 1,5 % гемоглобина, что свидетельствовало об интенсивном обмене азотистых веществ и активных окислительно-восстановительных процессах в их организме. Увеличение на 15,4% ($p < 0,01$) содержания в крови гамма-глобулинов способствовало поддержанию высокого иммунного статуса животных. Эти данные согласуются с их продуктивностью (таблица 2).

Таблица 2 – Влияние скармливания функциональной кормовой добавки на качественные показатели свиного мяса

№ п/п	Качественные показатели	Группа животных	
		контрольная	опытная
1	Живая масса свиней, кг:		
	конечная	114,1±1,00	114,7±0,78
	исходная	95,7±0,55	95,8±0,51
2	Среднесуточный прирост живоных, г	613±21,00	630±18,00
3	Затраты комбикорма на 1 кг прироста, кг	5,70	5,56
4	Убойный выход (для туши+внутренний жир), %	74,4±0,93	75,3±1,10
5	Белково-качественный показатель свиного мяса (соотношение триптофана к оксипролину), ед.	5,56	8,91
6	Средняя толщина шпика (из 3 промеров), мм	31,0±2,45	32,01±1,00
7	Физико-химические свойства для длиннейшей мышцы спины:		
	водородный показатель (pH) через 24 часа после убоя, ед.	5,58±0,06	5,52±0,04
	влагосвязывающая способность, %	56,4±1,76	62,9±0,48*
	интенсивность окраски, ед. экстинкции х 1000	73,0±0,90	76,0±0,40*
8	Дегустационная оценка, балл:		
	мясо по консистенции, сочности, аромату, вкусу	4,25±0,18	4,33±0,14
	бульон по внешнему виду, наваристости, аромату, вкусу	4,24±0,19	4,27±0,18

*$p < 0,05$

Установлено, что использование комбикорма, содержавшего новую функциональную кормовую добавку в терминальной стадии откорма повышает на 2,8 % среднесуточные приросты животных и убойный выход на 0,9 %. При этом улучшаются качественные показатели продукции. Данные таблицы показывают, что у животных из опытной группы по отношению к контрольной, повысился белково-качественный показатель мяса с 5,56 до 8,91 ед., на достоверную величину возросла влагосвязывающая способность мышечной ткани с 56,4 до 62,9 %, а интенсивность её окраски с 73,0 до 76,0 ед. экстинкции ($p<0,05$). Это характеризует высокие потребительские качества свиноводческой продукции.

Исследования показали, что между качественными показателями мяса есть определённая связь и взаимозависимость. В частности, с повышением интенсивности окраски мышечной ткани улучшается его влагосвязывающая способность, определяющая технологические качества продукции. Это наглядно видно на рисунке 1.

Рисунок 1– Физико-химические свойства мышечной ткани

Дегустационной оценкой установлено, что мясо опытных животных отличалось большей нежностью 4,36 против 4,07 балла в контрольном варианте, вкусом – 4,53 против 4,41 балла, а бульон – лучшей наваристостью и вкусом.

Изучен витаминный состав мяса (таблица 3).

Таблица 3 – Содержание витаминов в свином мясе

Группа	Содержание мг /100 г						мкг/100г	
	B_1	B_2	B_4	B_5	B_6	B_9	B_7	B_{12}
контрольная	0,84±0,12	0,27±0,01	4,06±0,06	0,79±0,02	0,57±0,02	3,31±0,56	2,60±0,19	0,73±0,09
опытная	0,87±0,03	0,32±0,02	4,35±0,05*	0,82±0,02	0,49±0,01	5,64±0,91	3,06±0,04	0,66±0,03

*$p < 0,05$

Проведенные анализы показали, что в мясе опытной группы увеличилось на достоверную величину содержание холина, приближалось к достоверному значению количество биотина и фолиевой кислоты. Это повышает биологическую полноценность продукта.

Следует отметить, что в мясе животных из опытной группы отмечено снижение свинца на 2,4 мкг/кг, что можно объяснить наличием в функциональной добавке адсорбента бентонита и

комплекса биологически активных веществ, способствующих выведению вредного элемента из организма [7, 9].

Выводы. Результаты исследований позволяют заключить, что использование за 10 дней до убоя свиней функциональной кормовой добавки, содержащей комплекс биологически активных веществ, позволяет значительно повысить качество и технологические свойства мяса - белково-качественный показатель, витаминный состав, а также влагосвязывающую способность, интенсивность окраски мышечной ткани, снижать содержание вредных элементов, таких как свинец.

Список литературы

1. Лисицын А.Б., Чернуха И.М. Законодательные основы и научные принципы создания функциональных пищевых продуктов на мясной основе // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2016. – №12(146). – С. 151-158.

2. Красновская Е. Десант ЗдороVAC: делиться самым ценным// Свиноводство. – 2017. – № 6. – С. 14-18.

3. Kamihiro S., Stergiadis S., Leifert C., Eyre M. D., Butler G. Meat quality and health implications of organic and conventional beef production// Meat Science. – 2015. – vol.100. – P. 306-318

4. Scollan N.D., Price E.M., Morgan S.A., Huws S.A., Shingfield K.J. Can we improve the nutritional quality of meat? // Proceedings of the Nutrition Society. – 2017. – vol. 76(4). – P. 603-618

5. Rodic V., Rodic V., Milosevic N. Production of poultry meat and eggs as functional food – Challenges and opportunities // Biotechnol. Anim. Husbandary. – 2011. – vol. 11(3). – P. 511-520

6. Ganesan B., Brothersen C., McMahon D. J. Fortification of foods with omega -3 polyunsaturated fatty acids // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2014. – vol. 54(1). – P. 98-114

7. Parinet U., Royer E., Saint-Hilaire M., Chafey C., Noël L., Minvielle B., Dervilly-Pinel G., Engel E., Thierry Guérin T. Classification of trace elements in tissues from organic and conventional French pig production // Meat Science. – 2018. – vol. 141. – P. 28-35

8. Cheng-long Jin, Chun-qi Gao, Qiang Wang, Zong-ming Zhang, Yin-long Xu, Hai-chang Li, Hui-chao Yan, Xiu-qi Wang Effects of pioglitazone hydrochloride and vitamin E on meat quality, antioxidant status and fatty acid profiles in finishing pigs // Meat Science. – 2018. – vol.145. – P. 340-346

9. Сурай П.Ф, Фисинин В.И., Шацких Е.В., Латыпова Е.Н. Современные методы борьбы со стрессами в птицеводстве и свиноводстве: концепция витагенов в действии // Сфера. Технологии. Корма. Ветеринария. – 2017. – № 2(5). – С. 41-43.

10. Pekala J., Patkowska-Sokoła B., Bodkowski R., Jamroz D., Nowakowski P., Lochyński S., Librowski T. L-carnitine — metabolic functions and meaning in humans life // Curr. Drug Metab. – 2011.

11. Sales J. A meta-analysis of the effects of dietary betaine supplementation on finishing performance and carcass characteristics of pigs // Animal Feed Science and Technology. – 2011. – vol. 165 (1-2). – P.68-78.

12. Calvo L., Toldrá F., Aristoy M.C., López-Bote C.J., Rey A.I. Effect of dietary organic selenium on muscle proteolytic activity and water-holding capacity in pork // Meat Science. – 2016. – vol. 121. –P. 1-11.

References

1. Lisicyn A.B., CHernuha I.M. Zakonodatel'nye osnovy i nauchnye principy sozdaniya funkcional'nyh pishchevyh produktov na myasnoj osnove // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2016. – №12(146). – S. 151-158.

2. Krasnovskaya E. Desant ZdoroVAC: delit'sya samym cennym// Svinovodstvo. – 2017. – № 6. – S. 14-18.

3. Kamihiro S., Stergiadis S., Leifert C., Eyre M. D., Butler G. Meat quality and health implications of organic and conventional beef production// Meat Science. – 2015. – vol.100. – P. 306-318

4. Scollan N.D., Price E.M., Morgan S.A., Huws S.A., Shingfield K.J. Can we improve the nutritional quality of meat? // Proceedings of the Nutrition Society. – 2017. – vol. 76(4). – P. 603-618

5. Rodic V., Rodic V., Milosevic N. Production of poultry meat and eggs as functional food – Challenges and opportunities // Biotechnol. Anim. Husbandary. – 2011. – vol. 11(3). – P. 511-520

6. Ganesan B., Brothersen C., McMahon D. J. Fortification of foods with omega -3 polyunsaturated fatty acids // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2014. – vol. 54(1). – P. 98-114

7. Parinet U., Royer E., Saint-Hilaire M., Chafey C., Noël L., Minvielle B., Dervilly-Pinel G., Engel E., Thierry Guérin T. Classification of trace elements in tissues from organic and conventional French pig production // Meat Science. – 2018. – vol. 141. – P. 28-35

8. Cheng-long Jin, Chun-qi Gao, Qiang Wang, Zong-ming Zhang, Yin-long Xu, Hai-chang Li, Hui-chao Yan, Xiu-qi Wang Effects of pioglitazone hydrochloride and vitamin E on meat quality, antioxidant status and fatty acid profiles in finishing pigs // Meat Science. – 2018. – vol.145. – P. 340-346

9. Suraj P.F, Fisinin V.I., SHackih E.V., Latypova E.N. Sovremennye metody bor'by so stressami v pticevodstve i svinovodstve: koncepciya vitagenov v dejstvii // Sfera. Tekhnologii. Korma. Veterinariya. – 2017. – № 2(5). – S. 41-43.

10. Pekala J., Patkowska-Sokoła B., Bodkowski R., Jamroz D., Nowakowski P., Lochyński S., Librowski T. L-carnitine — metabolic functions and meaning in humans life // Curr. Drug Metab. – 2011.

11. Sales J. A meta-analysis of the effects of dietary betaine supplementation on finishing performance and carcass characteristics of pigs // Animal Feed Science and Technology. – 2011. – vol. 165 (1-2). – P.68-78.

12. Calvo L., Toldrá F., Aristoy M.C., López-Bote C.J., Rey A.I. Effect of dietary organic selenium on muscle proteolytic activity and water-holding capacity in pork // Meat Science. – 2016. – vol. 121. –P. 1-11.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Шулаев Геннадий Михайлович – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: tniij@yandex.ru.

Милушев Ринат Келимулович – доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: july1931@yandex.ru.

Энговатов Вячеслав Фёдорович – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: tniij@yandex.ru.

Authors credentials

Affiliations

Shulaev Gennady – Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: tniij@yandex.ru.

Milushev Rinat – Full Doctor of Agricultural Sciences, Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: july1931@yandex.ru.

Engovatov Vyacheslav – Full Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for the Use of Technics and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: tniij@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 10.12.2019 Принята к публикации (Accepted): 03.03.2020

УДК 637.115
DOI: 10.35887/2305-2538-2020-2-117-124

ВЛИЯНИЕ РОБОТИЗИРОВАННОГО ДОЕНИЯ НА КАЧЕСТВО МОЛОКА

[1]Симонов Геннадий Александрович
[1]Никифоров Владислав Евгеньевич
[1]Сереброва Ирина Сергеевна
[1]Иванова Дарья Александровна
[2]Филиппова Ольга Борисовна

[1]ФГБУН «Вологодский научный центр Российской академии наук»
[2]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Роботизированная технология добровольного доения имеет существенное преимущество для производителей молочной продукции и перерабатывающих предприятий. Доение коров с помощью робота обеспечивает высокое качество получаемого молока. Исследования проведены в нескольких передовых хозяйствах Вологодской области. Изучены показатели молока высокопродуктивных молочных коров черно-пестрой породы в условиях беспривязного содержания и роботизированного доения. Определено содержание массовой доли жира, белка, лактозы и соматических клеток в молоке коров. Проведена экспертиза отдельных*

операций доения роботом. Установлено, что наибольшее влияние на качественные показатели молока, бактериальное обсеменение и количество соматических клеток оказывает техническое состояние аппаратуры и периодичность промывки системы, состояние сосковой резины и периодичность её замены, соблюдение техники доения, обработка вымени перед доением, фильтрация, охлаждение молока. Массовая доля жира в анализируемых пробах молока находится в пределах 3,65–4,02 %, белка 3,19–3,42 %, лактозы 4,62–4,94 %, показатели сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО) 9,49–10,19 %. Количество соматических клеток соответствует нормативным значениям и составляет от 145 до 332 тыс./см³. Такие показатели характеризуют высокие санитарно-гигиенические условия на производстве и технический уровень оборудования при роботизированной технологии доения.

***Ключевые слова**: роботизированная технология доения, коровы, молоко, соматические клетки.*

INFLUENCE OF ROBOTIZED MILKING ON QUALITY OF COW MILK

[1]Simonov Gennady
[1]Nikivorov Vladislav
[1]Serebrova Irina
[1]Ivanova Dasha
[2]Filippova Olga

[1] FSBIS "Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences"
[2]FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

***Abstract.** Robotic voluntary milking technology has a significant advantage for dairy producers and processors. Milking cows with the help of a robot ensures high quality of the milk produced. The research was carried out in several advanced farms of the Vologda region. The indices of milk of highly productive milk cows of black-and-pesky breed in conditions of careless content and robotic milking have been studied. The content of fat, protein, lactose and somatic cells in cow milk was determined. An examination was carried out on certain operations of robot milking. It was established that the greatest influence on the quality indicators of milk, bacterial seeding and the number of somatic cells is exerted by the technical condition of the equipment and the frequency of flushing the system, the condition of the nipple rubber and the frequency of its replacement, compliance with the milking technique, processing of the udder before milking, filtration, and cooling of milk. The mass fraction of fat in the analyzed milk samples is in the range of 3.65–4.02%, protein 3.19–3.42%, lactose 4.62–4.94%, indicators of dry skim milk residue (SOMO) 9.49 –10.19%. The number of somatic cells complies with regulatory values and ranges from 145 to 332 thousand/cm³. Such indicators characterize high sanitary and hygienic conditions in the production and the technical level of equipment with robotic milking technology.*

***Keywords:** robotic milking technology, cows, milk, somatic cells*

Введение. Усиление рыночной конкуренции создало условия для внедрения в промышленное производство наиболее современных достижений науки и техники, позволяющих снизить влияние человеческого фактора, себестоимость продукции и повысить производительность труда. В основе государственной политики лежит направленность на более высокую техническую оснащенность технологического производства молока. В настоящее время более прогрессивной технологией содержания молочных коров является беспривязный способ на основе автоматизированных технологий доения.

По данным Росстата в последние годы в сельскохозяйственных организациях, являющихся основными поставщиками молочного сырья на промышленную переработку, отмечается сокращение поголовья коров на 1-2 % в среднем по всем субъектам РФ (таблица 1).

Таблица 1 – Общие показатели отрасли молочного животноводства

№ п/п	Показатели	Годы					
		2014	2015	2016	2017	2018	2019
1	Поголовье коров, тыс. гол.	8530,8	8408,1	8250,1	8202,8	8136,5	7990
2	Сокращение, тыс. гол.	- 130,2	- 122,7	- 158,0	- 47,3	- 66.3	- 146
3	Темпы сокращения поголовья, %	- 1,5	- 1,4	- 1,9	- 0,6	- 0,9	- 1,8
4	Производство молока, тыс. т.	30791	30797	30759	31120	30640	31100

В частности на молочных фермах Вологодской области в настоящее время применяются различные технологии доения и способы содержания животных, повсеместно обновляется оборудование, высокими темпами производится технологическая модернизация предприятий, специализирующихся на молочном скотоводстве, в том числе внедряется роботизированное доение. Главным преимуществом доения роботами является минимальное травмирующее действие на ткани вымени коров. Известно, что некорректная настройка доильных установок часто приводит к возникновению кератоза, мастита, и других заболеваний, сопровождающихся снижением продуктивности животных [1]. Внедрение автоматического роботизированного доения повышает количество лактаций и продуктивность коров на 10 % [6].

Первые научные разработки в сфере создания автоматизированных систем доения начались в конце 70-х годов. С ростом популярности автоматизированного доения в 2015 году количество роботов составляло уже около 15 тысяч установок.

В настоящее время в России уже более 10 лет используются автоматизированные системы доения с роботами, которые можно рассматривать как серьезный этап на пути создания системы «точного» животноводства. На период 2017 года в России насчитывалось порядка 100 хозяйств, использующих роботов, причём развитие доильной робототехники активно продолжается.

Следует отметить, что в 2008 году впервые в России именно в Вологодской области в АО Племзавод «Родина» Вологодского района была введена в эксплуатацию автоматизированная система доения – робот-дояр VMS компании «DeLaval». Впоследствии данная роботизированная технология успешно внедрена и на молочной ферме Племзавод «Колхоз имени 50-летия СССР» Вологодской области.

Отличительными особенностями роботизированной доильной системы «DeLaval» является идентификация животных с помощью транспондеров, использование механизма пневматической системы для надевания и съёма рабочих стаканов, применение четырёхтактного механизма подвески доильных стаканов, обеспечивающего перемещение в горизонтальной плоскости.

Практический опыт эксплуатации роботов в Вологодской области показал, что наиболее подходящими для доения доильным роботом являются коровы первой и второй лактации, так как они быстрее и легче адаптируются к особенностям роботизированной системы доения, поскольку меньше вероятность возникновения мастита вымени и заболеваний опорно-двигательного аппарата [15].

На сегодняшний день в Вологодской области в 5 хозяйствах, 3 районов установлены и действуют 45 доильных роботов «DeLaval». Один робот обслуживает в среднем 70-75 коров, для большего поголовья требуется несколько роботов. Информация о результатах внедрения роботов в Вологодской области и работе предприятий и ферм с беспривязным содержанием скота и роботизированной технологии доения приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Внедрение роботизированной технологии в Вологодской области

Наименование хозяйства (применяемые роботы)	Кол-во роботов	Год ввода	Обслуживаемое поголовье коров, гол.
Вологодский район			
АО «Родина»	–		
Ферма Погорелово №5 (DeLaval)	4	2008-2013	290
Ферма Харачево (DeLaval)	4	2009-2014	290
Ферма Васильевское (DeLaval)	4	2012-2013	290
Ферма Харачево-2 (GEA Mlone)	8	2018	554
СПК «Илюшенский» (DeLaval)	4	2017	280
Итого по району	24		1704
Грязовецкий район			
Ферма Савкино (DeLaval)	8	2008	600
ООО «Покровское» (DeLaval)	9	2011-2013	648
ПЗ Аврора (DeLaval)	12	2014-2015	864
Итого по району	29		2112
Тотемский район			
СПК «Тотемский» Ивойлово-1 (Astronaut)	4	2016	400
Итого по району	4		400
В целом по области	57		4216

Необходимо отметить, что на качество получаемой животноводческой продукции оказывают влияние различные факторы: кормление [2, 3, 7-11, 13, 14], содержание [4, 5, 12] технология доения [12, 15-17]. О качестве молока судятпо таким органолептическим показателям, как содержание белка и жира, группа чистоты, бактериальная обсеменённость, содержание соматических клеток.

Цель и методы исследований. Целью исследований было определение соматических клеток в молоке коров черно-пестрой породы. Исследования проводились на лактирующих животных в передовых хозяйствах Вологодского, Грязовецкого и Тотемского районов Вологодской области – АО «Племзавод Родина», «Ордена Трудового Красного Знамени Племзавод – колхоз имени 50-летия СССР», ООО «Покровское».

В перечисленных хозяйствах применяется способ беспривязного содержания и роботизированная технология доения VMS «DeLaval». Пробы молока коров черно-пестрой породы были исследованы на качественные показатели.

Результаты опыта и их обсуждения. В производственных условиях АО «Племзавода Родина» Вологодского района был исследован ряд технологических факторов (таблица 3).

Таблица 3 – Технологические факторы, влияющие на качество молока

Технологический фактор	Характеристика
Величина вакуума, кПа	45
Режим доения	Добровольное доение
Кратность доения, раз	2-3
Соблюдение техники доения	Полный автоматический контроль, точное управление, доение по четвертям, разделение молока
Обработка вымени перед доением	Мойка автоматическая, специальный стакан
Первичная обработка молока на ферме (фильтрация, охлаждение)	Фильтрация на входе в танк; тип фильтров: бумажный Delaval Filter White 120, VMS Filter 470-44, смена фильтров: ежедневное трехразовое
Толщина фильтра	Фильтры первичной и вторичной очистки-40 мкм
Площадь поверхности фильтра, см^2	600
Контакт молока с внешней средой	отсутствует
Путь прохождения молока до накопителя	Молокопровод сварной, длина 40-60 м, диаметр 25,4 мм (1 дюйм), материал: нержавеющая сталь.
Промывка системы	Автоматическая, 3 раза в сутки - 20 мин.
Воздействия на молоко	нет
Качество сосковой резины, периодичность замены	Хорошее, сосковая резина DeLaval - замена через 2,5 тыс. доений, шланги - через 5 тыс. доений,.
Техническое состояние аппаратуры	Контроль, обслуживание по регламенту.
Санитария сбора молока	Отдельная санитарная зона доения.
Система охлаждения молока	Охлаждение молока предварительное в потоке и основное в танках: DX/CE 3000 L, DX/CE 4500 L
Уровень гигиены на ферме	Высокий уровень, доение добровольное в специальном боксе.

Комплексный анализ по операциям доения коров показал, что при роботизированной технологии доения соблюдаются необходимые условия для получения молока высокого качества.

Качественные показатели молока зависят, прежде всего, от технического состояния аппаратуры и периодичности промывки системы, состояния и качества сосковой резины, периодичности её замены, соблюдения техники доения, обработки вымени перед доением, фильтрации, охлаждения молока.

В таблице 4 приведена преимущественная характеристика роботизированного доения в сравнении с традиционным доением.

Таблица 4 – Сравнительная характеристика технологий доения (DeLaval) при продуктивности более 7000 кг

Показатели	Традиционное доение	Роботизированное доение (DeLaval)
Соматические клетки, тыс./см^3	350-700	90-120
Бактериальная обсемененность, тыс./см^3	Более 100	До 40
Товарность молока, %	90	97
Количество лактаций	3-4	4-5
Сервис-период, дни	≈ 200	≈ 150
Продуктивность, ± %	-	+7-10
Среднее количество доений	2,2	3,3 и более

Удой достигает 7500-8000 кг в год, а средняя продуктивность коров за лактацию при доении на роботе составляет 8465 кг молока. Ранее проводимые исследования доения коров показывают, что наибольший удой наблюдается на 2-3-м месяце в соответствии с процессом изменения лактации и общей закономерностью лактационных кривых [12].

Результаты исследований качественных показателей молока коров, получаемого на роботизированной технологии доения в хозяйствах, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Качественные показатели молока коров в различных хозяйствах

Показатели	Племзавод-колхоз имени 50-летия СССР		АО «Племзавод Родина»		ООО «Покровское»	
Период (год)	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Исследуемое поголовье коров	285	150	262	280	388	370
Массовая доля жира, %	3,80 ± 0,02	4,02 ± 0,02	3,84 ± 0,01	3,88 ± 0,01	3,87 ± 0,01	3,88 ± 0,01
Массовая доля белка, %	3,26 ± 0,01	3,42 ± 0,01	3,30 ± 0,01	3,33 ± 0,01	3,25 ± 0,01	3,19 ± 0,01
Массовая доля лактозы, %	4,71 ± 0,01	4,86 ± 0,01	4,74 ± 0,01	4,90 ± 0,01	4,79 ± 0,01	4,94 ± 0,01
СОМО, %	9,69 ± 0,01	10,19 ± 0,01	9,77 ± 0,01	10,12 ± 0,01	9,78 ± 0,01	10,01 ± 0,01
Мочевина, мг/100 мл	18,37 ± 0,28	31,21 ± 0,65	25,42 ± 0,32	35,66 ± 0,24	35,32 ± 0,26	42,24 ± 0,26
Количество соматических клеток, тыс./см^3	160 ± 15	265 ± 26	332 ± 20	238 ± 10	145 ± 8	157 ± 12

Из анализа таблицы 5 видно, что массовая доля жира в анализируемых пробах молока находится в пределах 3,65–4,02 %, белка – 3,19–3,42 %, лактозы 4,62–4,94 %, показатели сухого обезжиренного молочного остатка (СОМО) 9,49–10,19 %. Отмечается увеличением МДЖ за анализируемый период времени. Количество соматических клеток соответствует нормативным значениям и составляет от 145 до 332 тыс./см^3.

Следует отметить, что количество соматических клеток в молоке по сезонам года находится в норме и незначительно меняетсяот 219 до 315 тыс./см^3 на ферме «Ордена Трудового Красного Знамени Племзавод - колхоз имени 50-летия СССР». В АО «Племзавод Родина» от 191 до 284 тыс./см^3. В ООО «Покровское» от 150 до 160 тыс./см^3 (рисунок 1).

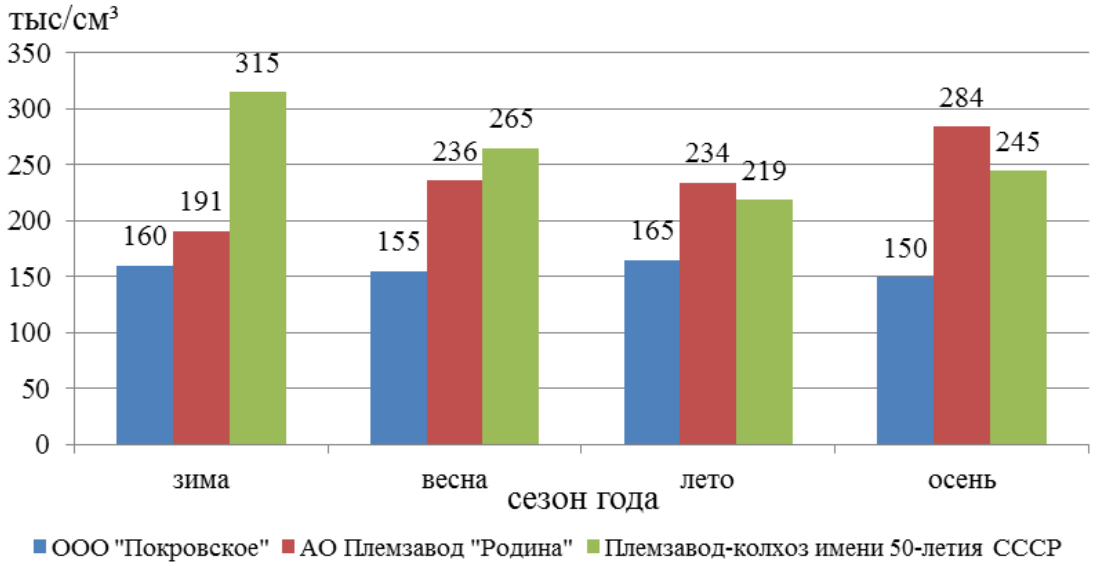


Рисунок 1 – Изменение соматических клеток в молоке

Роботизированная технология доения позволяет получать молоко с высокими качественными показателями, особенно по содержанию соматических клеток, что положительно влияет на определение сорта молока и получение качественных молочных продуктов. Хозяйства, которые используют данную технологию доения, получают молоко в основном высшего сорта, что связано с высокими санитарно-гигиеническими условиями доения, определяемыми техническим уровнем оборудования. В соответствие с ГОСТ Р 52054-2003 «Молоко коровье сырое. Технические условия» содержание соматических клеток в коровьем молоке высшего сорта должно составлять не более 250 тыс./см^3, для первого сорта – 400 тыс./см^3.

Заключение. Исследования показали, что в современных условиях хозяйствования внедрение прогрессивных технологий на основе роботизированных систем доения обеспечивает повышение качества и эффективности производства молока. Количество соматических клеток в молоке высокопродуктивных коров при роботизированной технологии доения составляет в среднем 294 тыс./см^3 за лактацию, что соответствует российскому стандарту ГОСТ Р 520054-2003 «Молоко коровье сырое».

Список литературы

1. Филиппова О.Б., Кийко Е.И. Экономические аспекты нарушения правил машинного доения в промышленном производстве молока // Наука в центральной России. – 2013. – № 6. – С. 72-75.

2. Гайирбегов Д.Ш., Федонин А.Н. Влияние ферросила на обмен веществ // Птицеводство. – 2009. – № 6. – С. 40.

3. Эффективность использования белково-витаминно-минеральных концентратов с цеолитовым туфом в рационах бычков на откорме / В.С. Зотеев, Г.А. Симонов, Н.В. Кириченко [и др.] // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – № 1. – С. 115-118.

4. Магомедов М.Ш., Симонов Г.А., Никульников В.С. Биотехнология продукции животноводства (Учебники и учебные пособие для студентов высших учебных заведений). – Махачкала. – 2011. – 504 с.

5. Технология «корова-теленок» эффективный метод выращивания помесного молодняка в условиях Дагестана / М.Ш. Магомедов, Г.А. Симонов, М.М. Садыков, Р.М. Чавтараев // Молочное и мясное скотоводство. – 2016. – № 1. – С. 13-15.

6. Сравнительная оценка экономической эффективности использования доильных роботов в ООО «Покровское» Вологодской области / А.В. Маклахов, В.И. Жильцов, Л.А. Никитин [и др.] // Вопросы территориального развития. – 2017. – № 5 (40). – С. 5-10.

7. Симонов Г.А. Интенсивность выращивание высокопродуктивных коров // Молочное и мясное скотоводство. – 2005. – № 2. – С. 29-30.

8. Симонов Г.А. Использование природного кремнезема // Птицеводство. – 2009. – № 6. – С. 34-35.

9. Симонов Г.А. Использование в рационах кремнеземистого мергеля // Птицеводство. – 2009. – № 7. – С. 31.

10. Симонов Г.А., Гуревич В.И. Тритикале в рационе лактирующих свиноматок // Эффективное животноводство. – 2012. – № 8 (82). – С. 48-49.

11. Откорм бычков в условиях аридной зоны юга России / М.М. Садыков, Г.А. Симонов, Д.Ш. Гайирбегов, Д.Б. Манджиев // Проблемы развития АПК региона. – 2015. – Т. 24. – № 4 (24). – С. 63-66.

12. Сереброва И.С., Углин В.К., Никифоров В.Е. Производство и качество молока при различных технологиях доения и способах содержания // Farm Animals. – 2016. – № 2 (12). – С. 10-12.

13. Стартерные комбикорма с семенами льна масличного для телят / Е. Тяпугин, Г. Симонов, В. Зотеев, А. Санин // Молочное и мясное скотоводство. – 2011. – № 4. – С. 17-18.

14. Интенсификация кормопроизводства и улучшение качества кормов в условиях Северо-Западного региона России / Е.А. Тяпугин, Г.А. Симонов, В.С. Зотеев, С.Е. Тяпугин. – Вологда, 2012. – 110 с.

15. Особенности роботизированной технологии доения высокопродуктивных коров на современных комплексах / Е.А. Тяпугин, С.Е. Тяпугин, В.К. Углин, В.Е. Никифоров // Достижения науки и техники АПК. – 2015. – № 2. – С. 57-58.

16. Сравнительная оценка технологических факторов, влияющих на производство и качество молока, при различных технологиях доения / Е.А. Тяпугин, С.Е. Тяпугин, Г.А. Симонов, В.Е. Никифоров // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2015. – № 3. – С. 50-53.

17. Филиппова О.Б., Доровских В.И., Кийко Е.И. К методике физиологической оценки доильного оборудования // Наука в центральной России. – 2014. – № 6. – С. 53-60.

References

1. Filippova O.B., Kijko E.I. Ekonomicheskie aspekty narusheniya pravil mashinnogo doeniya v promyshlennom proizvodstve moloka // Nauka v central'noj Rossii. – 2013. – № 6. – S. 72-75.

2. Gajirbegov D.SH., Fedonin A.N. Vliyanie ferrosila na obmen veshchestv // Pticevodst-vo. – 2009. – № 6. – S. 40.

3. Effektivnost' ispol'zovaniya belkovo-vitaminno-mineral'nyh koncentratov s ceolitovym tufom v racionah bychkov na otkorme / V.S. Zoteev, G.A. Simonov, N.V. Kirichenko [i dr.] // Izvestiya Samarskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akade-mii. – 2013. – № 1. – S. 115-118.

4. Magomedov M.SH., Simonov G.A., Nikul'nikov V.S. Biotekhnologiya produkcii zhivot-novodstva (Uchebniki i uchebnye posobie dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij). – Mahachkala. – 2011. – 504 s.

5. Tekhnologiya «korova-telenok» effektivnyj metod vyrashchivaniya pomesnogo molodnya-ka v usloviyah Dagestana / M.SH. Magomedov, G.A. Simonov, M.M. Sadykov, R.M. CHav-taraev // Molochnoe i myasnoe skotovodstvo. – 2016. – № 1. – S. 13-15.

6. Sravnitel'naya ocenka ekonomicheskoj effektivnosti ispol'zovaniya doil'nyh robo-tov v OOO «Pokrovskoe» Vologodskoj oblasti / A.V. Maklahov, V.I. ZHil'cov, L.A. Nikitin [i dr.] // Voprosy territorial'nogo razvitiya. – 2017. – № 5 (40). – S. 5-10.

7. Simonov G.A. Intensivnost' vyrashchivanie vysokoproduktivnyh korov // Molochnoe i myasnoe skotovodstvo. – 2005. – № 2. – S. 29-30.

8. Simonov G.A. Ispol'zovanie prirodnogo kremnezema // Pticevodstvo. – 2009. – № 6. – S. 34-35.

9. Simonov G.A. Ispol'zovanie v racionah kremnezemistogo mergelya // Pticevodstvo. – 2009. – № 7. – S. 31.

10. Simonov G.A., Gurevich V.I. Tritikale v racione laktiruyushchih svinomatok // Effektivnoe zhivotnovodstvo. – 2012. – № 8 (82). – S. 48-49.

11. Otkorm bychkov v usloviyah aridnoj zony yuga Rossii / M.M. Sadykov, G.A. Simonov, D.SH. Gajirbegov, D.B. Mandzhiev // Problemy razvitiya APK regiona. – 2015. – T. 24. – № 4 (24). – S. 63-66.

12. Serebrova I.S., Uglin V.K., Nikiforov V.E. Proizvodstvo i kachestvo moloka pri razlichnyh tekhnologiyah doeniya i sposobah soderzhaniya // Farm Animals. – 2016. – № 2 (12). – S. 10-12.

13. Starternye kombikorma s semenami l'na maslichnogo dlya telyat / E. Tyapugin, G. Si-monov, V. Zoteev, A. Sanin // Molochnoe i myasnoe skotovodstvo. – 2011. – № 4. – S. 17-18.

14. Intensifikaciya kormoproizvodstva i uluchshenie kachestva kormov v usloviyah Seve-ro-Zapadnogo regiona Rossii / E.A. Tyapugin, G.A. Simonov, V.S. Zoteev, S.E. Tyapugin. – Vologda, 2012. – 110 s.

15. Osobennosti robotizirovannoj tekhnologii doeniya vysokoproduktivnyh korov na sovremennyh kompleksah / E.A. Tyapugin, S.E. Tyapugin, V.K. Uglin, V.E. Nikiforov // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2015. – № 2. – S. 57-58.

16. Sravnitel'naya ocenka tekhnologicheskih faktorov, vliyayushchih na proizvodstvo i kachestvo moloka, pri razlichnyh tekhnologiyah doeniya / E.A. Tyapugin, S.E. Tyapugin, G.A. Simonov, V.E. Nikiforov // Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozyajstvennyh nauk. – 2015. – № 3. – S. 50-53.

17. Filippova O.B., Dorovskih V.I., Kijko E.I. K metodike fiziologicheskoj ocenki doil'nogo oborudovaniya // Nauka v central'noj Rossii. – 2014. – № 6. – S. 53-60.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Симонов Геннадий Александрович – доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Вологодский научный центр Российской академии наук», Россия, г. Вологда, e-mail: sznii@list.ru.

Никифоров Владислав Евгеньевич – старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Вологодский научный центр Российской академии наук», Россия, г. Вологда, e-mail: sznii@list.ru.

Сереброва Ирина Сергеевна – старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Вологодский научный центр Российской академии наук», Россия, г. Вологда, e-mail: sznii@list.ru.

Иванова Дарья Александровна – младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Вологодский научный центр Российской академии наук», Россия, г. Вологда, e-mail: sznii@list.ru.

Филиппова Ольга Борисовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: filippova175@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Simonov Gennady – Doctor of Agricultural Sciences, Chief Researcher of Federal State Budgetary Institution of Sciences “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Vologda, e-mail: sznii@list.ru.

Nikivorov Vladislav – Senior Researcher of Federal State Budgetary Institution of Sciences “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Vologda, e-mail: sznii@list.ru.

Serebrova Irina – Senior Researcher of Federal State Budgetary Institution of Sciences “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Vologda, e-mail: sznii@list.ru.

Ivanova Dasha – Junior Researcher of Federal State Budgetary Institution of Sciences “Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences”, Russia, Vologda, e-mail: sznii@list.ru.

Filippova Olga – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e -mail: filippova175@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 29.10.2019 Принята к публикации (Accepted): 20.03.2020

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 30.04.2020. Заказ № 24.
Формат 84x108/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Гарнитура Times. Объем – 13.02 усл. печ. л. Тираж 100 экз.