ISSN 2305-2538
DOI:10.35887/2305-2538

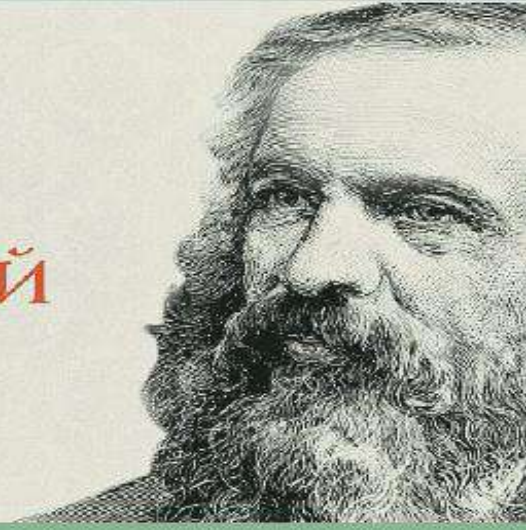
2022 № 1 (55)

Наука в центральной России

В журнале публикуются статьи проблемного и научно-практического характера, представляющие собой результаты завершённых исследований, обладающие новизной и представляющие интерес для широкого круга читателей журнала

ФГБНУ ВНИИТиН

С Днем российской науки



Глубокоуважаемые ученые,
преподаватели, аспиранты и студенты,
коллеги, читатели и авторы
журнала «Наука в центральной России!

Поздравляем Вас с профессиональным праздником!

С Днем Российской Науки!

Это праздник всех, кто причастен к созданию интеллектуального потенциала нашей страны, праздник знаний и открытий. Российская наука всегда была одной из важнейших опор государства, двигателем прогресса и предметом гордости всей страны. За важнейшими открытиями и сегодня стоят ученыеуниверситетов и научно-исследовательских институтов,чей кропотливый труд, пытливость ума, способностьвзглянуть на вещи нетривиально создают новаторские идеи,делают нашу жизнь совершеннее.
В этот важный день мы желаем вам не останавливаться на достигнутом, продолжать научные разработки, ставить перед собой новые задачи и успешно решать их.
Пусть и дальше растут уровень и темпы научных исследований.
Творческих успехов, высоких результатов, заслуженных наград!

Наш журнал будет рад рассказать о Ваших достижениях и победах, взлетах творческой мысли научному сообществу.

Редакция журнала «Наука в центральной России»

«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

№ 1 (55), 2022 г.

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

Учредитель и издатель журнала:
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» **(ФГБНУ «ВНИИТИН»)**

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА
«НАУКА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ РОССИИ»

ГОЛУБЕВ Иван Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Московской области, зав. Отделом ФГБНУ «Росинформагротех»
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
ЗАЗУЛЯ Александр Николаевич – главный редактор, директор ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор
КАЗАКЕВИЧ Пётр Петрович – заместитель председателя президиума Национальной академии наук Республики Беларусь, член-корреспондент национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, иностранный член РАН
КНЯЗЕВА Лариса Геннадьевна – доктор химических наук, доцент, главный научный сотрудник с возложением обязанностей Ученого секретаря ФГБНУ ВНИИТиН
КОВАЛЕВ Михаил Михайлович – доктор технических наук, заслуженный изобретатель РСФСР, академик российской академии естественных наук, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, научный руководитель ФГБНУ ВНИИМЛ
ЛАРЮШИН Николай Петрович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный работник сельского хозяйства, профессор кафедры ФГБОУ ВО «Пензенский ГАУ»
ЛАЧУГА Юрий Федорович – академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, академик РАН, доктор технических наук, профессор
МАШКОВ Алексей Николаевич – зам. главного редактора, кандидат технических наук, зам. директора по научной работе ФГБНУ ВНИИТиН
МИЩЕНКО Сергей Владимирович – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премии Правительства РФ в области образования, член Национального комитета по теплофизическим свойствам веществ РАН, ФГБОУ ВО ТГТУ
НАГОРНОВ Станислав Александрович – зам. главного редактора, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ ВНИИТиН
СТРЕБКОВ Дмитрий Семенович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заместитель председателя Российского комитета по использованию возобновляемых источников энергии, председатель рабочей группы Европейского бюро ЮНЕСКО по образованию в области солнечной энергии, главный научный сотрудник ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
ФЕДОРЕНКО Вячеслав Филиппович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заместитель директора ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
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: Зазуля А.Н.; заместители главного редактора: Нагорнов С.А., Машков А.Н.
№ 1 (55). Дата выхода в свет 28.02.2022. Тираж - 100 экз. Свободная цена. Подписной индекс 25196.
Адрес редакции и издателя: 392022, Тамбовская обл., г. Тамбов, пер. Ново-Рубежный, д. 28, тел. 8(4752) 44-64-14; e-mail: viitin@mail.ru
Отпечатано в типографии «Студия печати Галины Золотовой». Адрес типографии: 392032, Тамбовская обл., г. Тамбов, ул. Кленовая, д. 24. e-mail: studiapechati@bk.ru.
Печатное издание журнал «Наука в Центральной России Science in the central Russia» 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», 2022

«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
№ 1 (55), 2022 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 – ведущий научный сотрудник лаборатории управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук

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

РЫКОВ Виктор Борисович – главный научный сотрудник отдела механизации растениеводства структурного подразделения «СКНИИМЭСХ» ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», доктор технических наук

ТИШАНИНОВ Николай Петрович – заведующий лабораторией управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор

05.20.03 Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве

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

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

УЛЮКИНА Елена Анатольевна профессор кафедры материаловедения и технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», доктор технических наук, доцент

ХАКИМОВ Рамиль Тагирович – заведующий кафедрой «Автомобили, тракторы и технический сервис» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», доктор технических наук, доцент

ХОХЛОВ Алексей Леонидович – заведующий кафедрой «Эксплуатация мобильных машин и технологического оборудования» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина», доктор технических наук, профессор

ШУВАЛОВ Анатолий Михайлович – главный научный сотрудник лаборатории использования альтернативных источников энергии ФГБНУ ВНИИТиН, доктор технических наук, профессор

ЩЕРБАКОВ Сергей Юрьевич – заведующий кафедрой «Технологические процессы и техносферная безопасность» ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», кандидат технических наук, доцент

© «Наука в центральной России», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Назаров Н.Н., Некрасова И.В.
ВЫБОР ТИПА ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА КОМБИНАТОРНЫМ МЕТОДОМ 5
Завражнов А.И., Балашов А.В., Стрыгин С.П., Пустоваров Н.Ю.
ЛАБОРАТОРНО-СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА, ОБОРУДОВАННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ 13
Завражнов А.И., Дьячков С.В., Ланцев В.Ю., Матушкин П.А.
ПЛОЩАДЬ ФАКЕЛА РАСПЫЛА ФОРСУНКИ И ДАВЛЕНИЯ СТРУИ ПРИ МОЙКЕ МОЛОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 20
Михеев Н.В., Завражнов А.И., Козюков А.В.
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СВЕКЛОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ В ГК РУСАГРО 27
Ерохин Г.Н., Кононовский В.В., Першин И.А.
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ НА УБОРКЕ СОИ 33
Тишанинов Н.П., Емельянович С.В.
ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОДАЧИ ЗЕРНОСМЕСИ В АВТОРЕГУЛИРУЕМЫЙ ТРИЕР С ВЕЛИЧИНАМИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ 41
Афоничев Д.Н., Остриков В.В., Пиляев С.Н.
КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКИ ПНЕВМОКОЛЕСНОЙ МАШИНЫ…… 49
Скорляков В.И., Свиридова С.А.
ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБА УБОРКИ КОЛОСОВЫХ КУЛЬТУР С ВЫГРУЗКОЙ ЗЕРНА НА КРАЮ ПОЛЯ 57
Зазуля А.Н., Макаров В.А., Макарова О.В., Гаспарян С.В.
РОЛЬ ПРОДУКЦИИ ТЕПЛИЧНОГО ХОЗЯЙСТВА В ПОВЫШЕНИИ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УЧРЕЖДЕНИЙ УГОЛОВНО-ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ 64
Мещеряков А.Г., Мещерякова Ю.В., Нагорнов С.А.
РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО СМЕСИТЕЛЯ 71
Ли Р.И., Псарев Д.Н., Киба М.Р., Мельников А.Ю., Быконя А.Н.
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ 81
Иванов Н.М., Иванников А.Б., Крохта Г.М.
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МОТОРНО-ТРАНСМССИОННЫХ УСТАНОВОК МОБИЛЬНЫХ МАШИН ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БРОСОВОЙ ТЕПЛОТЫ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ 92
Шувалов А.М., Машков А.Н.
ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ВАРОЧНОГО КОТЛА С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ 101
Нагдаев В.К., Першин В.Ф., Вигдорович М., Остриков В.В., Сафонов В.В., Алхило Земан Абуд А.А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ УЗЛА ТРЕНИЯ 108
Князева Л.Г., Петрашев А.И., Дорохов А.В., Курьято Н.А., Клепиков В.В.
ЛАКОКРАСОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ОТ КОРРОЗИИ 118
Елькин А.В., Улюкина Е.А., Прохоров А.А.
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЛИНИИ СБОРНО-РАЗБОРНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗГИБАЮЩИХ НАГРУЗОК 134

CONTENTS

Nazarov N., Nekrasova I.
SELECTION OF THE TYPE OF SEEDING APPARATUS BY THE COMBINATORIAL METHOD 5
Zavrazhnov A., Balashov A., Strygin S., Pustovarov N.
LABORATORY RESEARCH OF THE SEEDING DEVICE WITH THE ELECTRIC DRIVE.....13
Zavrazhnov A., Dyachkov S., Lantsev V., Matushkin P.
SPRAY AREA OF THE NOZZLE AND JET PRESSURE WHEN WASHING DAIRY EQUIPMENT.....20
Mikheyev N., Zavrazhnov A., Kozyukov A.
PERFORMANCE INDICATORS OF BEET HARVESTERS AT RUSAGRO GK 27
Erokhin G., Konovskiy V., Pershin I.
PRODUCTIVITY OF COMBINE HARVESTERS FOR HARVESTING SOYBEANS.....33
Tishaninov N., Emelyanovich S.
RELATIONSHIP OF THE SUPPLY OF GRAIN MIXTURE TO THE AUTOADJUSTABLE TRIER WITH THE VALUES OF CONTROL INFLUENCES …….…….…….41
Afonichev D., Ostrikov V., Pilyaev S.
COMPUTER MODEL OF THE ACTIVE SUSPENSION OF AN AIR-WHEELED MACHINE..49
Skorlyakov V., Sviridova S.
ECONOMIC EFFICIENCY OF THE HARVESTING METHOD FORSPIKED CROPS WITH GRAIN UNLOADING AT THE EDGE OF THE FIELD.....57
Zazulya A., Makarov V., Makarova O., Gasparyan S.
THE ROLE OF GREENHOUSE PRODUCTS IN IMPROVING THE FOOD SECURITY OF PENAL INSTITUTIONS …….....64
Meshcheryakov A., Meshcheryakova Y., Nagornov S.
CALCULATION AND INVESTIGATION OF PARAMETERS OF THE ULTRASONIC RADIATOR OF THE COMBINED MIXER 71
Li R., Psarev D., Kiba M., Melnikov A., Bykonya A.
THERMAL CONDUCTIVITY STUDY OF POLYMER NANOCOMPOSITES …….……81
Ivanov N., Ivannikov A., Krochta G.
IMPROVING THE EFFICIENCY OF MOTOR-TRANSMISSION UNITS OF MOBILE MACHINES BY USING THE WASTE HEAT OF EXHAUST GASES…….92
Shuvalov A., Mashkov A.
STUDY OF THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF THE DIGESTER WITH SMOOTH POWER REGULATION 101
Nagdaev V., Pershin V., Vigdorowitsch M., Ostrikov V., Safonov V., Alhilo Zeman Abud A.A.
INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF THE FORMATION OF A CARBON FILM ON THE SURFACE OF THE FRICTION UNIT 108
Knyazeva L., Petrashev A., Dorokhov A., Kuryato N., Klepikov V.
PAINT COATINGS FOR AGRICULTURAL PROTECTION TECHNIQUES FROM CORROSION.118
El`kin A., Ulyukina E., Prokhorov A.
SIMULATION OF THE OPERATION OF A COLLAPSIBLE PIPELINE LINE UNDER THE INFLUENCE OF BENDING LOADS…….…….…134

УДК 631.153.84
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-5-13

ВЫБОР ТИПА ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА КОМБИНАТОРНЫМ МЕТОДОМ

[1]Назаров Николай Николаевич
[1]Некрасова Ирина Владимировна
[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук

Реферат. *Представлены материалы по выбору типа высевающего аппарата для посева зерновых культур комбинаторным методом, основой которого является наличие причинно-следственных связей между эффектами, явлениями (процессами), которые реализуются в определённых условиях и с формой выражения в виде графов. Определена функция на уровне отношений между элементами: устройствами для дозирования, транспортирования и распределения семян на семенном ложе, при которой изменение в одном элементе влечёт изменение в другом при выполнении соответствующих операций с требуемым качеством их исполнения и найден способ, выполняющий заданную функцию с максимальным значением ширины посевной полосы. Установлено наличие положительных и отрицательных эффектов в общем процессе распределения семян на семенном ложе, а результативность положительных взаимосвязей процессов (явлений) возможна в случае, когда их суммарная эффективность больше влияния отрицательных эффектов или самого наихудшего из них. Наиболее значимыми факторами, максимально влияющими на конечный результат формирования ленты посева максимальной ширины являются – наличие микронеровностей на семенном ложе и скорость зернового потока в семяпроводе. Определено, что формирование максимальной ширины ленты посева возможно только при увеличении линейной скорости движения зерновок в семяпроводе, создаваемой, например, высевающим аппаратом центробежного типа, и установке в полапном пространстве посевного рабочего органа дефлектора соответствующей формы (кривизны) для распределения семян. Целесообразно использование совокупного действия инерционно-гравитационных сил для формирования скоростного потока зерновок в семяпроводах для распределения семенного материала в ленте максимальной ширины.*

Ключевые слова: *посев зерновых, семенное ложе, семена, распределение, высевающий аппарат, техническая система, принцип действия, комбинаторный метод*

SELECTION OF THE TYPE OF SEEDING APPARATUS BY THE COMBINATORIAL METHOD

[1]Nikolay Nazarov
[1]Irina Nekrasova
[1]Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences

Abstract. *Materials are presented on the choice of the type of sowing apparatus for sowing grain crops by the combinatorial method, the basis of which is the presence of cause-and-effect relationships between effects, phenomena (processes) that are realized under certain conditions and with the form of expression in the form graph. A function is determined at the level of relations between the elements: devices for dosing, transporting and distributing seeds on the seedbed, in which a change in one element entails a change in another when performing the corresponding operations with the required quality of their execution, and a method is found that performs a given function with the maximum value of the width of the sowing strip. The presence of positive and negative effects in the general process of seed distribution on the seedbed has been established, and the effectiveness of positive interrelations of processes (phenomena) is possible when their total effectiveness is greater than the influence of negative effects or the worst of them. The most significant factors that maximally affect the final result of the formation of the maximum width of the sowing tape are the presence of micro-dimensions on the seedbed and the speed of the grain flow in the seed duct. It is determined that the formation of the maximum width of the seeding belt is possible only with an increase in the linear velocity of the movement of the grains in the*

seed duct, created, for example, by a centrifugal-type seeding apparatus, and the installation of a deflector of the appropriate shape (curvature) in the hollow space of the seeding working organ for seed distribution. It is advisable to use the combined action of inertial-gravitational forces to form a high-speed flow of grains in seed ducts for the distribution of seed material in a maximum width belt.

Keywords: *grain sowing, seedbed, seeds, distribution, seeding apparatus, technical system, operating principle, combinatorial method.*

Введение. Получение устойчивых урожаев зерновых – одна из ключевых задач производства зерна и наиболее ответственное место в ее решении занимает процесс посева, поскольку именно от качества посева зависит становление агрофитоценоза на самых ранних этапах его развития. С современной точки зрения качественным посевом считается укладка семенного материала на заданную глубину и равномерное его распределение по площади питания.

Несмотря на активный поиск путей повышения качества распределения семян на семенном ложе проблема не находит должного разрешения и по-прежнему остается достаточно острой. Более того, она усугубляется расширяющимся распространением широкополосного внутрипочвенного разбросного способа посева зерновых за счёт использования неспециализированных для посева технических средств, например, сеялок-культиваторов. Решение задач, обеспечивающих повышение качества распределения семян на семенном ложе, носит многофакторный характер [1-5], и во многом сдерживается несовершенством и фрагментарностью знаний в отношении распределения семенного материала в ограниченном геометрическими размерами подсошниковом пространстве, а также параметрами системы дозирования и транспортирования семян к месту укладки [6-12].

Цель работы – обосновать тип высевающего аппарата для реализации широкополосного посева семян зерновых.

Научная задача – обосновать принцип действия технической системы, обеспечивающей создание максимальной ширины ленты посева.

Материал и методы исследований. В общем случае процесс посева зерновых представляет собой сложную многофункциональную систему, решение которой достигается как минимум в двух этапах: сначала необходимо найти по заданной функции множество однофункциональных систем, а затем выбрать из них ту, которая имеет мксимальное значение показателя качества.

Дано: функция (отношение между элементами – устройствами для дозирования, транспортирования и распределения семян на семенном ложе), при которой изменение в одном элементе влечёт изменение в другом при выполнении обозначенных операций с требуемым качеством их выполнения.

Найти систему (способ), выполняющую заданную функцию с максимальным значением ширины посевной полосы.

В качестве среды функционирования проектируемой системы выбирается движущийся зерновой поток.

Функция проектируемой системы – создание максимальной ширины ленты посева за счёт использования энергии движущегося зернового потока, что представляется в следующем виде

$$3\text{H}4\text{X}1 \rightarrow \quad 1LX, \tag{1}$$

где 3H4X1 - наличие зернового потока при dV/dt > 0;
1L - увеличение ширины посевной ленты.

Требуется найти варианты принципа действия (ПД) системы, выполняющей заданную функцию.

Под принципом действия системы понимается совокупность физических, химических и т.п. эффектов, согласованное проявление которых обеспечивает выполнение её функции [13]. Эффект – это взаимосвязь между двумя явлениями (процессами), которая реализуется в определённых условиях [14-17]. Материалы представляются в виде графов. Каждая из вершин графа (A_1, A_2,… A_{n-1}, A_n,) может являться и причиной и следствием какого-либо эффекта, которая также определя-

ется через изменение параметра объекта. Это позволяет «отобразить» условия задачи формирования принципов действия на графе эффектов. Для этого зафиксируются две его вершины, одна из которых соответствует среде, а другая — цели функционирования проектируемой системы, а искомые принципы действия будут стоять из эффектов, которые образуют цепи, соединяющие первую вершину со второй, вторую с третьей и т.д., т.е.

$$\mathrm{A}_1 \rightarrow \mathrm{A}_2(U_{1.2}),\ \mathrm{A}_2 \rightarrow \mathrm{A}_3(U_{2.3}),\ \mathrm{A}_3 \rightarrow \mathrm{A}_4\left(U_{3,4}\right), \mathrm{A}_4 \rightarrow \mathrm{A}_7\left(U_{4,7}\right) \quad (2)$$

Из сформированных таким образом множеств однофункциональных систем с учётом соответствующих критериев (качество выполнения технологического процесса (ТП), производительность ТП, удобство в обслуживании, сложность изготовления (затраты труда на изготовление), выбирается наиболее перспективный (эффективный) вариант.

Результаты исследований и их обсуждение. Как известно процесс подачи, транспортировки и распределения семян представляется в следующем виде бункер дозатор ➔(высевающее устройство) ⟶семяпровод ⟶ распределитель семян. Для более углублённого анализа целесообразно представить рассматриваемую систему в виде сетевой модели с использованием теории построения графов [18].

Наличие гравитационной силы ($3H_q$), действующей на зерно (X) в бункере приводит к перемещению этого зерна к высевающему аппарату

$$3H_q \rightarrow 3P7X, \quad (3)$$

Ухудшение качества семенного материала ($2К_сX$) (всхожести семян) приводит к увеличению нормы его высева ($1N_вX$)

$$2К_сX \rightarrow 1N_{в,}X. \quad (4)$$

Увеличение нормы высева семян ($1N_вX$) приводит к увеличению угловой скорости катушки высевающего аппарата ($1W_1V$)

$$1N_в\,X \rightarrow 1W_1V. \quad (5)$$

Увеличение нормы высева семян ($1N_вX$) приводит к увеличению рабочей длины катушки высевающего аппарата (1L V)

$$1N_вX \rightarrow 1LV. \quad (6)$$

Увеличение угловой скорости катушечного высевающего аппарата ($1W_1V$) приводит к увеличению начальной скорости движения зерна в семяпроводе (1WX)

$$1W_1V \rightarrow 1WX. \quad (7)$$

Наличие многорядно установленных на раме рабочих органов ($3B_рX_1$) приводит к увеличению высоты устанавливаемых на раме бункеров ($1B_бX_2$)

$$3B_р\,X_1 \rightarrow 1B_б\,X_2. \quad (8)$$

Увеличение высоты установленных на раме бункеров ($1B_бX_2$) приводит к увеличению угла установки семяпроводов ($1CX_3$)

$$1B_б\,X_2 \rightarrow 1CX_3. \quad (9)$$

Повышение качества изготовления семяпровода ($1К_cV_1$) приводит к увеличению скорости движения семян в нём (1WX)

$$1К_c\, V_1 \rightarrow 1WX. \quad (10)$$

Наличие гравитационной силы ($3H_qX$), действующей на зерно в семяпроводе, приводит к формированию скоростного потока этого зерна (1WX)

$$3H_q\, X \rightarrow 1WX. \quad (11)$$

Наличие кривизны поверхности отражателя (дефлектора) ($3H7V_2$) приводит к перемещению семян по ширине засеваемой полосы (1P7X)

$$3H7V_2 \rightarrow 1P7X. \quad (12)$$

Наличие рабочего органа для создания семенного ложа ($3PO\ V_3$) приводит к наличию микронеровностей на последнем ($3М_кX_4$)

$$3POV_3 \rightarrow 3М_кX_4. \quad (13)$$

Наличие микронеровностей на уплотнённом семенном ложе ($3М_кX_4$) приводит к уменьшению ширины посевной ленты ($2L_шX$)

$$3М_к\, X_4 \rightarrow 2L_шX. \quad (14)$$

Из представленного материала следует, что имеется наличие положительных и отрицательных эффектов в общем процессе распределения семян на семенном ложе. Достижение конечного результата – максимальной ширины ленты посева – возможно в случае, когда суммарная эффективность положительных взаимосвязей процессов (явлений) больше влияния отрицательных эффектов или самого наихудшего из них

Положительные эффекты:

1 – перемещение зерна к высевающему аппарату – 3P7X;

2 – увеличение начальной скорости движения зерна в семяпроводе – 1WX;

3– увеличение угла наклона семяпроводов – $1CX_3$;

4– увеличение скорости движения семян – 1WX;

5– увеличение угловой скорости катушки высевающего аппарата – $1W_1X$;

6– перемещение семян по ширине засеваемой полосы - 1P7X;

7 – создание максимальной ширины ленты посева – 1LX;

Отрицательные эффекты:

1 – увеличение нормы высева семян – $1N_вX$;

2 – увеличение высоты установки бункеров – $1B_бX_2$;

3– наличие микронеровностей на семенном ложе – $3М_кX_4$.

Несмотря на то, что положительных эффектов существенно больше, последний отрицательный эффект оказывает решающее влияние на конечный результат. Поиск технического решения для его устранения (или сглаживания) приводит к значительному усложнению конструкции при низкой эффективности. Поэтому в рамках данного массива эффектов, построение дерева в этом направлении не целесообразно.

Наличие причинно-следственных связей между эффектами приводит в некоторых случаях к противоречиям. Так, ухудшение качества посевного материала приводит к увеличению нормы

высева, что, в свою очередь, приводит к увеличению угловой скорости катушки высевающего аппарата и увеличению начальной скорости зерна. Если последнее является положительным и значимым, то первые показатели нежелательны и не могут служить факторами увеличения начальной скорости движения зерна в семяпроводе.

Увеличение высоты устанавливаемых бункеров на раме сеялки приводит к увеличению угла наклона семяпроводов. В данном случае последнее является положительным и значимым, тогда как первое приводит к увеличению габаритов и металлоёмкости технических средств и также не может служить фактором увеличения начальной скорости движения зерна в семяпроводе. Таким образом, в рамках рассматриваемого массива эффектов построение дерева в этих направлениях не целесообразно.

Наиболее весомым фактором, максимально влияющим на конечный результат, является скорость зернового потока в семяпроводе. Практическое решение задачи сводится в целом к разрешению противостояния $1WX \rightarrow 3M_кX$. Поскольку последнее затруднительно для решения, то наиболее вероятно построение дерева в направлении создания высокоскоростного зернового потока. При этом нужно учитывать, что катушечный высевающий аппарат не обеспечивает это повышение, то необходима разработка технического решения, выполняющего эту функцию.

Увеличение начальной скорости движения зерна в семяпроводе (1WX) можно рассматривать как изменение импульса тела (1PX)

$$1WX \rightarrow 1PX. \tag{15}$$

Изменение импульса тела (увеличение) (1PX) можно рассматривать как изменение (увеличение) скорости ($1W_1X$)

$$1PX \rightarrow 1W_1X. \tag{16}$$

Увеличение скорости движения тела ($1W_1X$) можно рассматривать как действие силы (1FX) для ускорения этого тела при выполнении определённых требований:

1) сила не принадлежит данному телу;
2) это тело должно быть жёстким (упругим);
3) имеется взаимодействие двух тел

$$1FX \rightarrow 1W_1X. \tag{17}$$

Наличие действующей силы (1FX) на зерновой поток можно рассматривать как увеличение количества движения частиц (зерновок) этого потока (1VX)

$$1FX \rightarrow 1VX. \tag{18}$$

Увеличение количества движения частиц (зерновок) (1VX) можно рассматривать как наличие центробежной силы некоторого твёрдого тела, действующего на эти частицы ($3\upsilon^2X$)

$$1VX \rightarrow 3\upsilon^2X. \tag{19}$$

Наличие центробежной силы ($3\upsilon^2X$) можно рассматривать как наличие угловой скорости при вращательном движении ($3\omega V$)

$$3\upsilon^2X \rightarrow 3\omega V.$$

Наличие угловой скорости ($3\omega V$) приводит при соответствующих условиях к увеличению линейной скорости движения тела (зерновок) (1WX)

$$3\omega V \rightarrow 1WX. \quad (20)$$

Увеличение линейной скорости движения тела (зерновок) (1WX) приводит к увеличению ширины засеваемой полосы (1LX).

Таким образом, определен конкретный вариант технического решения для создания повышенной начальной скорости зернового материала в семяпроводе – центробежный тип высевающего аппарата.

При этом время контакта Δ t ограничено углом поворота ротора $\pi/2 < \alpha < 3/2\pi$. Нижняя (направляющая) плоскость воронки устанавливается по касательной движения зерновок после их схода с лопастей. Значения угловых скоростей ротора, линейных скоростей движения зерновок после их схода с лопастей, при которых будет достигаться устойчивая ширина ленты посева от 25 см, должна определяться расчётным и экспериментальным методами при дальнейшем проведении НИР.

С учётом изложенного сетевая модель процесса распределения семян (дерево эффектов процесса распределения семян), максимально учитывающая все взаимосвязи, выглядит следующим образом (рисунок 1),

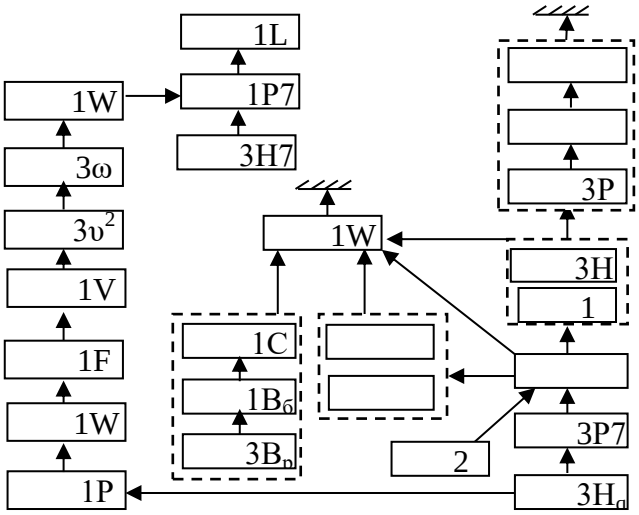


Рисунок 1 - Дерево эффектов процесса распределения семян

где $3H_q$ – наличие гравитационной силы; 3P7X – перемещение зерновок к высевающему аппарату; $2K_cX$ – состояние (ухудшение) качества семян; $1N_вX$ – увеличение нормы высева семян; $1W_1V$ – увеличение угловой скорости катушки высевающего аппарата; 1LV – увеличение длины катушки высевающего аппарата; 1WX – увеличение начальной скорости движения зерна в семяпроводе; $3B_рX_1$ – многорядно установленные на раме рабочие органы; $1B_бX_2$ – увеличение высоты установки бункеров; $1CX_3$ – увеличение угла установки семяпроводов; $1K_cV_1$ – повышение качества изготовления семяпроводов; $3H7V_2$ – наличие кривизны дефлектора; 1P7X – перемещение семян по ширине засеваемой полосы; $3POV_3$ – наличие рабочих органов для создания семенного ложа; $3M_кX_4$ – наличие микронеровностей на семенном ложе; $2L_шX$ – уменьшение ширины посевной ленты; 1PX – изменение импульса тела; 1FX – действие силы для ускорения движения тела; 1VX – увеличение количества движения частиц (зерновок); $3\upsilon^2V$ – наличие центробежной силы; 3ωV – наличие угловой скорости при вращательном движении; 1WX – увеличение линейной скорости движения зерновок; 1LX – увеличение ширины засеваемой полосы.

Тогда вариант принципа действия технической системы, обеспечивающей создание максимальной ширины ленты посева будет выглядеть следующим образом

$3H_q \rightarrow 1PX \rightarrow 1W_1X \rightarrow 1\text{FX} \rightarrow 1\text{VX} \rightarrow 3\upsilon^2 V \rightarrow 3\omega\,\text{V} \rightarrow 1WX \rightarrow 3H7V_2 \rightarrow 1P7X \rightarrow 1LX.$

Выводы.

1.Формирование максимальной ширины ленты посева возможно только при увеличении линейной скорости движения зерновок в семяпроводе и установке в полапном пространстве посевного рабочего органа дефлектора соответствующей формы (кривизны) для распределения семян.

2. Целесообразно использование совокупного действия инерционно-гравитационных сил для формирования скоростного потока зерновок в семяпроводах для распределения семенного материала в ленте максимальной ширины.

Список литературы

1. Оценка эффективности различных типов высевающих сошников при прямом посеве яровой пшеницы в условиях степной зоны Алтайского края / В.И. Беляев [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 8(142). С. 143-148.

2. Беляев В.И. Сравнительная оценка показателей качества работы посевных машин // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018. № 10 (168). С. 124-130.

3. Яковлев Д.А., Беляев В.И., Поляков Г.Н. Обоснование рациональных параметров сошниковой группы сеялки СЗС-2,1 для прямого посева // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 9(179). С. 131-135.

4. Беляев В.И., Прокопчук Р.Е., Буторов Н.А. Влияние режимов работы посевных агрегатов на качество посева, водный режим почвы и урожай яровой пшеницы // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 9(203). С. 114-119.

5. Беляев В.И. Прямой посев на Алтае // Ресурсосберегающее земледелие. 2016. № 2. С. 8-17.

6. Андреева Е.В. Сеялка с гидропневматическим сошником для посева зерновых культур в сухостепной зоне Забайкалья // Инженерно-техническое обеспечение АПК. 2010. № 2. С. 471-479.

7. Комбинированный почвообрабатывающе-посевной агрегат высокопроизводительного посева зерновых и других культур / Н.Д. Лепешкин [и др.] // Вестник Белоруской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 3. С. 181-185.

8. Кистанов Е.И., Ошурков М.В. Переоборудование зерновой сеялки для посева с разновеликими междурядьями // Вестник Нижегородской сельскохозяйственной академии. 2013. Т 3. С. 104-109.

9. Исследования комбинированного сошника для посева семян зерновых культур / В.В. Шумаев [и др.] // Новости науки в АПК. 2018. № 2-2 (11). С. 415-417.

10. Посевной комбайн как средство повышения эффективности посева зерновых культур / В.С. Красовских [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 7 (93). С. 74-79.

11. Зубарев А.Г., Ларюшин Н.П., Шуков А.В. Разработка рабочих органов к зерновой сеялке для посева по ресурсосберегающим технологиям // Наука в Центральной России. 2019. № 3 (39). С. 78-83.

12. Гидаев А.И., Каскулов М.Х., Алоев В.З. Обоснование параметров высевающего аппарата зерновой сеялки для разбросного посева // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 3. С. 8-10.

13. Глазунов В.Н. Поиск принципов действия технических систем: монография. М.: Речной транспорт, 1990. 112 с.

14. А. И. Половинкин [и др.]. Автоматизация поискового конструирования: монография. М.: Радио и связь, 1981. 344 с.

15. Зарипов М.Ф., Зайнуллин Н.Р., Петрова И.Ю.. Энергоинформационный метод научно-технического творчества: монография. М.: ВНИИПИ, 1988. 152 с.

16. Чус А.В., Данченко В.Н Основы технического творчества: монография. Киев-Донецк: Вища школа, 1983. 183 с.

17. Глазунов В.Н. Параметрический метод разрешения противоречий в технике: монография. М.: Речной транспорт, 1990. 148с.

18. Уилсон Р. Введение в теорию графов: монография. М.: Мир, 1977. 208 с.

References

1. Ocenka effektivnosti razlichnyh tipov vysevayushchih soshnikov pri pryamom poseve yarovoj pshenicy v usloviyah stepnoj zony Altajskogo kraya / V.I. Belyaev [i dr.] // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016. № 8(142). S. 143-148.

2. Belyaev V.I. Sravnitel'naya ocenka pokazatelej kachestva raboty posevnyh mashin // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2018. № 10 (168). S. 124-130.

3. YAkovlev D.A., Belyaev V.I., Polyakov G.N. Obosnovanie racional'nyh parametrov soshnikovoj gruppy seyalki SZS-2,1 dlya pryamogo poseva // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2019. № 9(179). S. 131-135.

4. Belyaev V.I., Prokopchuk R.E., Butorov N.A. Vliyanie rezhimov raboty posevnyh agregatov na kachestvo poseva, vodnyj rezhim pochvy i urozhaj yarovoj pshenicy // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021. № 9(203). S. 114-119.

5. Belyaev V.I. Pryamoj posev na Altae // Resursosberegayushchee zemledelie. 2016. № 2. S. 8-17.

6. Andreeva E.V. Seyalka s gidropnevmaticheskim soshnikom dlya poseva zernovyh kul'tur v suhostepnoj zone Zabajkal'ya // Inzhenerno-tekhnicheskoe obespechenie APK. 2010. № 2. S. 471-479.

7. Kombinirovannyj pochvoobrabatyvayushche-posevnoj agregat vysokoproizvoditel'nogo poseva zernovyh i drugih kul'tur / N.D. Lepeshkin [i dr.] // Vestnik Beloruskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. 2021. № 3. S. 181-185.

8. Kistanov E.I., Oshurkov M.V. Pereoborudovanie zernovoj seyalki dlya poseva s raznovelikimi mezhduryad'yami // Vestnik Nizhegorodskoj sel'skohozyajstvennoj akademii. 2013. T 3. S. 104-109.

9. Issledovaniya kombinirovannogo soshnika dlya poseva semyan zernovyh kul'tur / V.V. SHumaev [i dr.] // Novosti nauki v APK. 2018. № 2-2 (11). S. 415-417.

10. Posevnoj kombajn kak sredstvo povysheniya effektivnosti poseva zernovyh kul'tur / V.S. Krasovskih [i dr.] // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2012. № 7 (93). S. 74-79.

11. Zubarev A.G., Laryushin N.P., SHukov A.V. Razrabotka rabochih organov k zernovoj seyalke dlya poseva po resursosberegayushchim tekhnologiyam // Nauka v Central'noj Rossii. 2019. № 3 (39). S. 78-83.

12. Gidaev A.I., Kaskulov M.H., Aloev V.Z. Obosnovanie parametrov vysevayushchego apparata zernovoj seyalki dlya razbrosnogo poseva // Mekhanizaciya i elektrifikaciya sel'skogo hozyajstva. 2008. № 3. S. 8-10.

13. Glazunov V.N. Poisk principov dejstviya tekhnicheskih sistem: monografiya. M.: Rechnoj transport, 1990. 112 s.

14. A. I. Polovinkin [i dr.]Avtomatizaciya poiskovogo konstruirovaniya: monografiya. M.: Radio i svyaz', 1981. 344 s.

15. Zaripov M.F., Zajnullin N.R., Petrova I.YU.. Energoinformacionnyj metod nauchno-tekhnicheskogo tvorchestva: monografiya. M.: VNIIPI, 1988. 152 s.

16. CHus A.V., Danchenko V.N Osnovy tekhnicheskogo tvorchestva: monografiya. Kiev-Doneck: Vishcha shkola, 1983. 183 s.

17. Glazunov V.N. Parametricheskij metod razresheniya protivorechij v tekhnike: monografiya. M.: Rechnoj transport, 1990. 148s.

18. Uilson R. Vvedenie v teoriyu grafov: monografiya. M.: Mir, 1977. 208 s.

Сведения об авторах

Назаров Николай Николаевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института механизации и электрификации сельского хозяйства Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук», Россия, г. Новосибирск, e-mail: sibime-nazarov@yandex.ru.

Некрасова Ирина Владимировна – старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института механизации и электрификации сельского хозяйства Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук», Россия, г. Новосибирск, e-mail: irnek@ngs.ru.

Author credentials

Affiliations

Nikolay Nazarov - Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Siberian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture of the Federal State Budgetary Institution of Science "Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences", Russia, Novosibirsk, e-mail: sibime-nazarov@yandex.ru.

Irina Nekrasova - is a senior researcher at the Siberian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture of the Federal State Budgetary Institution of Science "Siberian Federal Research Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences", Russia, Novosibirsk, e-mail: irnek@ngs.ru.

Поступила в редакцию (Received): 21.01.2022 Принята к публикации (Accepted): 24.02.2022

УДК 631.331.85
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-13-19

ЛАБОРАТОРНО-СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА, ОБОРУДОВАННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

[1,2]Завражнов Анатолий Иванович
[2]Балашов Александр Владимирович
[2]Стрыгин Сергей Петрович
[2]Пустоваров Никита Юрьевич
[1]ФГБНУ ВО Мичуринский государственный аграрный университет
[2]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Высев семян в отдельных высевающих аппаратах прекращается во время работы сеялок точного высева из-за буксования колес или обрыва цепей, при изменении частоты вращения вала вентилятора нарушается стабильность присасывания семян к отверстиям диска высевающего аппарата. В данной работе эти недостатки в работе сеялок предлагается устранить за счет применения электрического привода высевающих аппаратов и вентиляторов, что позволяет обеспечить автономность привода каждого аппарата, не зависящего от условий работы посевного агрегата и стабильность работы вентилятора независимо от изменения частоты вращения ВОМ трактора. Экспериментальные исследования энергетических показателей электрического привода высевающего аппарата проводились в лабораторных условиях на различных культурах (соя, сахарная свекла, подсолнечник). По результатам лабораторно-стендовых исследований определена требуемая мощность на привод одного высевающего аппарата, которая составляет от 30 до 130 Вт, при частоте вращения диска от 10 до 60 об/мин. Была определена суммарная мощность электроприводов всех высевающих аппаратов и вентилятора, которая в зависимости от частоты вращения диска составляет от 1,6 до 2,47 кВт. Сформулировано условие, соблюдение которого позволит исключить вероятность смещения и перекатывания семян по борозде после выпадения их из высевающего диска, вращающегося в обратном направлении перемещению посевного агрегата, при соответствии линейной скорости диска и скорости посевного агрегата (эффект нулевого наложения). Разработан алгоритм управления работой посевным агрегатом с электрическим приводом высевающих аппаратов, интегрированный с установленным в кабине трактора монитором системы контроля высева.*

Ключевые слова: *посев, сеялка, электрический привод, стенд, качество, контроль, управление.*

LABORATORY RESEARCH OF THE SEEDING DEVICE WITH THE ELECTRIC DRIVE

[1,2]Zavrazhnov Anatoly
[2]Balashov Alexander
[2]Strygin Sergei

[2]***Pustovarov Nikita***
[1]*FSBEI HE Michurinsk State Agrarian University*
[2]*FSBSI "All-Russian Research Institute for Use Machinery and Petroleum products in Agriculture"*

Abstract. *Seeding of seeds in individual sowing units stops during the operation of precision seeding planters due to wheel slipping or chain breakage, when the fan shaft speed changes, the stability of the suction of seeds to the holes of the sowing unit disc is disturbed. In this paper, these shortcomings in the operation of seeders are proposed to be eliminated through the use of an electric drive of seeding units and fans, which makes it possible to ensure the autonomy of the drive of each unit, independent of the operating conditions of the sowing unit, and the stability of the fan, regardless of changes in the tractor PTO speed. Experimental studies of the energy parameters of the electric drive of the seeding apparatus were carried out in laboratory conditions on various crops (soy, sugar beet, sunflower). According to the results of laboratory bench tests, the required power for the drive of one seeding machine was determined, which ranges from 30 to 130 watts, at a disk rotation speed from 10 to 60 rpm. The total power of the electric drives of all seeding machines and the fan was determined, which, depending on the speed of rotation of the disk, ranges from 1.6 to 2.47 kW. A condition has been formulated, compliance with which will eliminate the possibility of shifting and rolling seeds along the furrow after they fall out of the sowing disc rotating in the opposite direction to the movement of the sowing unit, in accordance with the linear velocity of the disc and the speed of the sowing unit (zero overlap effect). An algorithm has been developed for controlling the operation of a seeding unit with an electric drive of seeding machines, integrated with a seeding control system monitor installed in the tractor cab.*

Keywords: *sowing, seeder, electric drive, stand, quality, control, management.*

Введение. Для посева пропашных культур в большинстве хозяйствах России используются механические и пневматические сеялки отечественного, и зарубежного производства с механическим приводом рабочих органов, и электронной системой контроля высева семян [1, 2]. Привод высевающих аппаратов сеялок осуществляется от опорно-приводных колес через цепные передачи, валы, коробки передач, а привод вентилятора пневматических сеялок - от ВОМ трактора через систему механических передач. [3] Из-за буксования колес или обрыва цепей прекращается высев семян в отдельных высевающих аппаратах. При изменении частоты вращения вала вентилятора нарушается стабильность присасывания семян к отверстиям диска высевающего аппарата. [4] Эти недостатки в работе сеялок можно устранить за счет применения электрического привода высевающих аппаратов и вентиляторов, что позволяет обеспечить автономность привода каждого аппарата, независимо от условий работы посевного агрегата, а стабильность работы вентилятора – от изменения частоты вращения ВОМ трактора. По оценке специалистов, на сегодняшний день не более 20–25% российских хозяйств используют при точном посеве пропашных культур автоматическое отключение секций сеялки на основе GPS, которое возможно только при применении электрического привода рабочих органов сеялок. [5] Это позволяет управлять нормой высева каждым аппаратом и автоматически их отключать на засеянных участках, а также исключить пересевы на разворотных полосах и клиньях. Применение электрического привода высевающих аппаратов сеялок заменяет элементы механического привода (валы, шестерни, звездочки, цепи и коробки перемены передач) для регулирования нормы высева семян, что позволяет сократить расходы на технологическое и техническое обслуживание посевных агрегатов. [6]

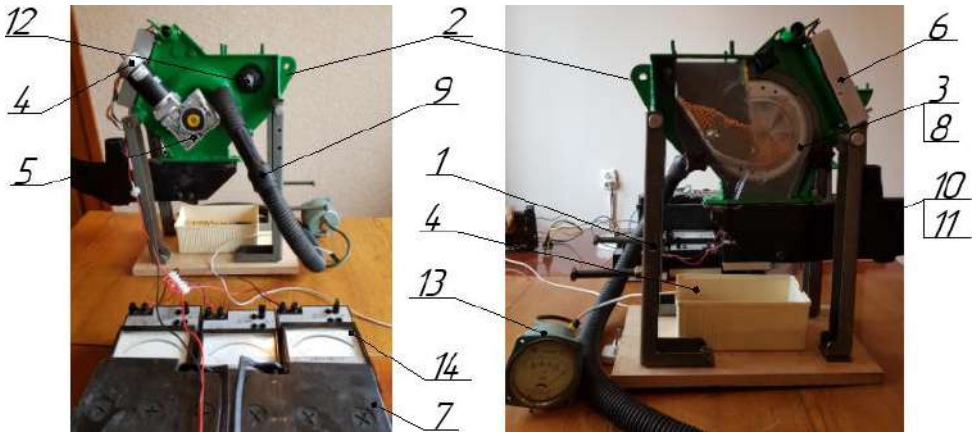
Материалы и методы. Экспериментальные исследования высевающих аппаратов для пропашных культур проводились в лабораторных условиях по разработанной методике [7, 8] на стенде с электрическим регулируемым приводом вращения диска, рисунок 1.

При проведении лабораторно-стендовых исследований фиксировали временные интервалы между выбросами семян из высевающего аппарата с помощью датчика высева, установленного в сошнике, который регистрирует пролёт семян с помощью приставки к компьютеру LPT-порт и передает сигнал через блок преобразования импульса в компьютер [7].

Потребная мощность на привод высевающего аппарата определяется по известной формуле [3, 6]:

$$P_{пр} = \frac{0{,}105 \cdot M \cdot n}{\eta_{пр}}, \quad (1)$$

где M – крутящий момент на валу высевающего диска, Н·м; n – частота вращения высевающего диска, об/мин; $\eta_{пр}$ – КПД электропривода.



1 - рама, 2 - высевающий аппарат, 3- высевающий диск, 4 – электродвигатель, 5 – редуктор, 6 - устройство управления, 7 - источника питания, 8 - семенная камера, 9 - вакуумная установка, 10 – сошник, 11 - датчик высева, 12 - сбрасыватель, 13 – вакуумметром, 14 - амперметр.

Рисунок 1 – Экспериментальный стенд для исследования высевающего аппарата с электрическим приводом вращения диска

После преобразования формул, представленных в [6], получили выражение для определения потребной мощности электропривода вентилятора:

$$P_в = \frac{m \cdot \left(d_c - \sqrt{d_c^2} - \sqrt{d}_{отв}^2\right) \cdot (\omega^2 \cdot R + g) \cdot k_з \cdot k_п \cdot V_в \cdot Z \cdot N}{\delta \cdot d_{отв} \cdot \eta_в \cdot \eta_{пр}}, \quad (2)$$

где m – масса семени, кг; $d_с$ – диаметр семени, м; $d_{отв}$ – диаметр отверстия, м; R – радиус окружности центров отверстий, м; ω – частота вращения высевающего диска, с$^{-1}$; g-ускорение свободного падения, м/с^2; $k_з$ – коэффициент запаса, $k_з$ =1,2; $k_п$ – коэффициент присасывания равен отношению скорости воздуха в отверстии с семенем к скорости воздуха в отверстии без семени, $k_п$ = 0,55-0,72; $V_в$ – скорость воздушного потока в присасывающем отверстии диска, м/с; Z – количество отверстий на высевающем диске, шт.; N – количество высевающих аппаратов на сеялке, шт.; δ – коэффициент пропорциональности, учитывающий суммарное действие различных сил; $\eta_в$ – кпд электропривода вентилятора.

Для исключения вероятности смещения и перекатывания семян по борозде после выпадения их из высевающего диска, вращающегося в обратном направлении перемещению посевного агрегата, линейная скорость диска высевающего аппарата должна соответствовать скорости посевного агрегата [9] (эффект нулевого наложения), т.е. должно соблюдаться следующее условие:

$$n_д \cdot R_д = n_к \cdot R_к, \quad (3)$$

где $n_д, n_к$- частота вращения высевающего диска и опорно-приводного колеса сеялки, соответственно; $R_д, R_к$- радиусы высевающего диска и опорно-приводного колеса сеялки, соответственно.

При этом длина траектории падения семян до борозды должна быть согласована со скоростью посевного агрегата и нормой высева семян по предлагаемому нами уравнению, полученному с учетом скорости падения семян по известным законам изменения дальности полета (расстояние, пройденное телом вдоль горизонтальной оси за определенное время) тела брошенного горизонтально в вертикальном и горизонтальном направлениях, и выражения по определению частоты вращения высевающего диска согласованного с нормой высева семян и скоростью посевного агрегата, представленного в [10]:

$$L = \frac{V_a \cdot k}{l_c \cdot q} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h}{g}}, \quad (4)$$

где V_a- скорость посевного агрегата, м/с; k - отношение диаметров высевающего диска и опорно-приводного колеса сеялки; l_c- расстояние между семенами по длине рядка, м; q - норма высева семян, шт./м; h - высота установки датчика относительно боковой поверхности диска, м; g - ускорение свободного падения, м/с^2.

Результаты и их обсуждения. Экспериментальными исследованиями, установлено, что на привод диска высевающего аппарата сеялки МС-8 диаметром 168 мм от электрического двигателя постоянного тока FL57BLS04 при изменении его частоты вращения от 10 до 60 об/мин, которая соответствует линейной скорости диска от 0,18 до 1,06 м/с, при высеве семян различных пропашных культур, потребуется от 30 до 130 Вт [7] (рисунок 2).

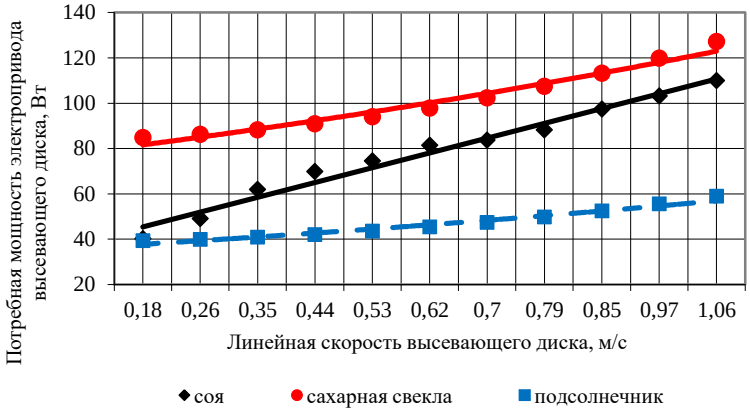


Рисунок 2 – Мощность электродвигателя на привод одного высевающего аппарата, в зависимости от культуры

Численным экспериментом по выражению (2) была определена потребная мощность на привод вентилятора 12-ти рядной сеялки при высеве семян сои в зависимости от указанной частоты вращения диска, которая варьирует от 1,6 до 2,47 кВт. При этом суммарная потребная мощность электрических двигателей постоянного тока, устанавливаемых на сеялку, для привода всех высевающих аппаратов и вентилятора, при посеве сои на агротехнически обоснованной частоте вращения высевающих дисков, обеспечивающую надежное присасывание семян к отверстиям на диске в пределах 20–30 об/мин, составляет не более 3,75 кВт (рисунок 3).

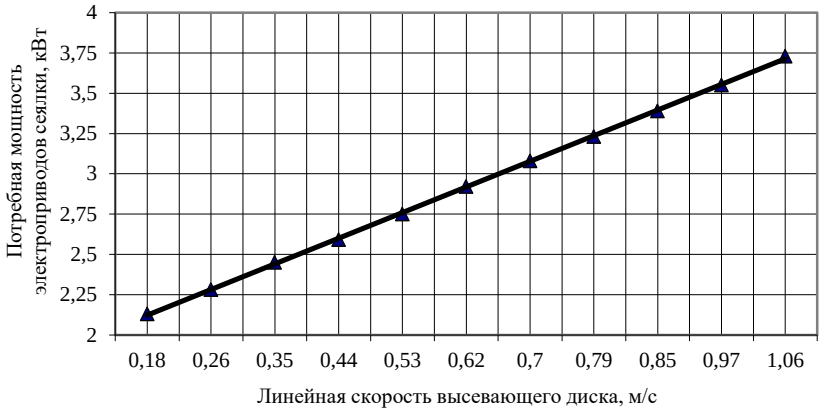


Рисунок 3 – Суммарная мощность электроприводов всех высевающих аппаратов и вентилятора

Управление работой посевным агрегатом с сеялкой с электрическим приводом высевающих аппаратов должно быть интегрировано с установленным в кабине трактора монитором системы

контроля высева и осуществляется по разработанному алгоритму, представленному на рисунке 4, следующим образом.

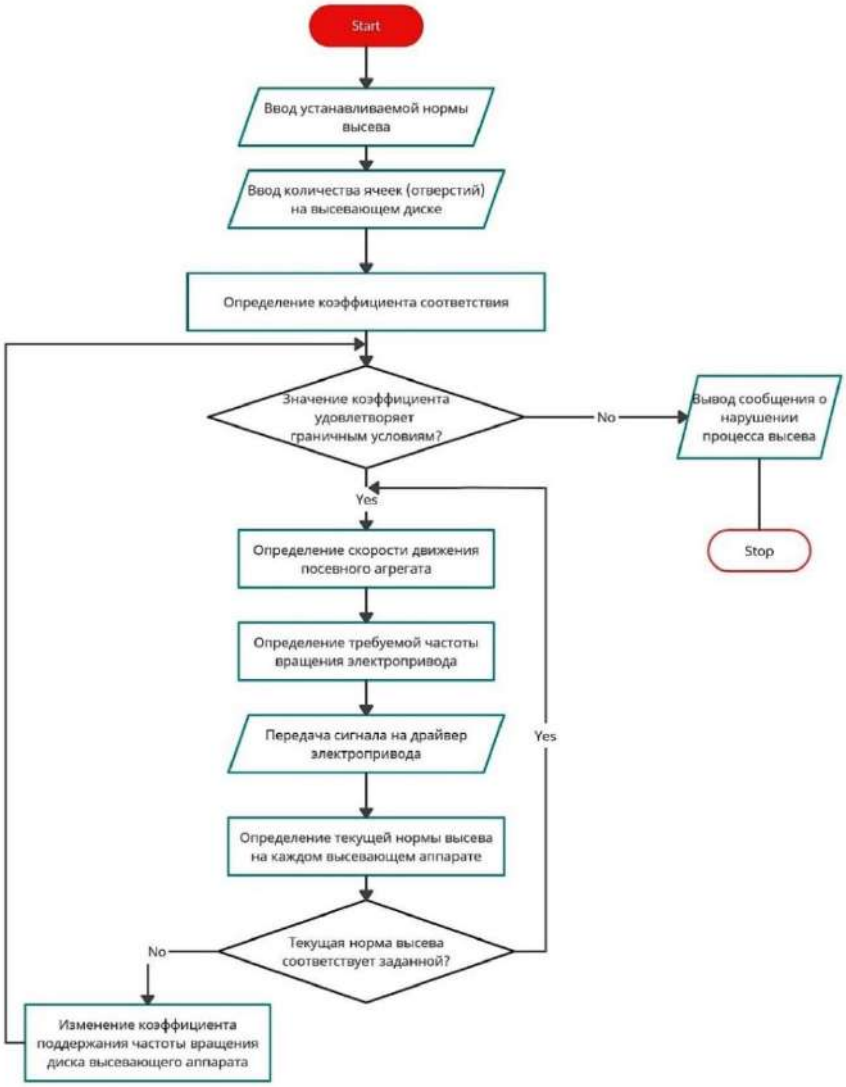


Рисунок 4 - Алгоритм управления работой посевного агрегата с сеялкой, оборудованной электрическим приводом рабочих органов.

В начале работы система контроля высева семян (СКВС) требует ввода устанавливаемой нормы высева, а также ввода количества ячеек (отверстий) на высевающем диске для определения коэффициента соответствия (частоты вращения диска высевающего аппарата и требуемой нормы высева). Далее, после начала движения посевного агрегата происходит опрос датчиков высева каждого высевающего аппарата, и, если текущая норма высева соответствует заданной, то работа высевающих аппаратов продолжается в текущем режиме. В случае, если текущая норма высева отклоняется от заданной, то система контроля высева семян передает на драйвер электрического привода управляющий сигнал, понижающий или повышающий коэффициент соответствия, для сохранения соответствия нормы текущей нормы высева требуемой. Изменение коэффициента соответствия осуществляется в пределах от 0,875 до 1,125 для обеспечения соответствия линейных скоростей семени и посевного агрегата. В случае превышения отклонения коэффициента соответ-

ствия механизатору передается сигнал о превышении отклонений, что требует остановки посевного агрегата для устранения причин неполадок.

Выводы. Электрический привод высевающих аппаратов и вентилятора пропашной сеялки поддерживает стабильность нормы высева семян в каждом рядке и постоянную высокую скорость посевного агрегата, не зависящую от частоты вращения высевающего диска. Применение СКВС обеспечивает высокую точность высева семян каждой секцией и их равномерное распределение вдоль рядка, а также своевременное информирование оператора о возникших технологических отказах сеялки, например, прекращение высева семян одним или несколькими аппаратами и забивание сошников почвой.

Список литературы

1. Kryuchin N.P., Kotov D.N., Andreev A.N., Artamonova O.A. Development and research of seeding devices for selected selfpropelled pneumatic seeder // BIO Web of Conferences 37, 00092 (2021). - https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700092.
2. Завражнов А.И., Балашов А.В., Стрыгин С.П., Пустоваров Н.Ю., Крищенко А.В. Модернизированная система контроля высева семян // Наука в центральной России. Наука в центральной России, №2, (38), 2019. – С. 53–60.
3. Вагин И.В. Повышение качества высева семян зерновых культур пневмосеялкой с электроприводом высевающего аппарата и вентилятора: автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.20.01 – Пенза. – 2010. – 19 с.
4. Wang, S., Yu, Y., Yang, C., Liu, L., Zhang, Y., Zhang, Z., Li, H. Experiment and research of seeding electromechanical control seeding system based on fuzzy control strategy // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. – 2020. - V. 38. - № 1. - P. 453-462. - DOI: 10.3233/JIFS-179419.
5. К 2035 году внедрение технологий точного земледелия в российском растениеводстве достигнет 90% [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.agroinvestor.ru/business-pages/35181-k-2035-godu-vnedrenie (дата обращения: 29.01.2022).
6. Ловкис В.Б., Захаров А.В., Стасюкевич Н.Н., Стасюкевич А.Н. Обоснование и расчет схемы электропривода пневмосеялки агрегата комбинированного почвообрабатывающе-посевного // Механизация и электрификация сельского хозяйства. Межведомственный тематический сборник. Выпуск 50. – Минск, 2016. – С. 193–199.
7. Стрыгин С.П., Крищенко А.В., Завражнов А.А., Дергачев Д.В. Результаты лабораторно-стендовых исследований высевающего аппарата сеялки МС-8 // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2020. № 1 (60). – С. 48–51.
8. Завражнов А.И., Измайлов А.Ю., Пустоваров Н.Ю. Разработка и обоснование параметров ёмкостного датчика высева семян пропашных культур // Сельскохозяйственные машины и технологии, Т. 13, № 2, 2019. – С. 4–9.
9. Василенко В.В., Казаров К.Р., Труфанов В.В., Астанин В.К. Влияние неравномерности интервалов между семенами на урожай сахарной свеклы // Индустриальная технология возделывания сахарной свеклы в Центрально-Черноземной зоне. – Воронеж, 1982. – С. 134-139.
10. Хижняк В.И., Несмиян А.Ю., Авраменко Ф.В. Проектирование и расчет пропашных сеялок: учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию / Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВПО ДГАУ, 2015. – 114 с.

References

1. Kryuchin N.P., Kotov D.N., Andreev A.N., Artamonova O.A. Development and research of seeding devices for selected selfpropelled pneumatic seeder // BIO Web of Conferences 37, 00092 (2021). - https://doi.org/10.1051/bioconf/20213700092.
2. Zavrazhnov A.I., Balashov A.V., Strygin S.P., Pustovarov N.Y., Krishhenko A.V. Modernizirovannaja sistema kontrolja vyseva semjan // Nauka v central'noj Rossii. Nauka v central'noj Rossii, №2, (38), 2019. – S. 53–60.
3. Vagin I.V. Povyshenie kachestva vyseva semjan zernovyh kul'tur pnevmosejalkoj s jelektroprivodom vysevajushhego apparata i ventiljatora : avtoreferat dis. ... kandidata tehnicheskih nauk : 05.20.01 – Penza. – 2010. – 19 c.
4. Wang, S., Yu, Y., Yang, C., Liu, L., Zhang, Y., Zhang, Z., Li, H. Experiment and research of seeding electromechanical control seeding system based on fuzzy control strategy // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. – 2020. - V. 38. - № 1. - P. 453-462. - DOI: 10.3233/JIFS-179419.

5. K 2035 godu vnedrenie tehnologij tochnogo zemledelija v rossijskom rastenievodstve dostignet 90% [Jelektronnyj resurs] / Rezhim dostupa: https://www.agroinvestor.ru/business-pages/35181-k-2035-godu-vnedrenie (data obrashhenija: 29.01.2022).

6. Lovkis V.B., Zaharov A.V., Stasjukevich N.N., Stasjukevich A.N. Obosnovanie i raschet shemy jelektroprivoda pnevmosejalki agregata kombinirovannogo pochvoobrabatyvajushhe-posevnogo // Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva. Mezhvedomstvennyj tematicheskij sbornik. Vypusk 50. – Minsk, 2016. – S. 193–199.

7. Strygin S.P., Krishhenko A.V., Zavrazhnov A.A., Dergachev D.V. Rezul'taty laboratorno-stendovyh issledovanij vysevajushhego apparata sejalki MS-8 // Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2020. № 1 (60). – S. 48–51.

8. Zavrazhnov A.I., Izmajlov A.Y., Pustovarov N.Y. Razrabotka i obosnovanie parametrov jomkostnogo datchika vyseva semjan propashnyh kul'tur // Sel'skohozjajstvennye mashiny i tehnologii, T. 13, № 2, 2019. – S. 4–9.

9. Vasilenko V.V., Kazarov K.R., Trufanov V.V., Astanin V.K. Vlijanie neravnomernosti intervalov mezhdu semenami na urozhaj saharnoj svekly // Industrial'naja tehnologija vozdelyvanija saharnoj svekly v Central'no-Chernozemnoj zone. – Voronezh, 1982. – S. 134-139.

Hizhnjak V.I., Nesmijan A.Y., Avramenko F.V. Proektirovanie i raschet propashnyh sejalok: uchebnoe posobie po kursovomu i diplomnomu proektirovaniju / Zernograd: Azovo-Chernomorskij inzhenernyj institut FGBOU VPO DGAU, 2015. – 114 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

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

Балашов Александр Владимирович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: ntc.agro@yandex.ru

Стрыгин Сергей Петрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: sew1982@gmail.com

Пустоваров Никита Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: ntc.agro@yandex.ru

Author credentials

Affiliations

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

Balashov Alexander – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, 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: ntc.agro@yandex.ru

Strygin Sergei – 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: sew1982@gmail.com

Pustovarov Nikita – 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: ntc.agro@yandex.ru

Поступила в редакцию (Received): 20.01.2022 Принята к публикации (Accepted): 22.02.2022

УДК 637.1:661.185.7
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-20-26

ПЛОЩАДЬ ФАКЕЛА РАСПЫЛА ФОРСУНКИ И ДАВЛЕНИЯ СТРУИ ПРИ МОЙКЕ МОЛОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

[1]Завражнов Анатолий Иванович
[1]Дьячков Сергей Владимирович
[1]Ланцев Владимир Юрьевич
[1]Матушкин Петр Алексеевич
[1]ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»

Реферат. *Создание новых видов молочных продуктов с использованием различных растительных белков и жиров, стабилизаторов, ароматизаторов и красителей приводит к образованию на поверхности технологического оборудования специфических загрязнений, что требует новых знаний о физико-химических принципах адгезии и адсорбции молочных ингредиентов нового поколения. Рассматривали комплексный подход к изучению процесса отделения загрязнений с объяснением факторов, влияющих на эффективность очистки оборудования в процессе пенной мойки. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования площади сечения факела распыла форсунки при мойке молочного оборудования показали, что в значительной степени она зависят от расстояния до поверхности обработки. Выявлено, что струя должна быть такого размера, чтобы охватывать как можно большую часть поверхности при сохранении необходимого давления, но в то же время исключить риск обсеменения соседних поверхностей, что достигается изменением расстояния между форсункой и обмываемой деталью. Установлено, что качество мойки и расход моющей жидкости зависит от угла распыла, давления обмыва, характера воздействия струи на моющую поверхность.Теоретические исследования гидродинамического давления струи моющей жидкости на поверхности обмыва показали, что оно зависит от давления напора и расстояния до сопла форсунки по степенной зависимости. Установка в наконечнике пистолета-распылителя насадки в виде винта приводит к уменьшению времени обмыва и уменьшению количества затраченной жидкости при сохранении качества обмыва.*

Ключевые слова: *молочное оборудование, пенная мойка, форсунка, площадь распыла, гидродинамическое давление струи.*

SPRAY AREA OF THE NOZZLE AND JET PRESSURE WHEN WASHING DAIRY EQUIPMENT

[1]Zavrazhnov Anatoly
[1]Dyachkov Sergey
[1]Lantsev Vladimir
[1]Matushkin Petr
[1]Federal State Budgetary Education Institution of Higher Education Michurinsk State Agrarian University

Abstract. *The creation of new types of dairy products using various vegetable proteins and fats, stabilizers, flavors and dyes leads to the formation of specific contaminants on the surface of technological equipment, which requires new knowledge about the physicochemical principles of adhesion and adsorption of new generation dairy ingredients. An integrated approach to the study of the process of separating contaminants was considered with an explanation of the factors affecting the efficiency of equipment cleaning in the foam washing process. Conducted theoretical and experimental studies of the cross-sectional area of the nozzle spray jet when washing dairy equipment showed that it largely depends on the distance to the treatment surface. It was found that the jet should be of such a size as to cover as much of the surface as possible while maintaining the required pressure, but at the same time to eliminate the risk of contamination of adjacent surfaces, which is achieved by changing the distance between the nozzle and the part to be washed. It was established that the quality of washing and the consumption of washing liquid depend on the spray angle, washing pressure, and the nature of the jet impact on the washing sur-*

face. Theoretical studies of the hydrodynamic pressure of the jet of washing liquid on the washing surface showed that it depends on the head pressure and the distance to the nozzle according to a power law. Installing a nozzle in the form of a screw in the tip of the spray gun leads to a decrease in washing time and a decrease in the amount of liquid spent while maintaining the quality of washing.

Keywords: *dairy equipment, foam washing, nozzle, spray area, hydrodynamic pressure of the jet.*

Введение. Производство молочной продукции высокого качества с длительным сроком хранения является одной из важнейших проблем производства молока в условиях рыночной экономики.

Высокий уровень развития молочной отрасли отражается сопровождается внедрением высокотехнологичного оборудования для переработки сырого молока, значительное увеличение номенклатуры новых асептических машин и др.. Наряду с совершенствованием технологического оборудования, создаются новые виды молочных продуктов (йогурты, пасты, пудинги, желе, масла, спреды, сгущенное молоко и др.) с использованием различных растительных белков - жиров, стабилизаторов, ароматизаторов - красителей.

Все это приводит к появлению особых загрязнений, требующих нового понимания физико-химических принципов, в основе которых лежит адгезия молочных компонентов нового поколения и абсорбция на поверхностях технологического оборудования.

В целом организовать эффективную пенную мойку оборудования в пищевой промышленности непросто. Ее решение требует комплексного подхода к изучению процесса удаления загрязнений с учетом факторов, влияющих на эффективность промывки.

Однако известные теоретические и экспериментальные исследования не учитывают возможности и перспективы технологии пенной мойки, особенно ее применения на молочных заводах и предприятиях, производящих различные продукты с использованием различных растительных белков, жиров, стабилизаторов, пигментов [1, 2, 3, 4, 5]:

Целью проведенных исследований является повышение эффективности пенной мойки на молокоперерабатывающих предприятиях малой и средней мощности за счет оптимизации технологических режимов мойки.

Условия, материалы и методы. Теоретические зависимости, характеризующие качество мойки, были сформулированы на основе известных законов физики и теоретической механики.

При проведении экспериментальных исследований применялись общеизвестные методики и разработанные на их базе – частные. Экспериментальные исследования проводились с использованием электронных и механических установок и приборов. Обработка экспериментальных данных проводилась методом математической статистики.

Результаты и обсуждение. Объёмная схема теоретического факела распыла форсунки при мойке молочного оборудования представлена на рисунке 1.

Ширину струи по мере удаления от форсунки определим согласно расчетной схеме (рисунок 2).

$$\frac{B/2-B_0/2}{l} = tg\frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

Откуда:

$$B = B_0 + 2ltg\frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

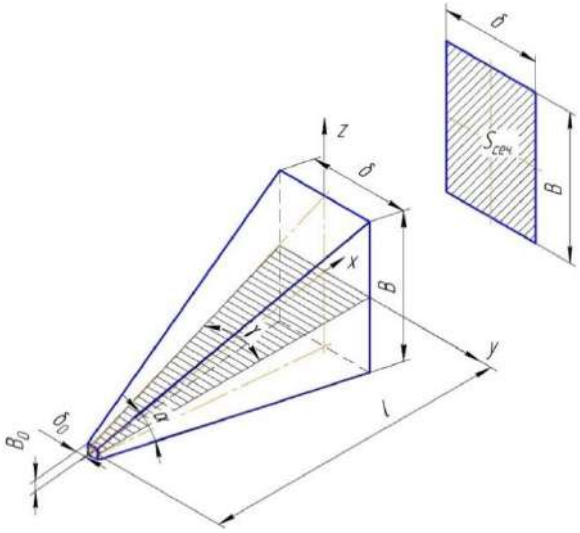
Толщину струи определим согласно расчетной схемы (рисунок 3)

$$\delta = \delta_0 + 2ltg\frac{\gamma}{2} \quad (3)$$

$$S_{\text{сеч}} = \delta \cdot B$$

Тогда, с учетом выражений 2 и 3:

$$S_{\text{сеч}} = \left(B_0 + 2ltg\frac{\alpha}{2}\right) \cdot (\delta_0 + 2ltg\frac{\gamma}{2}) = B_0\delta_0 + 2l(B_0 tg\frac{\gamma}{2} + \delta_0 tg\frac{\alpha}{2} + 2ltg\frac{\alpha}{2}tg\frac{\gamma}{2} \quad (4)$$



α – угол распыла, рад; *l* – расстояние от сопла форсунки до преграды, м; *B* – теоретическая ширина струи, м; *δ* – теоретическая толщина струи (ширина сопла форсунки), м, B_0– ширина щели форсунки, м

Рисунок 1– Объёмная схема теоретического факела распыла форсунки высокого давления

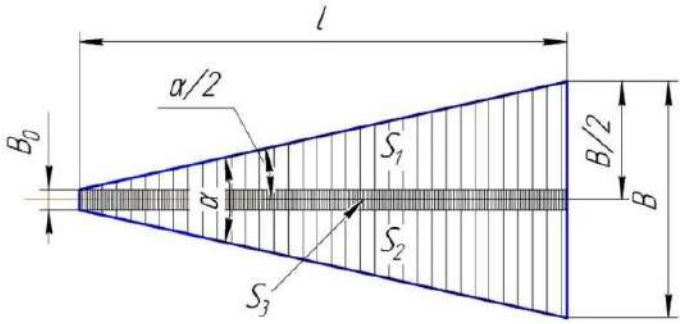


Рисунок 2 – К определению ширины струи *B* (плоскость *xz*)

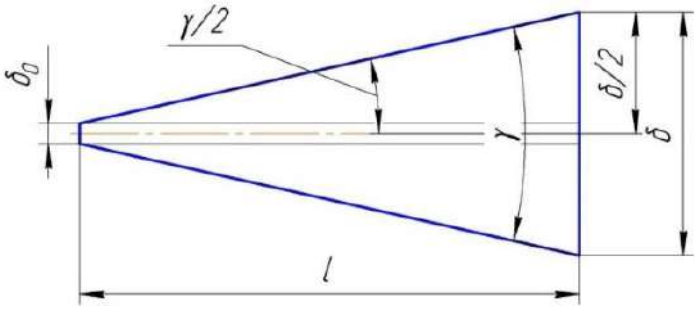
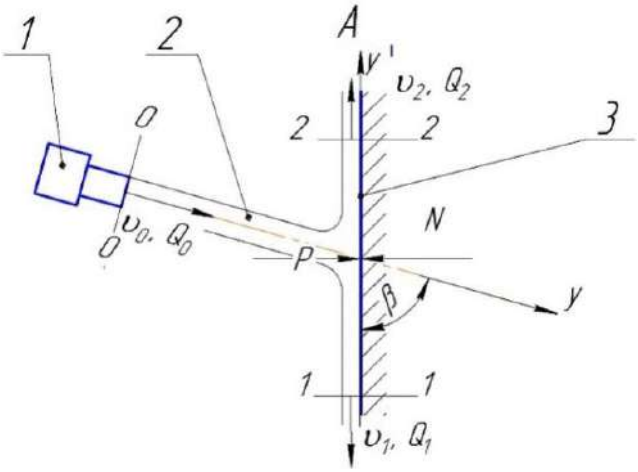


Рисунок 3 - К определению толщины струи δ в плоскости *xy*

При воздействии струи моющей жидкости на поверхность сила давления определится произведением гидродинамического давления на площадь пятна контакта. Для определения силы воспользуемся теоремой количества движения - изменение количества движения *Δmυ* равно импульсу внешних сил *ΔF*, приложенных в выделенному участку потока:

$$\Delta F = \Delta m\vartheta \quad (5)$$

Рассмотрим действие потока моющей жидкости на загрязненную поверхность при угле поворота β форсунки в плоскости *xy* (рисунок 4):



1 – форсунка, 2 – струя моющей жидкости, 3 – загрязненная поверхность
Рисунок 4 – Схема воздействия струи моющей жидкости объект

Струи моющей жидкости во фронтальной плоскости *zx* из щелевой форсунки высокого давления направляются на балку под углом α, называемом факелом распыла.

Жидкость вытекает из форсунки с расходом Q_0 и скоростью υ_0. Со стороны поверхности возникает противодействующая сила *N*, равная силе давления жидкости *P* и направленная в противоположную сторону [6, 7].

Изменение количества движения $\Delta m\vartheta$ за время *dt* в проекции на ось *y* определится по следующей зависимости:

$$\Delta m\vartheta = (m_1\vartheta_1 cos\beta - m_2\vartheta_2 cos\beta) - m_0\vartheta_0 \quad (6)$$

где $m_0\vartheta_0$,$m_1\vartheta_1$и $m_2\vartheta_2$, – проекции количества движения жидкости на ось *y* в сечениях 0 – 0, 1 – 1 и 2 – 2 соответственно.

Импульс внешних сил за время *dt* будет равен:

$$\Delta F = -Nsin\beta dt \quad (7)$$

Тогда:

$$-Nsin\beta dt = m_1\vartheta_1 cos\beta - m_2\vartheta_2 cos\beta - m_0\vartheta_0 \quad (8)$$

Учитывая, что$\frac{m}{dt} = \frac{\rho V}{dt} = \rho Q$, где ρ – плотность жидкости, кг/м^3, *V* – объем жидкости, м^{3}получим

$$Nsin\beta = \rho(Q_0\vartheta_0 - Q_1\vartheta_1 cos\beta + Q_2\vartheta_2 cos\beta) \quad (9)$$

Из условия неразрывности потока расход моющей жидкости в сечении 0 – 0 за время *dt* будет равен сумме расходов в сечениях 1 – 1 и 2 – 2:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \quad (10)$$

Для определения расходов жидкости в сечениях 1 – 1 и 2 – 2 составим уравнение количества движения относительно оси $y^{\prime}$ (см. рис. 4).

Так как силы *P* и *N*перпендикулярны выбранной оси, то проекции этих сил будут равны нулю. Тогда:

$$0 = \rho(Q_0\vartheta_0 cos\beta - Q_1\vartheta_1 + Q_2\vartheta_2) \quad (11)$$

Отсюда

$$Q_0 cos\beta = Q_1 - Q_2 \quad (12)$$

$$Q_0 = \frac{Q_1 - Q_2}{cos\beta} \quad (13)$$

С учетом (10) определим значения Q_1и Q_2:

$$Q_1 = \frac{Q_0(1+cos\beta)}{2} \quad (14)$$

$$Q_2 = \frac{Q_0(1-cos\beta)}{2} \quad (15)$$

Подставив полученные значения в уравнение 9, и учитывая, что из условия неразрывности потока скорости в сечениях 0 – 0, 1 – 1 и 2 – 2 равны, получим:

$$Nsin\beta = \rho(Q_0\vartheta_0 - \frac{Q_0(1+cos\beta)}{2}\vartheta_0 cos\beta + \frac{Q_0(1-cos\beta)}{2}\vartheta_0 cos\beta) \quad (16)$$

Преобразовав, получим

$$Nsin\beta = \rho Q_0 \vartheta_0 sin^2\beta$$

Так как $Q_0 = \vartheta_0 S_0$, сила давления жидкости выходящей из сопла форсунки будет равна:

$$N = \rho\frac{Q_0^2}{S_0}sin\beta \quad (17)$$

Или $$N = \rho S_0 \vartheta_0^2 sin\beta$$

Гидродинамическое давление струи P_y (Н/м^2), определяется выражением:

$$P_y = \rho_l \vartheta^2 sin\beta \quad (18)$$

где ϑ – скорость потока в момент соударения с преградой, м/с;

ρ_l – средняя плотность жидкости на расстоянии l от форсунки

Средняя плотность жидкости на расстоянии l от форсунки определим через коэффициент аэрации k:

$$\rho_l = \frac{\rho_ф}{k} \quad (19)$$

$\rho_ф$ – плотность моющей жидкости на выходе из форсунки, кг/м^3 ($\rho_ф = 1000$ кг/м^3)

$$k = \frac{S_{сеч}}{S_0} = \frac{B_0\delta_0 + 2l(B_0 tg\frac{\gamma}{2} + \delta_0 tg\frac{\alpha}{2} + 2ltg\frac{\alpha}{2}tg\frac{\gamma}{2})}{B_0\delta_0} = 1 + \frac{2l(B_0 tg\frac{\gamma}{2} + \delta_0 tg\frac{\alpha}{2} + 2ltg\frac{\alpha}{2}tg\frac{\gamma}{2})}{B_0\delta_0} \quad (20)$$

Тогда гидродинамическое давление струи на объект примет вид:

$$P_y = \frac{\rho_ф \vartheta^2 B_0\delta_0}{B_0\delta_0 + 2l(B_0 tg\frac{\gamma}{2} + \delta_0 tg\frac{\alpha}{2} + 2ltg\frac{\alpha}{2}tg\frac{\gamma}{2})} sin\beta \quad (21)$$

Среднюю скорость потока в струе на расстоянии l можно приближенно считать равной начальной скорости потока ϑ_0, м/с:

$$\vartheta = \vartheta_0 = \varphi\sqrt{2gH}$$

На рисунке 5 отражена теоретическая зависимость давления жидкости на объект мойки в зависимости от расстояния до загрязненной поверхности. Видно, что чем ближе расположена форсунка к поверхности тем выше давление струи.

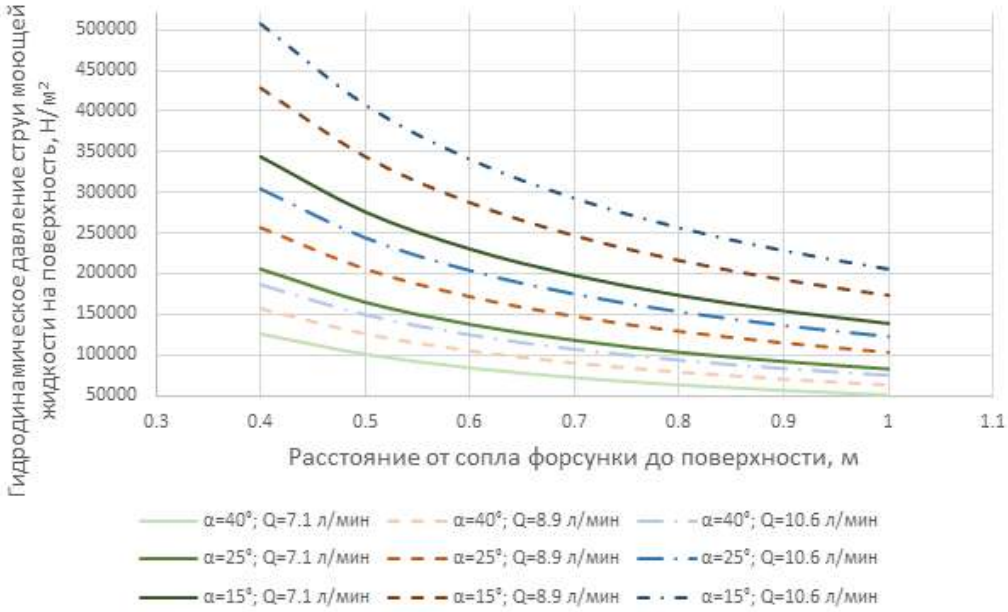


Рисунок 5 - Зависимость гидродинамического давления от расстояния l при различных углах факела распыла α=40°, α=25°, α=15°

Качество мойки и расход моющей жидкости зависит не только от угла распыла и давления обмыва, но и от характера воздействия струи на моющую поверхность.

В процессе экспериментов вместо плоскофакельной форсунки на пистолет-распылитель была поставлена насадка, в которой установлена завяхряющая винтовая вставка, имеющего один оборот спирали. В результате этого на выходе струя моющей жидкости имела вращательное движение и попадала на поверхность по касательной. Эффект такого воздействия был положительный: время мойки и расход жидкости снижались при качестве мойки, отвечающим техническим требованиям (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты эксперимента действия разных форсунок при обмыве поверхности.

Тип форсунки	Объект исследований	Температура жидкости, ^{0}С	Давление ополаскивания, кг/см^2	Время ополаскивания, мин.	Кол-во потраченной воды, л	Показания КМАФАнМ, КОЕ/см^2 до начала ополаскивания	Показания КМАФАнМ, КОЕ/см^2 после окончания ополаскивания
Плоскофакельная (стандарт)	Бактофага Альфа-Лаваль	38	3,0	3	10	Сплошной рост	1110
Со шнековой вставкой (тестовый образец)	Бактофага Альфа-Лаваль	38	3,0	2,5	8	Сплошной рост	660

Выводы. На основании исследований установлено, что:

1. размеры площади сечения факела распыла в значительной степени зависят от расстояния до поверхности обработки. Струя должна быть такого размера, чтобы охватывать как можно большую часть поверхности при сохранении необходимого давления, но в то же время исключить риск обсеменения соседних поверхностей, что достигается изменением расстояния между форсункой и обмываемой деталью;
2. гидродинамическое давление струи моющей жидкости на поверхности обмыва зависит от давления напора и расстояния до сопла форсунки по степенной зависимости;
3. установка в наконечнике пистолета-распылителя насадки в виде винта приводит к уменьшению времени обмыва и уменьшению количества затраченной жидкости при сохранении качества обмыва.

Список литературы

1. Белозеров Д.А. Мойка и дезинфекция - факторы, определяющие качество готового продукта. Молочная промышленность, 2003 - 63 с.

2. Меры санитарной обработки молочных линий/ Матвеев В.Ю.// Вестник НГИЭИ, 2017. - №3 (70). - С. 32-40.

3. Обоснование внедрения автоматической системы управления качеством очистки молочного оборудования/ Бигбашев М.Ю.// В сборнике: Научные труды студентов Ижевской ГСХА. ФГБОУ ВО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия». Ижевск, 2021. - С. 1191-1194.

4. Силовые взаимодействия частиц загрязнений с поверхностью молокопровода/ Керученко Л.С., Троценко В.В., Кулаева А.Г., Союнов А.С., Троценко И.В.// Вестник Омского государственного аграрного университета, 2019. - №3 (35). - С. 94-101.

5. Способы мытья молочных танков/ Емельянов Д.В.// В сборнике: Научные труды студентов Ижевской ГСХА. сборник статей: электронный ресурс. ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА. Ижевск, 2018. - С. 431-434.

6. Теоретические предпосылки к исследованию устройства гидродинамической мойки элементов дорожных ограждений/ Дьячков С.В., Соловьев С.В., Ланцев В.Ю., Бахарев А.А., Абросимов А.Г.// Научная жизнь, 2019. - Т. 14. - №5 (93). - С. 666-674.

7. Guardrail hydrodynamic washing machine/ Dyachkov S.V., Solovyov S.V., Lantsev V.Y., Bakharev A.A., Abrosimov A.G.// International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019. - Т.9. - №1. - С. 4520-4526.

References

1. Belozerov D.A. Mojka i dezinfekciya - faktory, opredelyayushchie kachestvo gotovogo produkta. Molochnaya promyshlennost', 2003 - 63 s.
2. Mery sanitarnoj obrabotki molochnyh linij/ Matveev V.YU. // Vestnik NGIEI, 2017. - №3 (70). - S. 32-40.
3. Obosnovanie vnedreniya avtomaticheskoj sistemy upravleniya kachestvom ochistki molochnogo oborudovaniya/ Bigbashev M.YU. // V sbornike: Nauchnye trudy studentov Izhevskoj GSKHA. FGBOU VO «Izhevskaya gosudarstvennaya sel'skohozyajstvennaya akademiya». Izhevsk, 2021. - S. 1191-1194.
4. Silovye vzaimodejstviya chastic zagryaznenij s poverhnost'yu molokoprovoda/ Keruchenko L.S., Trocenko V.V., Kulaeva A.G., Soyunov A.S., Trocenko I.V.// Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2019. - №3 (35). - S. 94-101.
5. Sposoby myt'ya molochnyh tankov/ Emel'yanov D.V.// V sbornike: Nauchnye trudy studentov Izhevskoj GSKHA. sbornik statej: elektronnyj resurs. FGBOU VO Izhevskaya GSKHA. Izhevsk, 2018. - S. 431-434.
6. Teoreticheskie predposylki k issledovaniyu ustrojstva gidrodinamicheskoj mojki elementov dorozhnyh ograzhdenij/ D'yachkov S.V., Solov'ev S.V., Lancev V.YU., Baharev A.A., Abrosimov A.G.// Nauchnaya zhizn', 2019. - T. 14. - №5 (93). - S. 666-674.
7. Guardrail hydrodynamic washing machine/ Dyachkov S.V., Solovyov S.V., Lantsev V.Y., Bakharev A.A., Abrosimov A.G.// International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2019. - T.9. - №1. - S. 4520-4526.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

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

Дьячков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических машин и основ конструирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск.

Ланцев Владимир Юрьевич - доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспортно-технологических машин и основ конструирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: lan-vladimir@yandex.ru.

Матушкин Петр Алексеевич – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск.

Author credentials

Affiliations

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

Dyachkov Sergey Vladimirovich – Ph.D., Department of Transport and Technological Machines and Design Fundamentals of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Michurinsk State Agrarian University", Russia, Michurinsk.

Lantsev Vladimir Yurievich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Transport and Technological Machines and Design Fundamentals of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Michurinsk State Agrarian University", Russia, Michurinsk, e-mail: lan-vladimir@yandex.ru.

Matushkin Petr Alekseevich – post-graduate student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk.

Поступила в редакцию (Received): 16.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022

УДК 338.43
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-27-32

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СВЕКЛОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ В ГК РУСАГРО

[1]Михеев Николай Владимирович
[1]Завражнов Андрей Анатольевич
[1]Козюков Артём Викторович
[1]ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»

Реферат. *На урожайность, объемы производства и технико-экономические показатели работы технологических машин наибольшее влияние оказывают природно-климатические риски, обусловленные колебаниями погодных условий. Выявлены два направления снижения затрат на уборку сахарной свеклы: снижение стоимости топлива, изыскание способов и технических средств снижающих износ выкапывающих рабочих органов. При работе свеклоуборочных комбайнов, по данным ВНИИСС, качество уборки в большей степени определяется влажностью почвы. Наилучшими условиями выполнения технологического процесса рабочими органами свеклоуборочных машин является влажность почвы 19-25 %. Для определения влияния природно-климатических условий на эксплуатационные показатели работы свеклоуборочных комбайнов с вибрационными лемешными копачами проводился полевой учет выработки комбайнов и расход горючего. Двухлетние наблюдения за эксплуатацией комбайнов HOLMER T4-40 и Grimme Maxtron II 620 в ГК РусАгро Тамбовской области показали, что в засушливый 2020 год. по сравнению с 2019, замена вибрационных копачей производилась в три раза чаще. Повышение твердости почвы в засушливый год на 20 % привело к снижению сменной выработки свеклоуборочных комбайнов на 15,2-23,4 % и увеличению удельного расхода топлива на 18,7-27,0 %. Добиться повышения технико-экономических показателей работы свеклоуборочных комбайнов можно за счет совершенствования технологического процесса и модернизации рабочих органов.*

Ключевые слова: *государственная программа, твердость почвы, эксплуатация свеклоуборочных комбайнов, сменная выработка, удельный расход топлива, технологический процесс, модернизация.*

PERFORMANCE INDICATORS OF BEET HARVESTERS AT RUSAGRO GK

[1]Mikheyev Nikoly
[1]Zavrazhnov Anatoly
[1]Kozyukov Artem
[1]FSBEI HE "Michurinsky State Agrarian University"

Abstract. *Natural and climatic risks caused by fluctuations in weather conditions have the greatest impact on yields, production volumes and technical and economic performance of technological machines. Two directions of reducing the cost of harvesting sugar beet have been identified: reducing the cost of fuel, finding ways and technical means to reduce the wear of digging working bodies. The quality of harvesting is largely determined by soil moisture during the operation of beet harvesters, according to VNIISS. The best conditions for the execution of the technological process by the working bodies of beet harvesters is the soil moisture of 19-25%. Field accounting of the production of combines and fuel consumption was carried out to determine the influence of natural and climatic conditions on the operational performance of beet harvesters with vibrating ploughshares. Two-year observations of the operation of the HOLMER T4-40 and Grimme Maxtron II 620 combines in RusAgro Group of Companies in the Tambov region showed that in the dry 2020. compared to 2019, the replacement of vibrating diggers was carried out three times more often. An increase in soil hardness in a dry year by 20% led to a decrease in the shift output of beet harvesters by 15.2-23.4% and an increase in specific fuel consumption by 18.7-27.0%. It is possible to achieve an increase in the technical and economic performance of beet harvesters by improving the technological process and modernizing the working bodies.*

Keywords: *state program, soil hardness, operation of beet harvesters, shift production, specific fuel consumption, technological process, modernization*.

Введение. В государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия Тамбовской области на 2013-2020 годы, в подпрограмме «Развитие свеклосахарного производства…» заложено увеличение сбора сахарной свеклы в 2,2 раза, а площади её посевов в 1,8 раза. Одним из приоритетов получения запланированных результатов обозначена комплексная модернизация материально-технической базы свеклосахарного подкомплекса области. Подпрограмма предусматривает приобретение сельскохозяйственной техники и технологического оборудования для производства сахарной свеклы. Уделяется внимание мерам по снижению возможных потерь доходов при производстве этой культуры [1]. Утверждается, что наибольшее влияние оказывают природно-климатические риски, обусловленные колебаниями погодных условий. Именно они оказывают большое влияние не только на урожайность и объёмы производства сахарной свеклы, но и на технико-экономические показатели работы комплекса технологических машин, в том числе и свеклоуборочных комбайнов. Для снижения рисков от природно-климатических условий необходимы переход к новым технологиям, техническая модернизация и мелиорация земель, а также дополнительные меры поддержки сельхозпроизводителей.

Материалы представленные в статье, получены в рамках реализации Соглашения №075-11-2019-041 от 22 ноября 2019 г. между Министерством науки и высшего образования Российской Федерации и ПАО «Миллеровосельмаш» на выполнение НИОКТР по теме «Создание высокотехнологичного производства многофункциональных комплексов для посева и возделывания пропашных и овощных культур в системе «точного» и «нулевого» земледелия на базе интеллектуальных мехатронных модулей». НИОКТР выполняется в организации Головного исполнителя (ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ).

Опыт эксплуатации свеклоуборочных комбайнов с вибрационными копачами в ГК РусАгро Тамбовской области [2] за сезон 2019 показал, что износ рабочих органов не привел к их замене. Работа в засушливый 2020 год, при увеличении твердости почвы, вынудила осуществить замену рабочих органов этих комбайнов трижды, то есть произошло увеличение износа на 300%. Таким образом, снижение износа рабочих органов и повышение надежности работы комбайнов в условиях засухи и повышения твердости почвы является актуальной задачей. Для её решения необходимо совершенствование технологии и технических средств уборки корнеплодов сахарной свеклы.

Основные затраты на уборку сахарной свеклы приходятся на топливо и запасные части свеклоуборочной техники, то есть просматриваются два направления снижения затрат. Это, во-первых, снижение стоимости топлива, а во-вторых, изыскание способов и технических средств снижающих износ выкапывающих рабочих органов. Вопрос снижения стоимости топлива пытаются решить на современном этапе переводом двигателей на альтернативные виды топлива, в частности перевод дизельных двигателей на газодизельный цикл [3] или водно-дизельную смесь [4]. Перевод техники на газодизель позволит добиться снижение затрат на топливо, увеличении ресурса двигателя машины, повышение экологических показателей. Однако здесь возникают проблемы с модернизацией двигателей, что пока неприемлемо для фирм производителей техники, сложностью организацией заправок и хранения альтернативного топлива. Применения водно-дизельной смеси может привести, к уменьшению расхода топлива, увеличению экологических показателей, при этом мощностные показатели остаются на уровне исходных. Но встаёт вопрос о практическом применение данной технологии в производстве. ДВС свеклоуборочного комбайна работает в очень тяжелых условиях, и достаточно трудно будет разработать систему питания, которая обеспечит требуемое соотношение подачи водно-дизельной смеси в камеру сгорания, для достижения оптимальных показателей ДВС. С другой стороны водно-дизельная смесь создает вероятность окисления поверхностей элементов топливной системы и цилиндропоршневой группы при осаждении водного конденсата. Поэтому наиболее перспективным на наш взгляд является направление совершенствования технологического процесса и рабочих органов свеклоуборочных комбайнов.

По данным ВНИИСС качество уборки в большей степени определяется влажностью почвы. Для достижения высших показателей качества выполнения технологического процесса рабочими органами свеклоуборочных машин требуется влажность почвы, составляющая 19-25 % [5].

Результаты и обсуждение. Для определения влияния природно-климатических условий на эксплуатационные показатели работы двух типов свеклоуборочных комбайнов (рис.1а - HOLMER T4-40 с вибрационными лемешными копачами; рисунок 1б - Grimme Maxtron II 620 с дисковыми копачами), проводился полевой учет выработки комбайнов и расход горючего. В эти же дни проводились замеры влажности и твердости почвы (таблица 1). Результаты наблюдений показывают, что в 2019 году влажность изменялась с 26,9% до 24,2%, а твердость почвы соответственно с 1,9 МПа до 3,0 МПа, в 2020 году влажность изменялась с 21,2% до 16,7%, а твердость почвы соответственно с 2,8 МПа до 3,6 МПа. Соответственно снизилась средняя выработка комбайнов за смену с 27,47 га до 23,28 га (HOLMER T4-40, таблица 2) и с 27,94 га до 21,39 га (Grimme Maxtron II 620, таблица 3), и возрос абсолютный и средний удельный расход топлива с 30,85 л/га до 36,61 л/га (HOLMER T4-40) и с 29,17 л/га до 37,2 л/га (Grimme Maxtron II 620). Кроме того участилась необходимость замены лемешковых копачей из-за их износа и поломки.

а)

б)

Рисунок 1. Выкапывающие рабочие органы свеклоуборочных комбайнов

Таблица 1 - Физико-механические свойства почвы при выкопке корнеплодов.

№ поля	Дата	Показатели твердости почвы, Мпа	Показатель влажности %
ТМ.0012	03.09.2019	1.9	25.6
ТМ.0012	05.09.2019	2.1	24.9
ТМ.0012	07.09.2019	2.2	24.2
ТМ.0022	11.09.2019	2.5	25.5
ТМ.0022	13.09.2019	2.3	25.1
ТМ.0035	22.09.2019	3	26.9
ТМ.0035	27.09.2019	2.9	26.4
ТМ.0015	03.09.2020	2.9	20.1

ТМ.0015	05.09.2020	2.8	21.2
ТМ.0015	07.09.2020	3.1	19.8
ТМ.0001	11.09.2020	3.2	18.1
ТМ.0001	13.09.2020	3	17.9
ТМ.0031	22.09.2020	3.4	16.7
ТМ.0031	27.09.2020	3.6	16.9

Таблица 2 - Показатели работы свеклоуборочного комбайна HOLMER T4-40

Дата	HOLMER T4-40 выроботка, га/смену	Расход топлива, л/смену	Удельный расход топлива л/га
03.09.2019	30,32	870	28,69
05.09.2019	29,63	895,22	30,23
07.09.2019	29,96	875,32	29,2
11.09.2019	25,11	790,11	31,46
13.09.2019	24,11	801,32	33,22
22.09.2019	25,11	790,32	31,61
27.09.2019	28,11	882,32	31,5
среднее за 7 суток	**27,47**	**843**	**30,85**
03.09.2020	22,85	806,33	38,27
05.09.2020	19,74	772,32	39,1
07.09.2020	19	802,33	42,21
11.09.2020	22,12	846,33	38,45
13.09.2020	27,89	923,01	33,09
22.09.2020	28,06	844,33	30,66
27.09.2020	27,3	910,62	33,7
среднее за 7 суток	**23,28**	**844,32**	**36,61**

Таблица 3 - Показатели работы свеклоуборочного комбайна Maxtron II 620

дата	Maxtron II 620 выроботка, га/смену	Расход топлива, л/смену	Удельный расход топлива л/га
03.09.2019	29,23	846,52	28,94
05.09.2019	31,23	899,65	28,81
07.09.2019	25,32	755,36	29,83
11.09.2019	26,11	674,96	25,85
13.09.2019	29,65	860,11	29
22.09.2019	23,01	740,11	32,12
27.09.2019	31,03	921,52	29,69
среднее за 7 суток	**27,94**	**813,12**	**29,17**
03.09.2020	20,94	754,21	36,01
05.09.2020	19,74	730,23	36,99
07.09.2020	18,12	700,32	38,64
11.09.2020	22,36	803,22	35,92
13.09.2020	24,65	860,11	34,88
22.09.2020	22,36	940,32	42,05
27.09.2020	21,9	800,31	36,54
среднее за 7 суток	**21,39**	**798,12**	**37,2**

Заключение. Таким образом, эксплуатация комбайнов показала, что в засушливые годы повышается твердость почвы почти на 20%, а это приводит к снижению сменной выработки свеклоуборочных комбайнов на 15,2-23,4% и увеличению удельного расхода топлива на 18,7-27,0%. То есть совершенствованием технологического процесса и технических средств можно реально добиться повышения технико-экономических показателей работы свеклоуборочных комбайнов.

Список литературы

1. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия Тамбовской области на 2013-2020 годы. Постановление Администрации Тамбовской области от 22.01.2013 г. №43.

2. Михеев Н.В. Уборка сахарной свеклы в условия твердых почв в центральной России на примере ГК РусАгро /Михеев Н.В., Козюков А.В.// Электронный журнал Наука и Образование. Том 3, № 4. Мичуринск. 01.12.2020

3. Козюков А.В. Дизельный двигатель транспортно-технологических машин и альтернативное топливо/Михеев Н.В., Козюков А.В. //Тенденции развития агропромышленного комплекса глазами молодых ученых: Материалы научно-практической конференции с международным участием 2 марта 2018 года. – Рязань: Издательство: Рязанский государственный агротехнологический университет, 2018. С.84-89

4. Борисов С.В. Многотопливная система питания дизельного двигателя внутреннего сгорания / Борисов С.В., Князев С.И., Афонин Д.В., Шаповалов А.А., Ломовских А.Е.// Сборник материалов Международной НПК посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима

Мироновича. «Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения». Ч. I. 6 апреля 2017 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. С. 348-353.

5. http://mcx-consult.ru/page1508072009.

References

1. Gosudarstvennaya programma razvitiya sel'skogo hozyajstva i regulirovanie rynkov sel'sko-hozyajstvennoj produkcii, syr'ya i prodovol'stviya Tambovskoj oblasti na 2013-2020 gody. Postanovlenie Administracii Tambovskoj oblasti ot 22.01.2013 g. №43.

2. Miheev N.V. Uborka saharnoj svekly v usloviya tverdyh pochv v central'noj Rossii na primere GK RusAgro /Miheev N.V., Kozyukov A.V.// Elektronnyj zhurnal Nauka i Obrazovanie. Tom 3, №4. Michurinsk. 01.12.2020

3. Kozyukov A.V. Dizel'nyj dvigatel' transportno-tekhnologicheskih mashin i al'ternativnoe toplivo/Miheev N.V., Kozyukov A.V. //Tendencii razvitiya agropromyshlennogo kompleksa glazami molodyh uchenyh: Materialy nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem 2 marta 2018 goda. – Ryazan': Izdatel'stvo: Ryazanskij gosudarstvennyj agrotekhnologicheskij universitet, 2018. S.84-89

4. Borisov S.V. Mnogotoplivnaya sistema pitaniya dizel'nogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya / Borisov S.V., Knyazev S.I., Afonin D.V., SHapovalov A.A., Lomovskih A.E.// Sbornik materialov Mezhdunarodnoj NPK posvyashchennoj 115 godovshchine so dnya rozhdeniya professora Haritonchika Efima Mironovicha. «Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya mobil'nyh energeticheskih sredstv v razlichnyh rezhimah dvizheniya». CH. I. 6 aprelya 2017 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2017. S. 348-353.

5. http://mcx-consult.ru/page1508072009.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Михеев Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: mikheyev@mgau.ru.

Завражнов Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, начальник Инжинирингового центра Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, email: noc-inteh@yandex.ru

Козюков Артем Викторович – аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск.

Authors credentials

Affiliations

Mikheev Nikolai – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk, e-mail: mikheyev@mgau.ru.

Andrey Zavrazhnov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Engineering Center of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk, email: noc-inteh@yandex.ru

Kozyukov Artem – post-graduate student of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Michurinsk State Agrarian University”, Russia, Michurinsk.

Поступила в редакцию (Received): 08.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022

УДК 631.354
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-33-41

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ НА УБОРКЕ СОИ

[1]Ерохин Геннадий Николаевич,
[1]Коновский Валерий Викторович,
[1]Першин Илья Александрович
[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *Оценка производительности зерноуборочных комбайнов на уборке сои производилась на примере сельхозпредприятий Тамбовской области. Исходные данные получены хронометражем контрольных смен. Комбайны марок РСМ 161 и Acros 595Plus использовались с жатками «Float Stream» с плавающим ножом и низким срезом. Ширина жатки была соответственно 9 м и 7 м. Производительность по основному времени комбайна РСМ 161 на уборке сои сорта «Аляска» составила 5,44 т/ч, на уборке сои сорта «Пруденс» - 8,0 т/ч. Для комбайна Acros 595 Plus эти показатели составили соответственно 4,31 т/ч и 6,94 т/ч. На уборке сои сорта «Лиссабон» работали комбайны с жатками 7 м. Комбайн КЗС-1218А-1 с обычной зерновой жаткой показал производительность по основному времени 10,24 т/ч. Производительность комбайнов КЗС-1218-29, которые применяли модернизированные под низкий срез жатки, находилась в интервале 6,79…7,07 т/ч. Потери сои за комбайном КЗС-1218А- 1 доходили до 14% и были в 3 раза выше комбайнов КЗС-1218-29. Мониторинг подтвердил работоспособность на уборке сои комбайнов с барабанной молотилкой. При нормальных условиях уборки они могут обеспечить качественные показатели технологического процесса уборки сои. В зависимости от условий комбайны обеспечивали производительность по основному времени 3,1…4,6 га/ч, по эксплуатационному времени – 1,9…3,1 га/ч. Все наблюдаемые комбайны на уборке сои работали с неполной загрузкой молотилки. В зависимости от урожайности комбайны были загружены на 30-40%. Ограничивает загрузку молотилки низкая рабочая скорость 4…6 км/ч, которая необходима для качественной работы соевых жаток на низком срезе. В противном случае возрастают потери за жаткой не срезанными бобами. Получено, что на уборке сои урожайностью до 30 ц/га нет необходимости использовать мощные высокопроизводительные комбайны.*

Ключевые слова: *зерноуборочный комбайн, соя, производительность, урожайность.*

PRODUCTIVITY OF COMBINE HARVESTERS FOR HARVESTING SOYBEANS

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

Abstract. *Evaluation of the productivity of combine harvesters for harvesting soybeans was carried out on the example of agricultural enterprises of the Tambov region. The initial data were obtained by timing control shifts. Combines of the PCM 161 and Acros 595Plus brands were used with Float Stream headers with a floating knife and a low cut. The header width was 9 m and 7 m, respectively. The main time productivity of the PCM 161 combine for harvesting soybeans of the Alaska variety was 5.44 t/h, for harvesting soybeans of the Prudence variety - 8.0 t/h. For the Acros 595 Plus combine, these figures were 4.31 t/h and 6.94 t/h, respectively. Combine harvesters with headers of 7 m were used to harvest soybeans of the Lisbon variety. The KZS-1218A-1 combine with a conventional grain header showed a main time productivity of 10.24 t/h. The productivity of combine harvesters KZS-1218-29, which used headers modernized for low cut, was in the range of 6.79 ... 7.07 t / h. Soybean losses behind the KZS-1218A-1 combine reached 14% and were 3 times higher than the KZS-1218-29 combine. The monitoring confirmed the performance of combines with a drum thresher in soybean harvesting. Under normal harvesting conditions, they can provide quality indicators of the soybean harvesting process. Depending on the conditions, the harvesters provided productivity of 3.1…4.6 ha/h in terms of the main time, and 1.9…3.1 ha/h*

in terms of operating time. All observed soybean harvesters were operating with a partial thresher load. Combine harvesters were loaded by 30-40% depending on the yield. The loading of the thresher is limited by the low operating speed of 4…6 km/h, which is necessary for the high-quality operation of soybean headers on a low cut. Otherwise, the losses behind the harvester with uncut beans increase. It was found that there is no need to use powerful high-performance combines for harvesting soybeans with a yield of up to 30 c/ha.

Keywords: *combine harvester, soybean, productivity, yield.*

Введение. Производство сои в Российской Федерации в последние годы развивается стремительными темпами. Посевная площадь, занятая соей увеличилась во всех федеральных округах. Наибольший рост имел место в Центральном округе, где посевная площадь в 2019 году составила более 1 млн. га.

В 2020 году в Тамбовской области было засеяно 138 тысяч гектаров сои, а валовый сбор составил почти 253 тысячи тонн. По итогам 2020 года область была третьей по производству сои в Центральном округе и шестой среди производителей страны. В 2021 году в Тамбовской области собран урожай сои более 330 тысяч тонн с площади свыше 180 тысяч гектаров.

Соя является культурой очень требовательной к условиям и проведению уборки [1].Уборка сои проводится обычными зерноуборочными комбайнами. Опыт эксплуатации комбайнов в сельхозпредприятиях показывает, что на уборке сои даже в примерно одинаковых условиях они работают с различной производительностью. Это во многом обуславливается типом применяемой жатки. В настоящее время зерноуборочные комбайны для уборки сои используют обычные зерновые жатки, модернизированные зерновые жатки под низкий срез и специальные соевые жатки низкого среза. В работе была поставлена задача – исследовать производительность зерноуборочных комбайнов на уборке сои с различными типами жаток на примере сельхозпредприятий Тамбовкой области.

Материалы и методы. Производительность зерноуборочного комбайна на уборке сои в соответствии с [2,3] оценивалась показателями:

- производительность за час основного времени;
- производительность за час сменного времени;
- производительность за час эксплуатационного времени.

Производительность за час основного времени определяется выражением [4,5]:

$$W_1 = \frac{F}{T_1}, \quad (1)$$

где W_1 - производительность зерноуборочного комбайна за 1 ч основного времени, т/ч;

F - намолот сои комбайном за контрольную смену, т;

T_1 - время основной работы в течение контрольной смены, ч.

Производительность за час сменного времени находится по формуле:

$$W_{CM} = \frac{F}{T_{CM}}, \quad (2)$$

где W_{CM} - производительность за час сменного времени, т/ч;

T_{CM} - сменное время работы комбайна, ч.

Затраты сменного времени равны [2]:

$$T_{CM} = T_1 + T_{21} + T_{22} + T_{23} + T_{31} + T_{32} + T_{56} + T_{41}, \quad (3)$$

где T_{CM} - затраты сменного времени, ч;

T_{21} - время на выполнение поворотов в конце загонки, ч;

T_{22} - время на разгрузку зерна в транспортное средство, ч;

T_{23} - время на переезд к месту разгрузки зерна и обратно, ч;

T_{31} - время на технологические регулировки, ч;

T_{32} - время на техническое обслуживание, ч;

T_{56} - время на отдых и холостые переезды, ч;

T_{41} - продолжительность устранения технологических отказов, ч.

Производительность за час эксплуатационного времени определяется отношением [6,7]:

$$W_{ЭК} = \frac{F}{T_{ЭК}}, \quad (4)$$

где $W_{ЭК}$ - производительность по эксплуатационному времени, т/ч;

$T_{ЭК}$ - продолжительность эксплуатационного времени работы комбайна, ч.

Продолжительность эксплуатационного времени определяется суммой:

$$T_{ЭК} = T_{CM} + T_{42}, \quad (5)$$

где T_{42} - продолжительность устранения технических отказов, ч;

Таким образом, формулы (1) - (5) дают возможность определить основные показатели производительности зерноуборочных комбайнов на уборке сои. Исходные данные получали хронометражем элементов времени работы комбайнов в течение контрольных смен.

В течение контрольной смены за каждым комбайном фиксировались затраты времени на: основную работу, повороты, выгрузку зерна, переезд к месту выгрузки и обратно, технологическую настройку и регулировку, техническое обслуживание, отдых и холостые переезды, устранение технологических отказов. Затраты времени на устранение технических отказов принимались по результатам наблюдений за надежностью комбайнов в реальных условиях эксплуатации [8,9]. По результатам взвешивания определялся сменный намолот каждого комбайна (наработка, ц). Рабочая скорость контролировалась по компьютеру, установленному в комбайне.

Результаты и обсуждение. Для определения производительности зерноуборочных комбайнов на уборке сои был проведён хронометраж в двух хозяйствах Тамбовской области. Первое – это СПК «Русь» Сампурского района, где соей было занято 260 га. На уборке сои применялись два зерноуборочных комбайна марок «РСМ 161» и «Acros 595 Plus», оборудованные жатками «Float Stream» с плавающим ножом и предназначенные для уборки с низким срезом.

Комбайн «РСМ 161» - высокопроизводительный агрегат с мощным двигателем 360 л.с. Отличительной особенностью комбайна является система обмолота TETRA Processor, включающая молотильный барабан диаметром 800 мм и барабан сепаратор диаметром 750 мм. Работал с жаткой«Float Stream» шириной 9 м (рисунок 1).

Комбайн «Acros 595 Plus» имеет классическую молотильную систему барабанного типа. Снабжен двигателем мощностью 325 л.с. Работал с жаткой «Float Stream» шириной 7 м.

Комбайны убирали сою сортов «Аляска» и «Пруденс». «Аляска» - раннеспелый сорт с высоким содержанием протеина. Высота растений до 60 см, нижний боб прикреплен на высоте 11см. Урожайность была 12 ц/га. «Пруденс» показал урожайность 22 ц/га. Высота растений до 80 см, устойчив к полеганию и растрескиванию бобов, высота прикрепления нижнего боба - 14 см. На полях была проведена десикация сои. Условия проведения уборочных работ и результаты хронометража приведены в таблице 1.

Используя полученные исходные данные, были определены показатели производительности комбайнов на уборке сои (таблица 2).

Анализ таблицы 2 показывает, что комбайны «РСМ 161» и «Acros 595 Plus» работали вне зависимости от урожайности в диапазоне скоростей 5,1 - 5,8 км/ч. Ограничение скорости было вызвано использованием соевых жаток в режиме гибкого ножа. Производительность по основному времени комбайна «РСМ 161» с 9-ти метровой жаткой на уборке сои сорта «Аляска» составила 5,44 т/ч, на уборке сои сорта «Пруденс» - 8,0 т/ч. Для комбайна «Acros 595 Plus» с 7-ми метровой жаткой эти показатели составили соответственно 4,31 т/ч и 6,94 т/ч.

Производительность по эксплуатационному времени была ниже производительности по основному времени для комбайна «РСМ 161» в среднем в 1,42 раза, для комбайна «Acros 595 Plus» - 1,36 раза.

Ограничения скоростного режима соевыми жатками и сравнительно небольшая масса сои по урожайности и соломистости привели к тому, что используемые потенциально высокопроизводительные комбайны работали с очень низкой загрузкой молотилки [10].

Таблица 1 – Условия и результаты хронометража производительности комбайнов в СПК «Русь»

Сельхозпредприятие	СПК "Русь"	СПК "Русь"	СПК "Русь"	СПК "Русь"
Дата	14.09.2021	14.09.2021	15.09.2021	15.09.2021
Марка комбайна	РСМ 161	Acros 595 Plus	РСМ 161	Acros 595 Plus
Зав.номер	161001074	595022626	161001074	595022626
Год выпуска	2021	2019	2021	2019
Марка жатки	Float Stream 900	Float Stream 700	Float Stream 900	Float Stream 700
Ширина жатки, м	9	7	9	7
Культура	соя	соя	соя	соя
Сорт	Аляска	Аляска	Пруденс	Пруденс
Урожайность, ц/га	12	12	18	18
Длина гона, м	2000	2000	2000	2000
Соломистость	1,4	1,4	1,3	1,3
Влажность зерна, %	12		11	11
Влажность сломы, %	15	15	14	14
Полеглость, %	2	2	2	2
Засоренность, %	2	2	2	2
Наработка: ц	234	204	342	306
Основное время, ч	4,303	4,734	4,274	4,407
Время на повороты, ч	0,220	0,250	0,160	0,190
Время на выгрузку зерна, ч	0,075	0,092	0,110	0,126
Время на переезд к месту выгрузки и обратно, ч	0,149	0,131	0,217	0,227
Время на технологическую настройку, ч	0,112	0,162	0,090	0,132
Время на техническое обслуживание, ч	0,451	0,510	0,384	0,451
Время на отдых и холостые переезды, ч	0,631	0,550	0,551	0,496
Время на устранение технологических отказов, ч	0,108	0,080	0,107	0,110
Время на устранение технических отказов, ч	0,426	0,553	0,423	0,515

Таблица 2 - Результаты оценки производительности комбайнов в СПК «Русь»

Дата	14.09.2021	14.09.2021	15.09.2021	15.09.2021
Марка комбайна	РСМ 161	Acros 595 Plus	РСМ 161	Acros 595 Plus
Сменное время, ч	6,049	6,505	5,893	6,140
Эксплуатационное время, ч	6,474	7,058	6,315	6,655
Рабочая скорость, км/ч	5,3	5,4	5,2	5,8

Производительность по основному времени, т/ч	5,44	4,31	8,00	6,94
Производительность по основному времени, га/ч	4,53	3,59	4,45	3,86
Производительность по сменному времени, т/ч	3,87	3,14	5,80	4,98
Производительность по сменному времени, га/ч	3,22	2,61	3,22	2,77
Производительность по эксплуатационному времени, т/ч	3,61	2,89	5,42	4,60
Производительность по эксплуатационному времени, га/ч	3,01	2,41	3,01	2,55

На рисунке 1 показана фактическая загрузка наблюдаемых комбайнов на уборке сои.

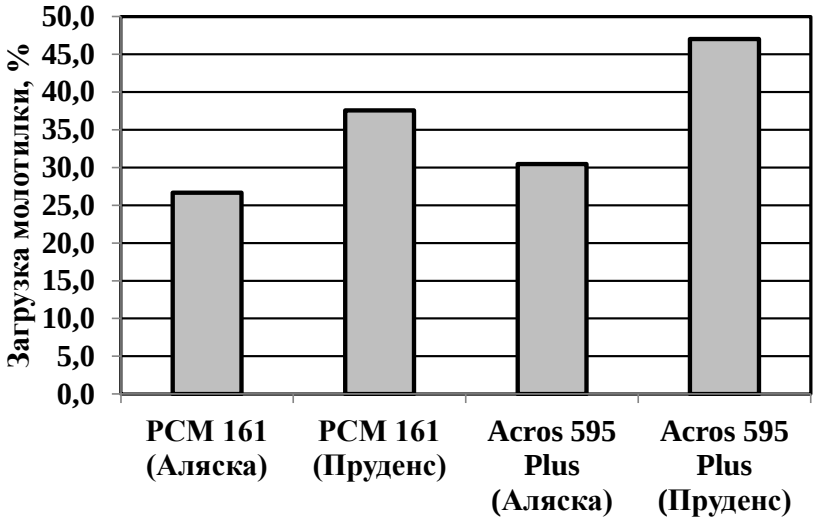


Рисунок 1 – Фактическая загрузка молотилки комбайнов при уборке сои в ООО «Русь»

Как видно из рисунка 1, комбайн «РСМ 161» работал на первом поле (сорт Аляска) с загрузкой молотилки 26,5%, комбайн «Acros 595» - с загрузкой 30,8%. На втором более урожайном поле (сорт Пруденс) загрузка составила соответственно 37,2% и 47,6%.

Второе сельхозпредприятие, где проводилась оценка производительности комбайнов на уборке сои, было МФП «Нива» Тамбовского района. Здесь хронометраж проводился на поле, засеянном соей сорта «Лиссабон». Это раннеспелый сорт с высотой растений 70-80 см, устойчив к полеганию и растрескиванию бобов, высота прикрепления нижнего стручка 12-13 см. В хозяйстве десикация не проводилась, урожайность составила 22 ц/га. Уборка сои выполнялась четырьмя комбайнами: один КЗС-1218А-1 и три комбайна КЗС-1218-29. Это комбайны компании Гомсельмаш с молотилкой барабанного типа. Снабжены барабаном ускорителем и имеют достаточно мощный двигатель 330 л.с.

Комбайн КЗС-1218А-1 новый, работал первый сезон. На уборке сои с ним использовалась жатка, предназначенная для уборки зерновых культур. Остальные три комбайна работали с зерновыми жатками, которые были модернизированы под низкий срез. Уборка сои сорта « Лиссабон» проводилась 5 дней, за время наблюдений не было технологических отказов, технические отказы устранялись в течение 30 - 50 минут. Условия проведения уборочных работ и результаты хронометража представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Условия и результаты хронометража в ООО «Нива» при уборке сои «Лиссабон»

Сельхозпредприятие	ООО МФП "Нива"	ООО МФП "Нива"	ООО МФП "Нива"	ООО МФП "Нива"
Дата	16.09.2021	16.09.2021	16.09.2021	16.09.2021
Марка комбайна	КЗС-1218А-1	КЗС-1218-29	КЗС-1218-29	КЗС-1218-29
Зав.номер	17334	12666	14534	15263
Год выпуска	2020	2012	2014	2016
Марка жатки	ЖЗК-7	ЖЗК-7 (м)	ЖЗК-7 (м)	ЖЗК-7 (м)
Ширина жатки, м	7	7	7	7
Урожайность сои, ц/га	22	22	22	22
Длина гона, м	1000	1000	1000	1000
Соломистость	1,1	1,1	1,1	1,1
Влажность зерна/ соломы, %	13/15	13/15	13/15	13/15
Полеглость, %	1	1	1	1
Засоренность, %	3	3	3	3
Наработка: ц	462	275	281	301
Основное время, ч	4,511	4,051	3,980	4,377
Время на повороты, ч	0,320	0,220	0,190	0,240
Время на выгрузку зерна, ч	0,190	0,113	0,120	0,151
Время на переезд к месту выгрузки и обратно, ч	0,264	0,229	0,250	0,240
Время на технологическую настройку и регулировку, ч	0,090	0,101	0,100	0,110
Время на техническое обслуживание, ч	0,403	0,451	0,510	0,044
Время на отдых и холостые переезды, ч	0,584	0,590	0,480	0,510
Время на устранение технологических отказов, ч	0	0,100	0,100	0
Время на устранение технических отказов, ч	0,446	0,676	0,360	0,730

С использование полученных исходных данных была проведена оценки производительности комбайнов в ООО МФП «Нива» (таблица 4).

Из приведенных данных таблицы 4 видно, что комбайн КЗС-1218А-1, с чисто зерновой жаткой, показал производительность по основному времени 10,24 т/ч. Это в среднем на 48% выше производительности остальных комбайнов КЗС-1218-29, которая находилась в интервале 6,79 - 7,07 т/ч.

Данная ситуация объясняется тем, что комбайн КЗС-1218А-1 с зерновой жаткой работал на высоком срезе и имел более высокую рабочую скорость 7 км/ч против 4,6…4,8 км/ч у остальных комбайнов КЗС-1218-29. Однако, потери сои за комбайном КЗС-1218А- 1 доходили до 14% и были в 3 раза выше комбайнов КЗС-1218-29. Производительность по эксплуатационному времени для комбайна КЗС-1218А-1составила 6,79 т/ч, для комбайнов КЗС-1218-29 - 4,2…4,7 т/ч.

Таблица 4 - Результаты оценки производительности комбайнов в ООО «Нива»

Марка комбайна	КЗС-1218А-1	КЗС-1218-29	КЗС-1218-29	КЗС-1218-29
Сменное время, ч	6,362	5,856	5,705	5,672
Эксплуатационное время, ч	6,809	6,531	6,368	6,402
Рабочая скорость, км/ч	7,0	4,6	4,8	4,7
Производительность за час основного времени, т/ч	10,24	6,79	7,07	6,88

Производительность за час основного времени, га/ч	4,66	3,09	3,21	3,13
Производительность по сменному времени, т/ч	7,26	4,70	4,92	5,31
Производительность за час сменного времени, га/ч	3,30	2,13	2,24	2,41
Производительность за час эксплуатационного времени, т/ч	6,79	4,21	4,41	4,70
Производительность за час эксплуатационного времени, га/ч	3,08	1,91	2,01	2,14

Несмотря на более высокую урожайность по сравнению с СПК «Русь», комбайны в МФП «Нива» так же работали с неполной загрузкой молотилки (рисунок 2).

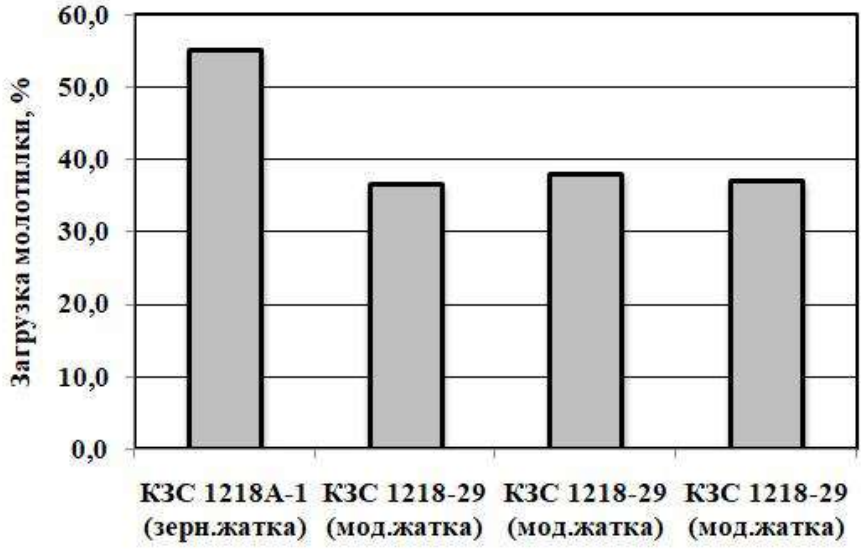


Рисунок 2 – Фактическая загрузка молотилки комбайнов при уборке сои в МФП «Нива»

Как показывает рисунок 2, загрузка молотилки у комбайна КЗС-1218А-1 с зерновой жаткой составила 55%, у комбайнов КЗС-1218-29 с модернизированной жаткой - в среднем 36…38%.

Выводы. В Центрально-Черноземном регионе широко применяются для уборки зерновых культур комбайны с классической барабанной молотилкой компаний «Ростсельмаш» и «Гомсельмаш». Мониторинг подтвердил работоспособность этих комбайнов на уборке сои. При нормальных условиях уборки они вполне могут обеспечить качественные показатели технологического процесса уборки сои. В зависимости от условий комбайны обеспечивали производительность по основному времени 3,1 - 4,6 га/ч, по эксплуатационному времени – 1,9 - 3,1 га/ч.

Все наблюдаемые комбайны на уборке сои работали с недозагруженной молотилкой. В зависимости от урожайности комбайны были загружены на 30-40%. Ограничивает загрузку молотилки невысокая рабочая скорость 4…6 км/ч, которая необходима для качественной работы соевых жаток на низком срезе. В противном случае возрастают потери за жаткой несрезанными бобами. Отсюда следует, что на уборке сои урожайностью до 30 ц/га нет необходимости использовать мощные высокопроизводительные комбайны.

Список литературы

1. Обоснование режима работы молотильно-сепарирующего устройства комбайна при уборке сои / А.М.Гиевкийй, А.В.Чернышев, Д.Л.Маслов, В.Ю.Мильгунов //Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – № 1 (60) – С.50-56.

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

3. Жалнин Э.В., Пьянов В.С. От динамики самоосыпаемости зерна к высокоэффективной уборке// Техника в сельском хозяйстве.– 2010. – №4. – С.8-10.

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

5. Ерохин, Г.Н., Коновский В.В., Тишанинов Н.П. Использование зерноуборочных комбайнов за пределами регламентированного срока службы. – М.: РАСХН, – 2005. – 63 с.

6. Ерохин, Г.Н.Мониторинг качества технологического процесса уборки зерновых культур комбайном Дон-1500 /Г.Н.Ерохин, В.В.Коновский, Д.С.Орешкин// Техника и оборудование для села. –2007. – №6. – С.10-11

7. Горбачев И.В., Шрейдер Ю.М. Как убрать зерновые без потерь //Сельский механизатор. – 2012. – №6. – С.5-6.

8. Ерохин, Г.Н. Изменение надежности зарубежных зерноуборочных комбайнов в процессе эксплуатации / Г.Н. Ерохин, В.В. Коновский // Машинно-технологическая станция . – 2009. – №2. – С.14-15.

9. Ерохин, Г.Н. Надежность зерноуборочных комбайнов в реальных условиях эксплуатации /Г.Н.Ерохин, В.В. Коновский // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2014. – № 1. – С. 37-40.

10. Ерохин, Г.Н. Результаты оценки пропускной способности зерноуборочных комбайнов в условиях реальной эксплуатации / Г.Н.Ерохин, В.В. Коновский // Наука в центральной России. – 2013. - №6.- С.45-48.

References

1. Obosnovanie rezhima raboty molotil'no-separiruyushchego ustrojstva kombajna pri uborke soi / A.M.Gievskijj, A.V.CHernyshev, D.L.Maslov, V.YU.Mil'gunov //Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – № 1 (60) – S.50-56.

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

3. ZHalnin E.V., P'yanov V.S. Ot dinamiki samoosypaemosti zerna k vysokoeffektivnoj uborke// Tekhnika v sel'skom hozyajstve. – 2010. – №4. – S.8-10.

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

5. Erohin, G.N., Konovskij V.V., Tishaninov N.P. Ispol'zovanie zernouborochnyh kombajnov za predelami reglamentirovannogo sroka sluzhby. – M.: RASKHN, – 2005. – 63 s.

6. Erohin, G.N. Monitoring kachestva tekhnologicheskogo processa uborki zernovyh kul'tur kombajnom Don-1500 /G.N.Erohin, V.V.Konovskij, D.S.Oreshkin// Tekhnika i oborudovanie dlya sela. –2007. – №6. – S.10-11

7. Gorbachev I.V., SHrejder YU.M. Kak ubrat' zernovye bez poter' //Sel'skij mekhanizator. – 2012. – №6. – S.5-6.

8. Erohin, G.N. Izmenenie nadezhnosti zarubezhnyh zernouborochnyh kombajnov v processe ekspluatacii / G.N. Erohin, V.V. Konovskij // Mashinno-tekhnologicheskaya stanciya. – 2009. – №2. – S.14-15.

9. Erohin, G.N. Nadezhnost' zernouborochnyh kombajnov v real'nyh usloviyah ekspluatacii /G.N.Erohin, V.V. Konovskij // Sel'skohozyajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont. – 2014. –№ 1. – S. 37-40.

10. Erohin, G.N. Rezul'taty ocenki propusknoj sposobnosti zernouborochnyh kombajnov v usloviyah real'noj ekspluatacii / G.N.Erohin, V.V. Konovskij // Nauka v central'noj Rossii. – 2013. - №6.- S.45-48.

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.

Першин Илья Александрович – младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г.Тамбов, e-mail: ilya_pershin@internet.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 - 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: witin4@rambler.ru.

Perchin Ilya - junior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture», Russia, Tambov, e-mail: ilya_pershin@internet.ru.

Поступила в редакцию (Received): 10.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022

УДК 631.362.34

DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-41-49

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПОДАЧИ ЗЕРНОСМЕСИ В АВТОРЕГУЛИРУЕМЫЙ ТРИЕР С ВЕЛИЧИНАМИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

[1]Тишанинов Николай Петрович

[1]Емельянович Сергей Владимирович

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

Реферат. *Обоснована необходимость корректировки скоростного режима работы триера в авторегулируемом режиме. Выявлены и оценены три стабильно связанные с величиной подачи зерносмеси в триер управляющие воздействия. Разброс их значений оценивается коэффициентом вариации – 0,40-0,77%, что предопределяет надежность функционирования предложенной авторегулируемой системы управления работой триера. Наиболее подходящим управляющим воздействием для использования в передаточном механизме является поворотное движение вала клапанов авторегулируемого делителя потока зерна – оно идентично движению ручки резистора. Установлено, что в диапазоне подач зерносмеси в триер W = 1,2-4,35 т/ч вал клапанов поворачивается на угол α = 19°. При меньшей подаче W_{min} = 0,63 т/ч не обеспечивается качество технологического процесса. Масса зерносмеси ($M_{ЗЕ}$) в стабилизирующей емкости авторегулируемого делителя в указанном диапазоне W возрастает с убывающей интенсивностью, так как с нарастающим приращением изменяется живое сечение отводов по углу α. Взаимосвязь вертикального смещения стабилизирующей емкости и угла поворота вала клапанов с величиной $M_{ЗЕ}$ линейная. Взаимосвязь α = f (W) оценивается коэффициентом корреляции R^2 = 0,9993. Этот уровень взаимосвязи управляющего воздействия с режимом работы триера превосходит все известные решения, где в качестве контроля интенсивности потока сыпучих материалов используются датчики давления.*

Ключевые слова: *триер, зерносмесь, режимы работы, авторегулирование, качество процесса.*

RELATIONSHIP OF THE SUPPLY OF GRAIN MIXTURE TO THE AUTOADJUSTABLE TRIER WITH THE VALUES OF CONTROL INFLUENCES

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

Abstract. *The necessity of adjusting the speed mode of the trier in the autoregulated mode is substantiated. Three control actions stably associated with the amount of grain mixture supply to the trier are identified and evaluated. The spread of their values is estimated by the coefficient of variation - 0.40-0.77%, which predetermines the reliability of the functioning of the proposed auto-adjustable control system for the operation of the trier. The most suitable control action for use in the transmission mechanism is the rotary movement of the valve shaft of an auto-adjustable grain flow divider - it is identical to the movement of the resistor knob. It has been established that in the range of grain mixture feeds into the trier W = 1.2-4.35 t/h, the valve shaft rotates through an angle α = 19°. With a lower feed Wmin = 0.63 t/h, the quality of the technological process is not ensured. The mass of the grain mixture (MZU) in the stabilizing tank of the auto-adjustable divider in the specified range W increases with decreasing intensity, since the free section of the bends along the angle α changes with increasing increment. The relationship between the vertical displacement of the stabilizing tank and the angle of rotation of the valve shaft with the MSE value is linear. The relationship α = f (W) is estimated by the correlation coefficient R2 = 0.9993. This level of interrelation of the control action with the operating mode of the trier exceeds all known solutions, where pressure sensors are used as control of the intensity of the flow of bulk materials.*

Keywords*: trier, grain mixture, operating modes, automatic control, process quality.*

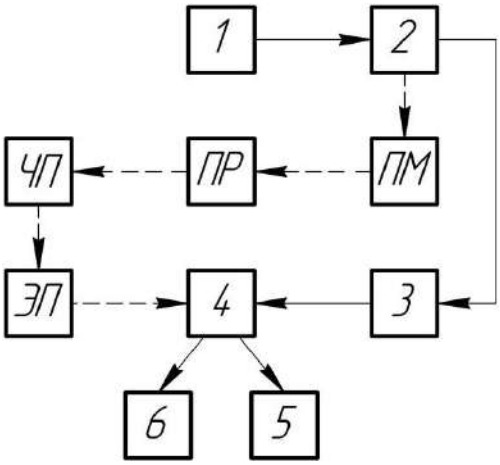
Введение. Использование триерных технологий с оценкой по качественным показателям в реальных условиях эксплуатации остается на низком уровне – высока доля технологических потерь, уровень остаточной засоренности зерна не соответствует существующим требованиям [1, 2]. Причинами высоких технологических потерь являются: превышение подачи зерна в триерный цилиндр относительно скоростного режима работы и завышение угла подъема верхней кромки передней стенки выводного лотка относительно подачи. Причиной повышенной остаточной засоренности зерна является недогруз ячеистого цилиндра, при котором часть рабочей поверхности остается свободной (условно) и на этом участке примесные частицы, обладающие связностью, захватываются ячеями и направляются в выводной лоток с чистым зерном [3].

Кроме того, возможности выбора оптимальных режимов работы триера и его настроечных параметров усложняются чрезвычайным разнообразием свойств исходного зернового вороха. В нем содержится множество видов засорителей, различающихся по своим физико-механическим свойствам, а зерно основной культуры может быть полноценным, недозрелым, дробленым, травмированным, щуплым, в пленке [4, 5].

Однако основной причиной низкого качества работы триеров является отсутствие эффективных средств управления загрузкой ячеистых цилиндров в многоканальных зерноочистительных технологиях (авторегулируемых делителей исходного потока зерна по технологическим каналам). По этой причине авторам исследований процессов триерной очистки зерна [6-10] не удалось установить объективных взаимосвязей режимов работы и настроечных параметров триеров с качественными показателями процесса. Возможности установления этих связей появились с созданием в ФГБНУ ВНИИТиН семейства авторегулируемых делителей потока сыпучих материалов и специального стендового оборудования [11-13]. С использованием созданной экспериментальной базы впервые получены важнейшие закономерности протекания процессов триерной очистки зерна [14-16]. Однако, компенсация отрицательного влияния ряда факторов на качественные показатели процесса возможна лишь при реализации триерного процесса в авторегулируемом режиме работы, что требует пополнения базы знаний.

Материалы и методы. Исследования проводили на экспериментальной установке, разработанной и изготовленной в ФГБНУ ВНИИТиН. В качестве регулятора – идентификатора подачи зерносмеси в триер использовали авторегулируемый делитель потока зерна с пружинной грузовоспринимающей системой, один канал которого был заблокирован. Величину подачи, изменяли с помощью оттарированного бункера-дозатора. Контроль управляющих воздействий (силовое, линейное перемещение, угловое перемещение) осуществляли соответственно электронными весами, линейкой, угломером.

Результаты и их обсуждение. Технологическая схема триера с авторегулированием скоростного режима работы в зависимости от подачи показана на рисунке 1 (Патент РФ № 2737754).



1 – перевалочная нория; 2 – авторегулируемый делитель потока зерна; 3 – питатель; 4 – триер;
5 – бункер чистого зерна; 6 – бункер отходов; ПМ – передаточный механизм; ПР- переменный резистор; ЧП – частотный преобразователь; ЭП - электропривод
Рисунок 1 – Схема процесса триерной очистки зерна

Стабильность и воспроизводимость характеристик управляющих воздействий является главным условием надежного функционирования авторегулируемых систем. Если управляющие воздействия или их связи с управляемыми объектами «размыты», то это многократно усложняет авторегулируемую систему и понижает качество ее работы.

В предложенной системе управления технологическим процессом триерной очистки зерносмеси используется авторегулируемый делитель потока сыпучих материалов, обеспечивающий взаимосвязь загрузки триера с управляющими воздействиями. При этом видов управляющих воздействий, пригодных и необходимых для универсального использования делителя (делитель, расходомер, регулятор, счетчик, питатель, дозатор), несколько: вес зерна в стабилизирующей емкости; вертикальное смещение стабилизирующей емкости; угол поворота клапанного вала. В предложенном нами решении и других авторегулируемых системах разработанные ФГБНУ ВНИИТиН авторегулируемые делители потока сыпучих материалов с пружинной грузовоспринимающей системой (патенты РФ №№ 2341954, 2412582, 2437271, 2525728, 2549284, 2578102) могут использоваться в качестве регулятора скоростного режима работы.

Все указанные управляющие воздействия имеют исключительно высокую корреляционную связь с величиной подачи зерна в авторегулируемый делитель, что кардинально отличает предложенную систему от всех вариантов контроля и управления падающих потоков сыпучих материалов по их динамическому воздействию на опорные поверхности, снабженные контрольными датчиками [17, 18]. В этих системах контролируемые параметры случайно изменяются по времени и месту воздействия, стабилизировать или «отфильтровать» которые не представляется возможным.

В предложенной системе авторегулируемого управления триерами обоснованно выбрано управляющее воздействие, наиболее подходящее для конструктивного исполнения передаточного механизма. В качестве передаточного механизма нами использованы два поворотных рычага со скользящим контактом между собой и переменный резистор, который управляется одним из поворотных рычагов и связан с частотным преобразователем, обеспечивающим корректировку скоростного режима работы триера. Поэтому в качестве управляющего воздействия нами выбран поворот вала регулирующих клапанов. Результаты исследований взаимосвязей величины подачи зерна в авторегулируемый делитель с величинами управляющих воздействий представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Взаимосвязь подачи (W) с величинами управляющих воздействий ($M_{ЗЕ}$, h, α)

№ п/п	Подача		Смещение (h), мм	Высота слоя ($H_{сл}$), см	Угол поворота вала клапанов (α), град	Масса зерна в емкости ($M_{ЗЕ}$), кг
	Положение шибера	W, т/ч				
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	1	0,63	30	19	29	9,13
	1	0,63	29,5	19	29	9,39
	1	0,63	29,5	19	29	9,18
2	2	1,2	37,5	22	36	11,77
	2	1,2	37,5	22	35,5	11,70
3	3	1,83	44,5	24,5	41,0	13,35
	3	1,83	44,0	24,5	41,0	13,5
4	4	2,45	49,0	27,0	45,5	14,95
	4	2,45	49,0	27,0	46,0	15,07
5	5	3,07	53,5	28,5	49,0	16,12
	5	3,07	53,0	28,5	49,0	16,20
6	6	3,71	57,5	30,0	52,5	17,29
	6	3,71	56,5	29,5	52,5	17,19
7	7	4,35	59,0	31,0	54,5	18,38
	7	4,35	59,5	31,0	55,0	17,94
	7	4,35	59,0	31,0	54,5	17,94

Данные таблицы 1 подтверждают высокую степень корреляционной связи величины подачи со всеми управляющими воздействиями. Так, например, при минимальной подаче W = 0,63 т/ч разброс величин вертикального смещения стабилизирующей емкости, оцениваемый коэффициентом вариации (v), составляет 0,79%, а для максимальной подачи W = 4,35 т/ч коэффициент вариации составляет 0,4%.

В повторностях замеров угла поворота вала клапанов при минимальной подаче W = 0,63 т/ч отклонений не наблюдалось, то есть, погрешность находится в пределах ошибки измерений. При максимальной подаче зерна в авторегулируемый делитель W = 4,35 т/ч разброс замеров угла поворота вала клапанов оценивается величиной v = 0,43%. Указанные выше статистические оценки свидетельствуют о высоком уровне подготовки экспериментальных работ. Взаимосвязь массы зерна в стабилизирующей емкости ($M_{ЗЕ}$) с подачей (W) представлена на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что с ростом W величина $M_{ЗЕ}$ увеличивается с убывающей интенсивностью. Рост $M_{ЗЕ}$ объясняется тем, что период стабилизации процесса, когда наступает равенство W с отводимым потоком W_0, увеличивается по времени с ростом подачи, в течение которого зерно накапливается в стабилизирующей емкости. Падение интенсивности прироста $M_{ЗЕ}$ объясняется тем, что по мере роста W и, как следствие, периода стабилизации процесса величина отводимого потока (W_0) растет.

Взаимосвязь $M_{ЗЕ} = f_1$ (W) подтверждается аналитически. Величину подачи можно представить суммой интенсивности накопления зерна в стабилизирующей емкости ($W_{ЗЕ}$) и интенсивности отводимого потока:

$$W = W_{ЗЕ} + W_0 \quad (1)$$

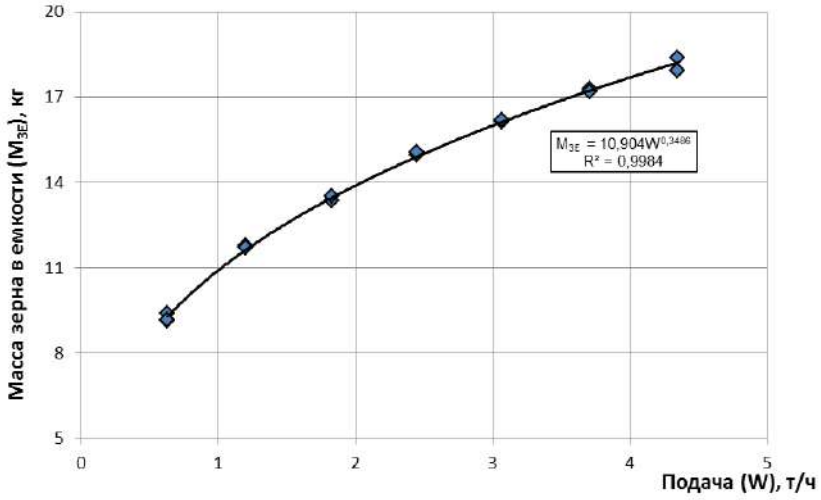
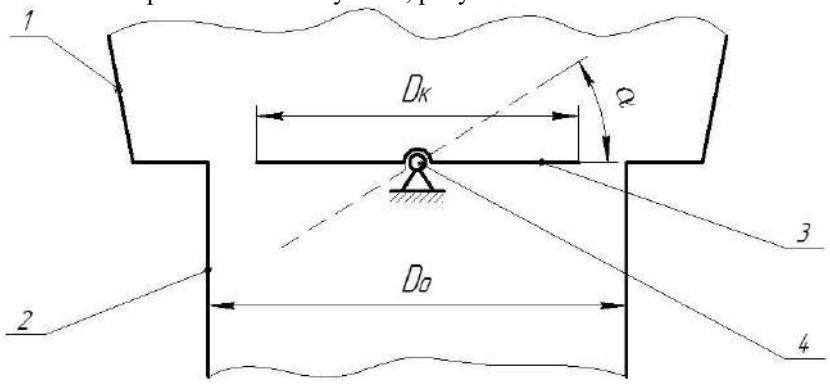


Рисунок 2 – Взаимосвязь $M_{3E} = f_1(W)$

Величину W_0 можно представить суммой расходов через зазор в отводе (W_3) и через возрастающее живое сечение от поворота клапана на угол α, рисунок 3.



1 – стабилизирующая емкость; 2 – отвод; 3 – клапан; 4 – вал клапана
Рисунок 3 – Расчетная схема

$$W_0 = W_3 + q\frac{\pi(D_0^2 - D_к^2\cos\alpha)}{4}, \quad (2)$$

где q – плотность массового расхода, кг/м^2.

Из уравнения (2) видно, что с ростом α второе слагаемое правой части увеличивается, подтверждая при этом интенсификацию отвода зерна (W_0) и снижение интенсивности прироста M_{3E}. Взаимосвязь вертикального смещения стабилизирующей емкости (h) от массы зерна (M_{3E}), накопленной в ней за период стабилизации процесса, представлена на рисунке 4.

Из рисунка 4 видно, что при минимальном разбросе измерений M_{3E} в повторных опытах (v = 1,15-1,22%) взаимосвязь $h = f_2(M_{3E})$ является линейной с корреляцией R^2 = 0,9967. Такой уровень корреляции взаимосвязи $h = f_2(M_{3E})$ создает предпосылки высокой надежности систем авторегулирования процессов, где будут использованы делители потока сыпучих материалов с пружинной грузовоспринимающей системой в качестве регуляторов. Линейный характер взаимосвязи $h = f_2(M_{3E})$ обусловлен характеристиками пружин, суммарная жесткость которых составляет C = 3 кгс/см (3000 Н/м).

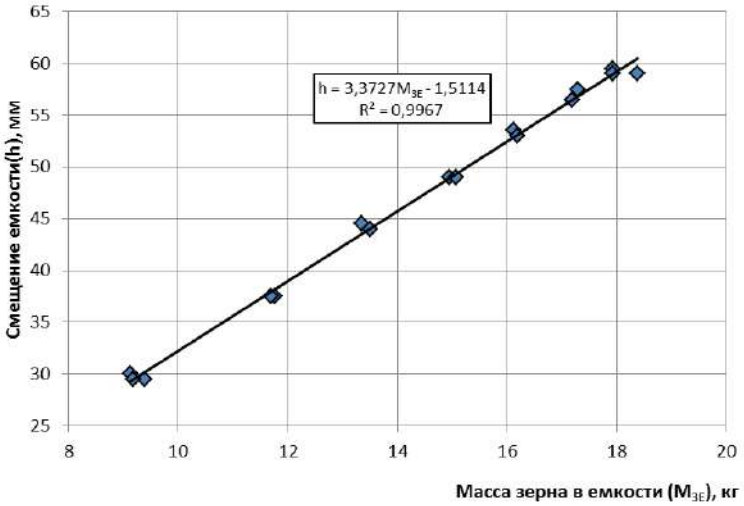


Рисунок 4 – Взаимосвязь $h = f_2(M_{3E})$

Характер взаимосвязей $h = f_3(W)$ и $\alpha = f_4(W)$, представленный на рисунке 5, аналогичен взаимосвязи $M_{3E} = f_1(W)$, представленной на рисунке 2, по причине исключительно высокой корреляционной связи между собой всех управляющих воздействий − M_{3E}, h и α. С ростом W в диапазоне 0,63-4,35 т/ч величины h и α также возрастают с убывающей интенсивностью в диапазонах соответственно – 30-59 мм и 29-54,5 град.

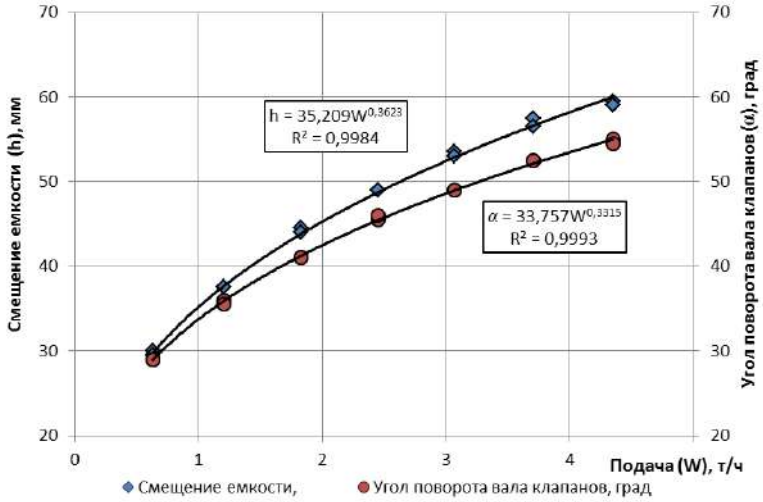


Рисунок 5 – Взаимосвязь $h = f_3(W)$ и $\alpha = f_4(W)$

Выводы. Для компенсации изменчивых условий формирования, деления и подачи зерновых потоков в технологические каналы триеров необходима корректировка скоростных режимов их работы с авторегулируемым управлением. Наиболее перспективным управляющим воздействием является угловое перемещение вала клапанов авторегулируемого делителя, которое позволяет упростить передаточный механизм и обеспечить высокую корреляционную связь с величиной подачи зерносмеси в триер.

Список литературы

1. Тишанинов, Н.П. Вариантный метод оценки эффективности использования технологий подработки зерна / Н.П. Тишанинов, В.А. Ветров, А.В. Анашкин // Наука в центральной России. – 2013. – № 1. – С. 24-30 (28-34).

2. Тишанинов, Н.П. Новые резервы управления качеством очистки зерна / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин / Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. Материалы международной научно-технической конференции, Минск, 2013, Том 1. − С. 266-272.

3. Тишанинов, Н.П. Влияние высоты зернового слоя в овсюжном триере на остаточное содержание длинных примесей / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин // Наука в центральной России. – 2019. – № 4 (40). – С. 19-26.

4. Тарасенко, А.П. Совершенствование технологии послеуборочной обработки зерна / А.П. Тарасенко, М.Э. Мерчалова, И.В. Баскаков // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2009. – Вып. 3(22). – С. 22-25.

5. Тарасенко, А.П. Снижение травмирования зерна при послеуборочной обработке /А.П.Тарасенко [и др] // Вестник аграрной науки Дона. − 2019. − № 1(45). – С. 63-68.

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

7. Летошнев, М.Н. О движении зерна внутри горизонтального вращающегося цилиндра / М.Н. Летошнев // Сборник научно-технических работ Ленинградского института механизации сельского хозяйства. – М.: Л.: Сельхозгиз, 1950. – Вып. 7.

8. Блох, З.Ш. Теория триера / З.Ш. Блох //Сельскохозяйственные машины. – 1935. – № 2. – С. 17-20.

9. Василенко, П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям с-х. машин / П.М. Василенко. – Киев. − Изд-во УАСХ, 1960.

10. Викторова, Н.Н. Экспериментальные исследования продолжительности одного цикла движения зерна в цилиндре триера / Н.Н. Викторова /Труды ЧИМ ЭСХ. – Челябинск, 1958, вып. 5.

11. Патент РФ № 2341954 Устройство для разделения потока сыпучих материалов / Завражнов А.И., Тишанинов К.Н. – № 2006146774/12; заявл. 26.12.2006; опубл. 27.12.2008, Бюл. № 36.

12. Патент РФ № 2549284 Устройство для разделения потока сыпучих материалов / Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Тишанинов К.Н. – № 2013114867/13; заявл. 02.04.2013, опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12.

13. Патент РФ № 2525728 Устройство для разделения потока сыпучих материалов / Тишанинов Н.П., Анашкин А.В., Тишанинов К.Н. – №2013109996/13; заявл. 05.03.2013, опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23.

14. Тишанинов, Н.П. Взаимосвязь качества триерной очистки с концентрацией длинной примеси / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин // Наука в центральной России. − 2020. − № 3 (45). − С. 60-67.

15. Тишанинов, Н.П. Качество выделения семян горчицы и сорго из пшеницы ячеистыми поверхностями / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин // Наука в центральной России. – 2017. – № 3 (27). – С. 42-48.

16. Тишанинов, Н.П. Закономерности выделения семян льна и гречишки вьюнковой из зерносмеси / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин // Наука в центральной России. – 2017. – № 5 (29). – С. 5-12.

17. Кузнецов, В.В. Совершенствование деления зернового потока / В.В. Кузнецов, В.Г. Козлов, П.С. Востриков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 10. – С. 10-11.

18. Патент 2415070 РФ, МКП B 65 G 53/56, B 65 G 11/20, B 65 G 65/00, B 65 G 689/00. Адаптивный делитель потока сыпучего материала /В.В. Кузнецов, П.С. Востриков, Е.А. Извеков. 2009145228/11; заявлено 07.12.2009; опубликовано 27.03.2011, Бюл. № 9.

References

1. Tishaninov, N.P. Variantnyj metod ocenki effektivnosti ispol'zovaniya tekhnologij podrabotki zerna / N.P. Tishaninov, V.A. Vetrov, A.V. Anashkin // Nauka v central'noj Rossii. – 2013. – № 1. – S. 24-30 (28-34).

2. Tishaninov, N.P. Novye rezervy upravleniya kachestvom ochistki zerna / N.P. Tishaninov, A.V. Anashkin / Nauchno-tekhnicheskij progress v sel'skohozyajstvennom proizvodstve. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, Minsk, 2013, Tom 1. − S. 266-272.

3. Tishaninov, N.P. Vliyanie vysoty zernovogo sloya v ovsyuzhnom triere na ostatochnoe soderzhanie dlinnyh primesej / N.P. Tishaninov, A.V. Anashkin // Nauka v central'noj Rossii. – 2019. – № 4 (40). – S. 19-26.

4. Tarasenko, A.P. Sovershenstvovanie tekhnologii posleuborochnoj obrabotki zerna / A.P. Tarasenko, M.E. Merchalova, I.V. Baskakov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – Vyp. 3(22). – S. 22-25.

5. Tarasenko, A.P. Snizhenie travmirovaniya zerna pri posleuborochnoj obrabotke /A.P. Tarasenko [i dr] // Vestnik agrarnoj nauki Dona. − 2019. − № 1(45). – S. 63-68.

6. Poletaev, S.V. Triery / S.V. Poletaev. – M.: L.: Goskomizdat, 1932. – 95 s.

7. Letoshnev, M.N. O dvizhenii zerna vnutri gorizontal'nogo vrashchayushchegosya cilindra / M.N. Letoshnev // Sbornik nauchno-tekhnicheskih rabot Leningradskogo instituta mekhanizacii sel'skogo hozyajstva. – M.: L.: Sel'hozgiz, 1950. – Vyp. 7.

8. Bloh, Z.SH. Teoriya triera / Z.SH. Bloh //Sel'skohozyajstvennye mashiny. – 1935. – № 2. – S. 17-20.

9. Vasilenko, P.M. Teoriya dvizheniya chasticy po sherohovatym poverhnostyam s-h. mashin / P.M. Vasilenko. – Kiev. − Izd-vo UASKH, 1960.

10. Viktorova, H.H. Eksperimental'nye issledovaniya prodolzhitel'nosti odnogo cikla dvizheniya zerna v cilindre triera / H.H. Viktorova /Trudy CHIM ESKH. – CHelyabinsk, 1958, v'p. 5.

11. Patent RF № 2341954 Ustrojstvo dlya razdeleniya potoka sypuchih materialov / Zavrazhnov A.I., Tishaninov K.N. – № 2006146774/12; zayavl. 26.12.2006; opubl. 27.12.2008, Byul. № 36.

12. Patent RF № 2549284 Ustrojstvo dlya razdeleniya potoka sypuchih materialov / Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Tishaninov K.N. – № 2013114867/13; zayavl. 02.04.2013, opubl. 27.04.2015, Byul. № 12.

13. Patent RF № 2525728 Ustrojstvo dlya razdeleniya potoka sypuchih materialov / Tishaninov N.P., Anashkin A.V., Tishaninov K.N. – №2013109996/13; zayavl. 05.03.2013, opubl. 20.08.2014, Byul. № 23.

14. Tishaninov, N.P. Vzaimosvyaz' kachestva triernoj ochistki s koncentraciej dlinnoj primesi / N.P. Tishaninov, A.V. Anashkin // Nauka v central'noj Rossii. − 2020. − № 3 (45). − S. 60-67.

15. Tishaninov, N.P. Kachestvo vydeleniya semyan gorchicy i sorgo iz pshenicy yacheistymi poverhnostyami / N.P. Tishaninov, A.V. Anashkin // Nauka v central'noj Rossii. – 2017. – № 3 (27). – S. 42-48.

16. Tishaninov, N.P. Zakonomernosti vydeleniya semyan l'na i grechishki v'yunkovoj iz zernosmesi / N.P. Tishaninov, A.V. Anashkin // Nauka v central'noj Rossii. – 2017. – № 5 (29). – S. 5-12.

17. Kuznecov, V.V. Sovershenstvovanie deleniya zernovogo potoka / V.V. Kuznecov, V.G. Kozlov, P.S. Vostrikov // Mekhanizaciya i elektrifikaciya sel'skogo hozyajstva. – 2010. – № 10. – S. 10-11.

18. Patent 2415070 RF, MKP V 65 G 53/56, V 65 G 11/20, V 65 G 65/00, V 65 G 689/00. Adaptivnyj delitel' potoka sypuchego materiala /V.V. Kuznecov, P.S. Vostrikov, E.A. Izvekov. 2009145228/11; zayavleno 07.12.2009; opublikovano 27.03.2011, Byul. № 9.

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», г. Тамбов, e-mail: vniitinlab5@mail.ru.

Емельянович Сергей Владимирович – младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», г. Тамбов, e-mail: seruvarovo@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Tishaninov Nikolaj Petrovich – doktor tekhnicheskih nauk, professor, glavnyj nauchnyj sotrudnik Federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo nauchnogo uchrezhdeniya «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut ispol'zovaniya tekhniki i nefteproduktov v sel'skom hozyajstve», g. Tambov, e-mail: vniitinlab5@mail.ru.

Emel'yanovich Sergej Vladimirovich – mladshij nauchnyj sotrudnik Federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo nauchnogo uchrezhdeniya «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut ispol'zovaniya tekhniki i nefteproduktov v sel'skom hozyajstve», g. Tambov, e-mail: seruvarovo@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 09.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022

УДК 631.372:004.4
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-49-56

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКИ ПНЕВМОКОЛЕСНОЙ МАШИНЫ

[1]Афоничев Дмитрий Николаевич
[2]Остриков Валерий Васильевич
[1]Пиляев Сергей Николаевич
[1]ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»
[2]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

Реферат. *При движении остов пневмоколесной машины подвержен одновременно двум внешним воздействиям: от неоднородности физико-механических свойств и неровностей пути и от активной системы подвески. Предлагается компьютерная модель, включающая в себя подмодель решения уравнений динамического режима системы, подмодель формирования воздействий активной подвески и подмодель генерации возмущающих воздействий со стороны дороги в виде случайного профиля пути с заданной корреляционной функцией, единичной ступеньки и синусоиды. Задание параметров модели, связь между подмоделями и блоками внутри их осуществляется с помощью механизма программы SimInTech, называемого «Сигналы». Подмодель решения уравнений позволяет получить скорости и перемещения элементов физической модели с последующей их записью в базу данных сигналов. Здесь же вычисляются значения перемещений штока подвески с учетом угла наклона остова машины. Блоки воздействия со стороны профиля дороги позволяют имитировать все возможные режимы движения. Для использования в разнообразных имитационных моделях динамики транспортных средств включен универсальный блок моделирования случайного профиля пути, который позволяет генерировать профиль пути со спектральной плотностью, соответствующей большому набору дорог различного вида. Вид дороги и параметры вида спектральной плотности профиля дороги задаются с помощью соответствующего скрипта. Предложенный подход является многофункциональным, позволяющий определить ускорение и параметры транспортного средства, воздействия случайного профиля, препятствий и тягового усилия. Структура комплекса позволяет включать в модель и рассматривать устройства активной подвески различной формы (гидравлические, пневматические) и способы управления ими.*

Ключевые слова: *активная подвеска, пневмоколесная машина, компьютерная модель, управляющие воздействия, случайный профиль дороги.*

COMPUTER MODEL OF THE ACTIVE SUSPENSION OF AN AIR-WHEELED MACHINE

[1]Afonichev Dmitry
[2]Ostrikov Valery
[1]Pilyaev Sergey
[1]FSBEI HE «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great»
[2]FSBSI «All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture»

Abstract. *The skeleton of a pneumatic wheeled vehicle is simultaneously subject to two external influences: from the heterogeneity of the physical and mechanical properties and unevenness of the track, and from the active suspension system when moving. A computer model, which includes a submodel for solv-*

ing the equations of the dynamic mode of the system, a submodel for the formation of active suspension effects, and a submodel for generating disturbances from the side of the road in the form of a random path profile with a given correlation function, a unit step, and a sinusoid, is proposed. The parameters of the model are set, the connection between the submodels and the blocks inside them is carried out using the mechanism of the SimInTech program, called "Signals". A submodel for solving equations allows you to obtain the velocities and movements of the elements of the physical model with their subsequent entry into the signal database. Here, the values of the movements of the suspension rod are calculated, taking into account the angle of inclination of the machine frame. The impact blocks from the side of the road profile allow you to simulate all possible traffic modes. For use in various simulation models of vehicle dynamics, a universal block for modeling a random path profile is included, which allows generating a path profile with a spectral density corresponding to a large set of roads of various types. The type of road and the parameters of the type of spectral density of the road profile are set using the appropriate script. The proposed approach is multifunctional, allowing to determine the acceleration and parameters of the vehicle, the effects of a random profile, obstacles or traction. The structure of the complex makes it possible to include in the model and consider active suspension devices of various shapes (hydraulic, pneumatic) and ways to control them.

Keywords: *active suspension, pneumatic wheeled vehicle, computer model, control actions, random road profile.*

Введение. В процессе движения пневмоколесной машины возможны вертикальные колебания ее остова, кресел водителя и пассажиров, связанные с неровностями на опорной поверхности под колесными движителями. Эти колебания приводят к неблагоприятным для человека вибрациям, иногда превышающим допустимый по санитарно-гигиеническим требованиям уровень [1, 2, 3, 4]. Поэтому проектирование новых и усовершенствование существующих виброзащитных систем подвески остова пневмоколесной машины за счет повышения качества ее систем демпфирования вертикальных колебаний, которое позволит решить данную проблему, представляется актуальным. В целом системы подвески можно разделить на три типа: пассивные, полуактивные и активные [3, 4, 5]. В отличие от полуактивных систем подвески, активные системы подвески используют дополнительный привод между кузовом транспортного средства и колесной осью для добавления или рассеивания энергии в системе, в результате чего может быть достигнута улучшенная реакция подвески по сравнению с полуактивными и пассивными подвесками. Хотя система активной подвески обычно требует более высокого энергопотребления и сложной механической конструкции, она постепенно была признана многообещающим путем для достижения лучших характеристик подвески из-за ее несомненного превосходства над другими системами подвески [4]. Основной трудностью в использовании активных систем подвески является создание адекватных систем управления [6, 7], для разработки которых необходима достаточно адекватная математическая модель системы «дорога – остов машины», построению которой и посвящена настоящая работа.

Результаты и обсуждение. Рассмотрим построение подобной компьютерной модели с помощью программного комплекса SimInTech московской фирмы ООО «3В Сервис» [5, 8, 9, 10, 11].

Описание системы является затруднительным, в соответствии с чем упростим решаемую задачу [3, 12].

1. Колебательные движения имеют место только в вертикальной плоскости.
2. Условия (дорожные) аналогичны под бортами, то есть дорожный профиль одинаков.
3. Все силы направлены вертикально.
4. Массовые, демпфирующие элементы системы совершают вертикальные движения.
5. Двигатель и вся трансмиссионная часть являются жёстким элементом.
6. Возмущающим действием на систему является неровность под колёсами.

Эти условия позволяют рассматривать движение только половины машины в вертикальной плоскости, проходящей через ее центр масс. На рисунке 1 представлена схема физической модели динамической системы машины, учитывающая указанные выше допущения. Суть ее работы заключена в вертикальных перемещениях центра масс (точка О) по координате y и угловые перемещения α вокруг относительно горизонтальной оси, проходящей через центр масс (точка О) элемента массой m, который моделирует массу двигателя, трансмиссии, остова и кабины.

Воздействия от подвески колес передней и задней осей передаются в точки А и В на остов машины массой *m* и моментом инерции *J*. Динамические свойства шин учитываются в виде суммарных коэффициентов жесткости и вязкого трения соответственно переднего моста c_{t1}, k_{t1} и заднего моста c_{t2}, k_{t2}. Система подвески также задается в виде демпфирующего и пружинного элементов, которые могут иметь как линейные, так и нелинейные характеристики: c_1, c_2 и k_1, k_2. Активный привод подвески представлен в виде сил u_1, u_2 воздействующих на остов в точках А и В.

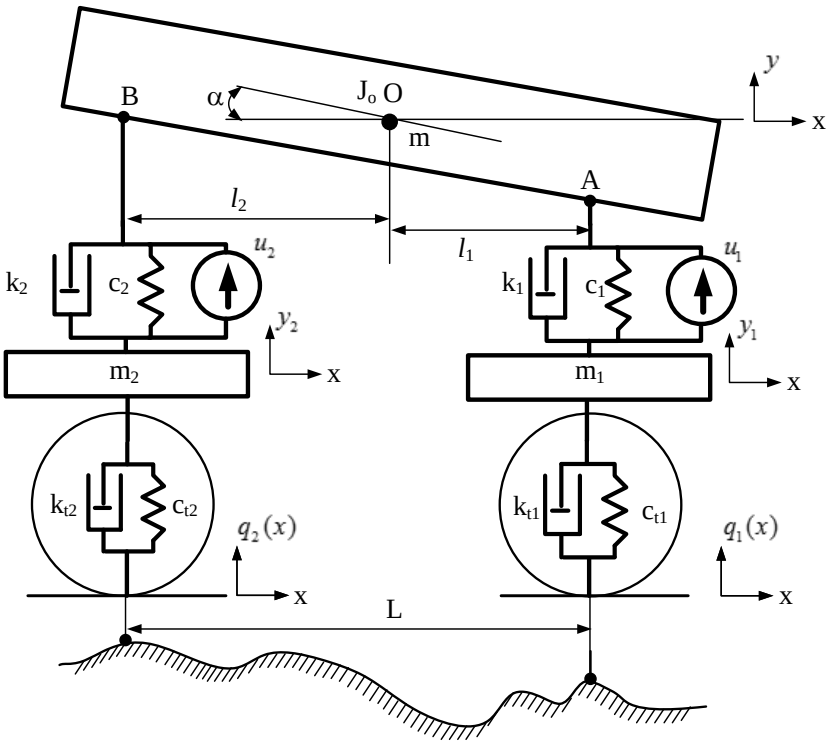


Рисунок 1 – Схема физической модели системы «дорога – остов машины»

Используя классические методы механики [3, 13], получим уравнения динамического режима рассматриваемой системы в следующем виде:

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2y}{dt^2} + F_{d1} + F_{f1} + F_{d2} + F_{f2} = u_1 + u_2; \\ J\dfrac{d^2\alpha}{dt^2} - l_1\left(F_{d1} + F_{f1}\right) + l_2\left(F_{d2} + F_{f2}\right) = l_1u_1 - l_2u_2; \\ m_1\dfrac{d^2y_1}{dt^2} + F_{dt1} + F_{tf1} - F_{d1} - F_{f1} = -u_1; \\ m_2\dfrac{d^2y_2}{dt^2} + F_{dt2} + F_{tf2} - F_{d2} - F_{f2} = -u_2, \end{cases} \quad (1)$$

где y, y_1, y_2 – вертикальные перемещения остова машины, переднего и заднего колеса, м;

m, m_1, m_2 – половина массы остова машины, масса переднего и заднего колес, кг;

α – угол отклонения остова машины от горизонтали в точке центра масс, град.;

J – момент инерции остова машины относительно центра масс, Н·м^2;

l_1, l_2 – расстояния от центра масс машины до передней и задней осей, м;

$F_{dt1}, F_{dt2}, F_{d1}, F_{d2}$ – силы сжатия соответствующих пружинных элементов, Н;

$F_{ft1}, F_{ft2}, F_{f1}, F_{f2}$ – демпфирующие силы соответствующих демпирующих элементов, Н.

В случае линейных пружинных и демпфирующих элементов силы в уравнениях (1) определяются следующим образом:

$$\begin{cases} F_{dt1} = c_{t1}\left(y_1 - q_1(x)\right); F_{ft1} = k_{t1}\dfrac{d\left(y_1 - q_1(x)\right)}{dt}; \\ F_{dt2} = c_{t2}\left(y_2 - q_2(x)\right); F_{ft2} = k_{t2}\dfrac{d\left(y_2 - q_2(x)\right)}{dt}; \\ F_{d1} = c_1\left(y - y_1 + l_1 \sin\alpha\right); F_{f1} = k_1\dfrac{d\left(y - y_1 + l_1 \sin\alpha\right)}{dt}; \\ F_{d2} = c_2\left(y - y_2 - l_2 \sin\alpha\right); F_{f2} = k_2\dfrac{d\left(y - y_2 - l_2 \sin\alpha\right)}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где c_{t1}, k_{t1} – жесткость и коэффициент демпфирования левого переднего колеса;

c_{t2}, k_{t2} – жесткость и коэффициент демпфирования левого заднего колеса;

c_1, k_1, c_2, k_2 – жесткость и коэффициент демпфирования подвески соответственно передней и задней осей;

l_1, l_2 – расстояния от точки центра масс остова машины до передней и задней точек крепления подвески;

$q_1(x) = q_2(x) = q_1(x - L)$ – профиль пути под колесами передней и задней осей;

L – колесная база машины.

Как следует из уравнений (1) и (2) в процессе движения остов машины подвержен одновременно двум внешним воздействиям: от неоднородности физико-механических свойств и неровностей пути и от активной системы подвески. На рисунке 2 представлено окно проекта SimInTech со схемой построенной имитационной модели активной подвески пневмоколесной машины. Модель включает в себя подмодель решения уравнений (1) и (2) «Модель автомобиля», подмодель формирования воздействий активной подвески «Управление» и подмодель генерации возмущающих воздействий со стороны дороги в виде случайного профиля пути с заданной корреляционной функцией, единичной ступеньки и синусоиды. Задание параметров модели, связь между подмоделями и блоками внутри их осуществляется с помощью очень удобного механизма программы SimInTech, называемого «Сигналы» [11].

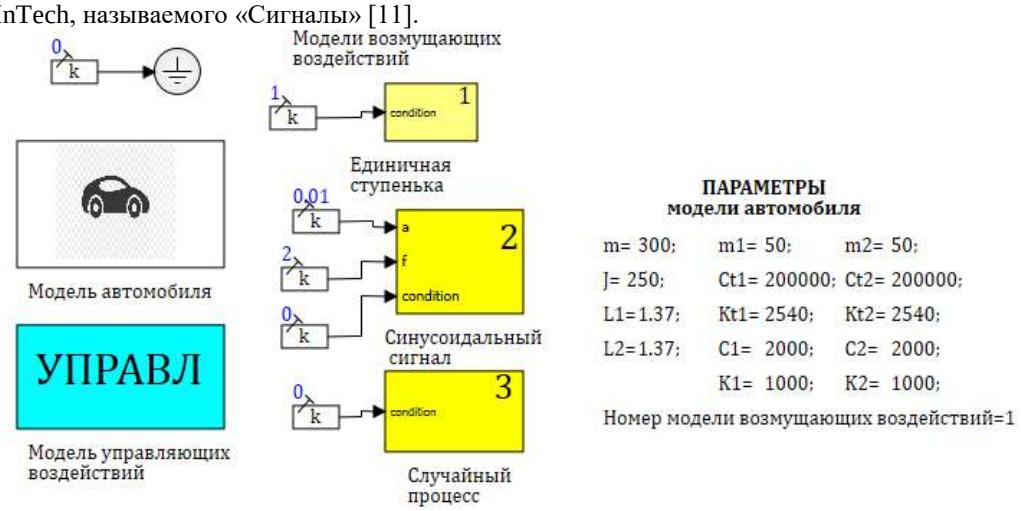


Рисунок 2 – Внешний вид модели активной подвески пневмоколесной машины

На рисунке 3 представлен внешний вид подмодели «Модель автомобиля». Она состоит из программного блока SimInTech, с помощью которого, согласно выражениям (1) и (2) в виде вектора вычисляются правые части дифференциальных уравнений (ускорения). Далее этот вектор дважды интегрируется для получения скоростей и перемещений элементов физической модели с последующей их записью в базу данных сигналов. Здесь же вычисляются значения перемещений штока подвески с учетом угла наклона остова машины.

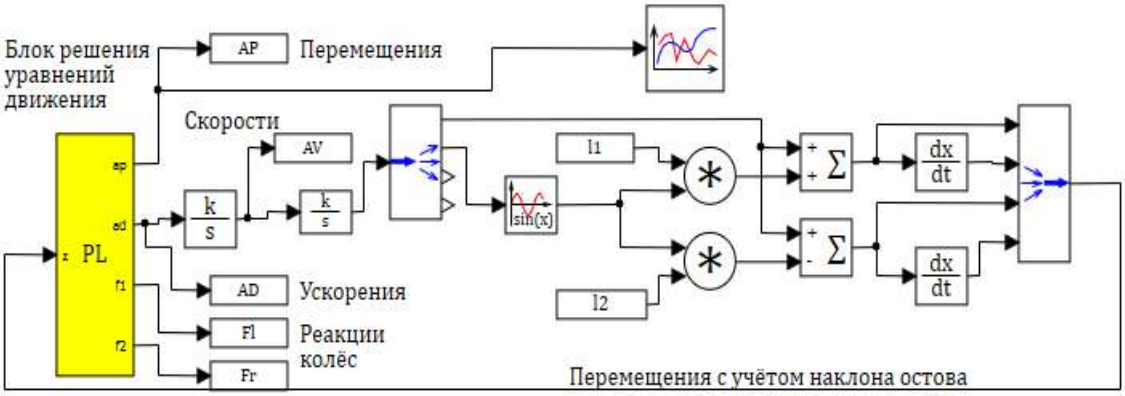


Рисунок 3 – Структура блока «Модель автомобиля»

Блоки воздействия со стороны профиля дороги позволяют имитировать все возможные режимы движения. В качестве примера на рисунке 4 приведены результаты моделирования в случае наезда машины с параметрами модели из рисунка 2 при скорости 0,33 м/с на ступеньку высотой 0,1 м. Для использования в разнообразных имитационных моделях динамики транспортных средств включен универсальный блок моделирования случайного профиля пути [12, 14, 15]. На рисунке 5 представлена структура субмодели генерации профиля пути. Данный блок позволяет генерировать профиль пути со спектральной плотностью, соответствующей большому набору дорог различного вида.

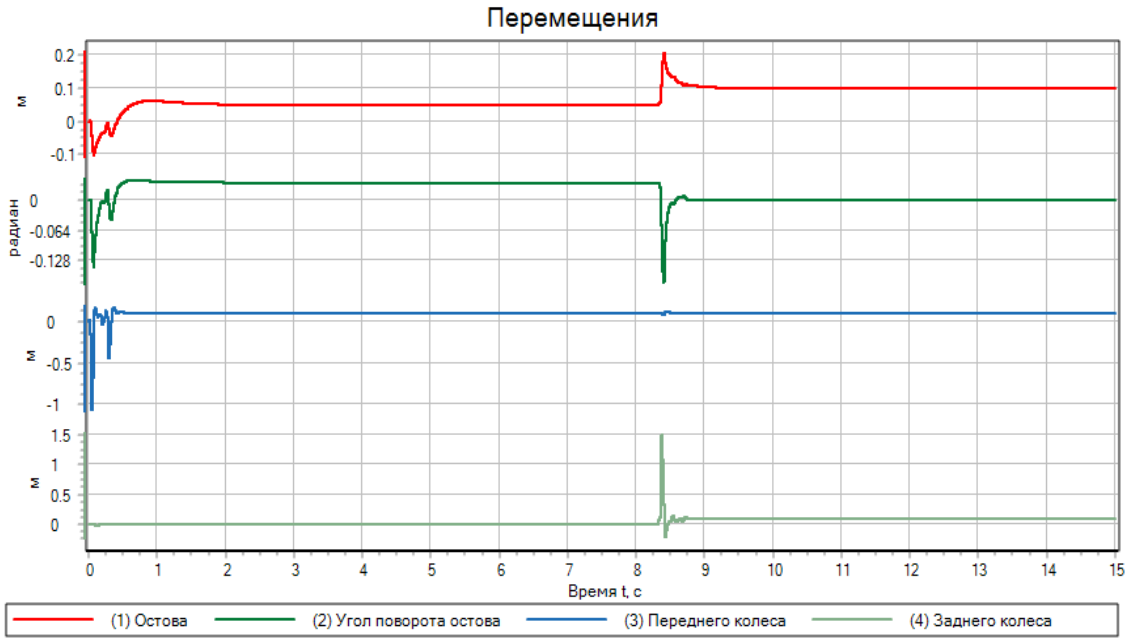


Рисунок 4 – Результаты моделирования при наезде машины на ступеньку со скошенным краем

Вид дороги и параметры вида спектральной плотности профиля дороги задаются с помощью соответствующего скрипта. В качестве примера на рисунке 6 представлен результат моделирования с профилем дороги «Изношенный асфальт» [12, 14, 15].

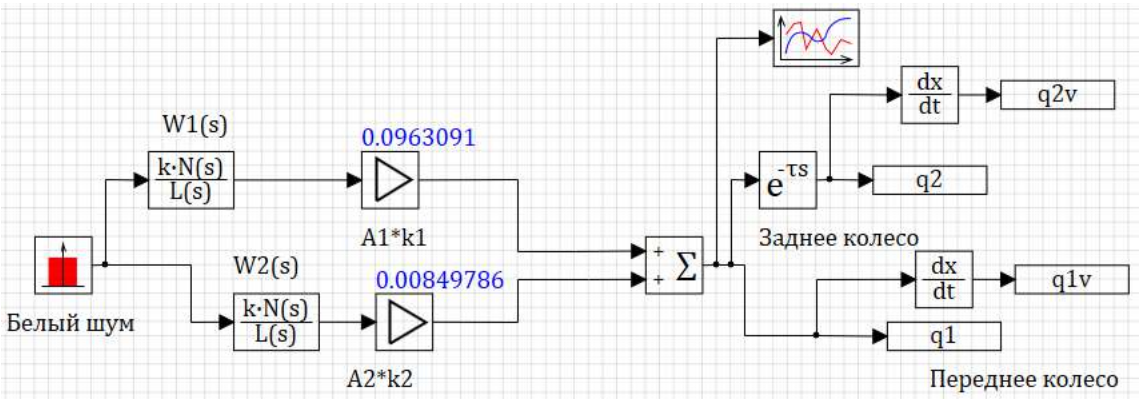


Рисунок 5 – Субмодель генерации профиля пути

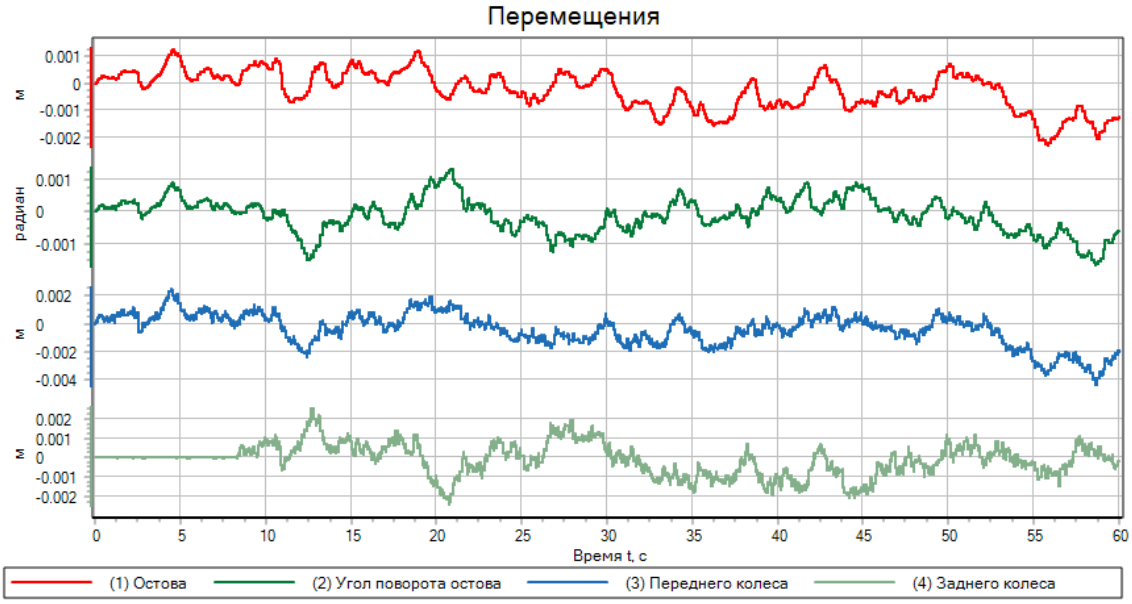


Рисунок 6 – Результаты моделирования при профиле пути типа «Изношенный асфальт»

Заключение. Таким образом, построенная модель позволяет оценивать ускорения, их характер, характеристики транспортного агрегата и вида воздействий: профиля пути и устройства активной подвески.

Список литературы

1. Волоков В.С. Основы расчета систем автомобилей, обеспечивающих безопасность движения. С-Пб.: Издательство «Лань», 2021. 144 с.

2. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Введ. в действие Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 40. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. 30 с.

3. Semi-active Suspension Control. Improved Vehicle Ride and Road Friendliness / Emanuele Guglielmino, Tudor Sireteanu, Charles W. Stammers, Gheorghe Ghita, Marius Giuclea. London: Springer-Verlag London Limited, 2008. 302 p.

4. Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles / S.M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename, L. Dugard. GB: Oxford, Elsevier Ltd, 2010. 232 p.

5. Чмиль В.П., Чмиль Ю.В. Автотранспортные средства. С-Пб.: Издательство «Лань», 2021. 336 с.

6. Пиляев С.Н., Кузьменко С.В., Аксенов И.И. Динамическое моделирование сложных технических систем // Наука, образование и инновации в современном мире (НОИ-2019): матер. нац. научной конф. в 2-х ч.; г. Воронеж, 17-18 апреля 2019 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. Ч. I. С. 223–228.

7. Сердобинцев Ю.П., Кухтик М.П. Оптимальное и адаптивное управление. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. 112 с.

8. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Кузьменко С.В. Использование программного комплекса SimInTech для проектирования мехатронных систем // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: матер. нац. научно-прак. конф.; Воронеж, 26-27 ноября 2019 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. С. 335–338.

9. Афоничев Д.Н., Тихонов В.В., Хромых Н.Ю. Особенности информационных систем контроля и управления // Наука вчера, сегодня, завтра: матер. научно-практич. конф. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. 2016. С. 84–88.

10. Герман-Галкин С.Г., Карташов Б.А., Литвинов С.Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. М.: ДМК Пресс, 2021. 494 с.

11. Среда динамического моделирования SimInTech [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://simintech.ru.

12. Динамика системы: дорога – шина – автомобиль – водитель / А.А. Хачатуров, В.Л. Афанасьев, В.С. Васильев и др. М.: Машиностроение, 1976. 535 с.

13. Пиляев В.С., Пиляев С.Н. Компьютерное моделирование подвески автомобиля // Современные технологии и автоматизация производства: материалы I-й национальной научно-технической конференции студентов и молодых ученых; Воронеж, 22 марта 2021 г. Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2021. № 1(1). С. 107–113.

14. Афоничев Д.Н., Лощенко А.В., Пиляев С.Н. Моделирование микропрофиля пути с помощью программного комплекса SimInTech // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: матер. международной науч.-практ. конф.; г. Воронеж, 27 марта 2020 г. Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. С. 268–277.

15. Имитационная модель вертикальных колебаний кресла оператора трактора в программном комплексе SimInTech / О.И. Поливаев, Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, А.В. Лощенко, А.Ю. Черемисинов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2020. № 4(67). С. 79–87.

References

1. Volokov V.S. Osnovy rascheta sistem avtomobilej, obespechivayushchih bezopasnost' dvizheniya. S-Pb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2021. 144 s.

2. SN 2.2.4/2.1.8.566-96. Proizvodstvennaya vibraciya, vibraciya v pomeshcheniyah zhilyh i obshchestvennyh zdanij. Vved. v dejstvie Postanovleniem Goskomsanepidnadzora Rossii ot 31 oktyabrya 1996 g. № 40. M.: Informacionno-izdatel'skij centr Minzdrava Rossii, 1997. 30 s.

3. Semi-active Suspension Control. Improved Vehicle Ride and Road Friendliness / Emanuele Guglielmino, Tudor Sireteanu, Charles W. Stammers, Gheorghe Ghita, Marius Giuclea. London: Springer-Verlag London Limited, 2008. 302 p.

4. Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles / S.M. Savaresi, C. Poussot-Vassal, C. Spelta, O. Sename, L. Dugard. GB: Oxford, Elsevier Ltd, 2010. 232 p.

5. CHmil' V.P., CHmil' YU.V. Avtotransportnye sredstva. S-Pb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2021. 336 s.

6. Pilyaev S.N., Kuz'menko S.V., Aksenov I.I. Dinamicheskoe modelirovanie slozhnyh tekhnicheskih sistem // Nauka, obrazovanie i innovacii v sovremennom mire (NOI-2019): mater. nac. nauchnoj konf. v 2-h ch.; g. Voronezh, 17-18 aprelya 2019 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2019. CH. I. S. 223–228.

7. Serdobincev YU.P., Kuhtik M.P. Optimal'noe i adaptivnoe upravlenie. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021. 112 s.

8. Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Kuz'menko S.V. Ispol'zovanie programmnogo kompleksa SimInTech dlya proektirovaniya mekhatronnyh sistem // Nauka i obrazovanie na sovremennom etape

razvitiya: opyt, problemy i puti ih resheniya: mater. nac. nauchno-prak. konf.; Voronezh, 26-27 noyabrya 2019 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2019. S. 335–338.

9. Afonichev D.N., Tihonov V.V., Hromyh N.YU. Osobennosti informacionnyh sistem kontrolya i upravleniya // Nauka vchera, segodnya, zavtra: mater. nauchno-praktich. konf. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU. 2016. S. 84–88.

10. German-Galkin S.G., Kartashov B.A., Litvinov S.N. Model'noe proektirovanie elektromekhanicheskih mekhatronnyh modulej dvizheniya v srede SimInTech. M.: DMK Press, 2021. 494 s.

11. Sreda dinamicheskogo modelirovaniya SimInTech [Elektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://simintech.ru.

12. Dinamika sistemy: doroga – shina – avtomobil' – voditel' / A.A. Hachaturov, V.L. Afanas'ev, V.S. Vasil'ev i dr. M.: Mashinostroenie, 1976. 535 s.

13. Pilyaev V.S., Pilyaev S.N. Komp'yuternoe modelirovanie podveski avtomobilya // Sovremennye tekhnologii i avtomatizaciya proizvodstva: materialy I-j nacional'noj nauchno-tekhnicheskoj konferencii studentov i molodyh uchenyh; Voronezh, 22 marta 2021 g. Voronezh: FGBOU VO «VGLTU», 2021. № 1(1). S. 107–113.

14. Afonichev D.N., Loshchenko A.V., Pilyaev S.N. Modelirovanie mikroprofilya puti s pomoshch'yu programmnogo kompleksa SimInTech // Aktual'nye napravleniya nauchnyh issledovanij dlya effektivnogo razvitiya APK: mater. mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf.; g. Voronezh, 27 marta 2020 g. Voronezh: FGBOU VO Voronezhskij GAU, 2020. S. 268–277.

15. Imitacionnaya model' vertikal'nyh kolebanij kresla operatora traktora v programmnom komplekse SimInTech / O.I. Polivaev, D.N. Afonichev, S.N. Pilyaev, A.V. Loshchenko, A.YU. CHeremisinov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. № 4(67). S. 79–87.

Сведения об авторах:

Принадлежность к организации

Афоничев Дмитрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Остриков Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией использования смазочных материалов и отработанных нефтепродуктов федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Пиляев Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Affiliation

Afonichev Dmitry – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the department of electrical engineering and automation of the federal state budgetary educational institution of higher education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great», Russia, Voronezh, e-mail: dmafonichev@yandex.ru.

Ostrikov Valery – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the laboratory for the use of lubricants and spent petroleum products of federal state budgetary scientific institution «All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture», Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Pilyaev Sergey – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the federal state budgetary educational institution of higher education «Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great», Russia, Voronezh, e-mail: pilyaevs@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 08.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022

УДК 631.154
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-57-64

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБА УБОРКИ КОЛОСОВЫХ КУЛЬТУР С ВЫГРУЗКОЙ ЗЕРНА НА КРАЮ ПОЛЯ

[1]Скорляков Виктор Иосифович
[1]Свиридова Светлана Алексеевна
[1]Новокубанский филиал ФГБНУ Росинформагротех

Реферат. *На основе анализа полевых исследований обобщены сравнительные эксплуатационные показатели зерноуборочных комбайнов ДОН 1500 Б и автомобиля КАМАЗ 5420 при работе с разгрузкой заполненных бункеров на краю поля. Установлено повышение производительности комбайнов - на 2,9 % (с 2,08 до 2,14 га/ч) при челночном способе работы с сокращением расхода топлива на 16,0-18,5 %, благодаря меньшему на 13,5 - 14,7 % заполнению бункера зерном. Получено повышение производительности автомобиля с 18,53 до 22,71 т/ч при сокращении продолжительности рабочих циклов автомобилей (по времени их прибытия на ток) с 36,7 до 25,7 мин. С применением расчетного метода установлены показатели эффективности машинно-тракторного агрегата на послеуборочной вспашке за счет исключения уплотнения 21,5 % площади колесами автомобилей. Представлено обоснование возможности сокращения автомобилей КАМАЗ 5420 в типичном применяемом в степных регионах крупногрупповом уборочно-транспортном звене на 25 % (с 4 до 3). Показано, что применение предлагаемого способа прямого комбайнирования с разгрузкой зерна на краю поля приводит к снижению эксплуатационных затрат денежных средств в размере 351 руб./га. при сокращении капитальных вложений в автомобили в размере 4,1 млн. руб .*

Ключевые слова: *Уборочно-транспортный процесс, зерноуборочный комбайн, транспортировка зерна, экономическая эффективность, разгрузка на краю поля.*

ECONOMIC EFFICIENCY OF THE HARVESTING METHOD FORSPIKED CROPS WITH GRAIN UNLOADING AT THE EDGE OF THE FIELD

[1]Skorlyakov Viktor
[1]Sviridova Svetlana
[1]Novokubansk branch of Federal State Budgetary Scientific Institution Rosinformagrotech

Abstract. *Comparative performance indicators of combine harvesters DON 1500 B and KAMAZ 5420 when working with unloading filled bunkers at the edge of the field are summarized based on the analysis of field studies. An increase in productivity of combines - by 2.9% (from 2.08 to 2.14 ha / h) with a shuttle operation with a reduction in fuel consumption by 16.0-18.5%, due to a decrease of 13.5 - 14 .7% filling of the bunker with grain was established. An increase in vehicle productivity from 18.53 to 22.71 t/h with a reduction in the duration of vehicle operating cycles (according to the time of their arrival at the current) from 36.7 to 25.7 minutes was obtained. The performance indicators of the machine-tractor unit during post-harvest plowing due to the exclusion of compaction of 21.5% of the area by the wheels of cars were established using the calculation method The rationale for the possibility of reducing KAMAZ 5420 vehicles in a typical large-group harvesting and transport link used in the steppe regions by 25% (from 4 to 3) is presented. It is shown that the use of the proposed method of direct combining with grain unloading at the edge of the field leads to a reduction in operating costs of funds in the amount of 351 rubles/ha. while reducing capital investments in cars in the amount of 4.1 million rubles.*

Keywords: *Harvesting and transport process, combine harvester, grain transportation, economic efficiency, unloading at the edge of the field.*

Введение. Возросшая продуктивность зерновых культур объективно предопределяет потребность интенсификации уборочно-транспортного процесса, которая в последнее время реализуется путем переоснащения более производительными зерноуборочными комбайнами и большегрузны-

ми автомобилями. Но развитие данной тенденции обостряет ряд проблем традиционно применяемой технологии уборочных работ: увеличение проездов по полю транспортных средств к местам заполнения бункеров зерноуборочных комбайнов с увеличением техногенной нагрузки на почву, а также рост затрат транспортных средств от простоев в ожидании приема зерна [1].

В южных степных районах исторически созданы предпосылки для обеспечения стабильной цикличности отвоза зерна от комбайнов и совершенствования на этой основе всего уборочного процесса. Для них типичны преимущественно выравненные прямоугольные поля, сравнительно высокая пространственная однородность продуктивности посевов, развитая сеть и стабильное состояние внутрихозяйственных полевых дорог.

В результате поиска решения указанных проблем для условий южной степной зоны был разработан новый способ уборки зерновых колосовых культур прямым комбайнированием с выгрузкой заполненных бункеров на краю поля и с исключением проезда каких-либо транспортных средств по полю. [2]. Выполнено теоретическое обоснование предлагаемого способа уборки [3] с расчетом рабочей ширины захвата жатки и соответствующей рабочей скорости комбайна для заполнения бункера у края поля. В полевых опытах в производственных условиях получены положительные результаты сравнительной эксплуатационной эффективности зерноуборочных комбайнов [4] и грузовых автомобилей [5]. Установлены значения повышения производительности зерноуборочных комбайнов и грузовых автомобилей при их работе новым способом в типичных условиях Краснодарского края, т.е. получена исходная информация для обобщения эксплуатационно-технологических показателей и определения экономической эффективности способа.

Согласно сравнительным полевым оценкам, в процессе работы зерноуборочных комбайнов новым способом с параметрами технологического процесса, выбираемыми в зависимости от сочетания урожайности, длины гона и вместимости бункера создаются предпосылки к изменению их эксплуатационных и экономических показателей и к сокращению потребности транспортных средств [5]. Наряду с этим, ряд исследователей отмечают снижение удельного сопротивления почвы и эксплуатационных затрат на вспашке от снижения давления на почву применяемых технических средств [6-9]. Поэтому, в связи с исключением проездов транспортных средств по полям в новом способе актуальным является оценка эффективности машинно-тракторных агрегатов на вспашке полей, не подвергаемых воздействию колес автомобилей при уборке.

Учитывая наличие разных источников изменения показателей эффективности, для производственного освоения становится актуальным размер совокупного экономического эффекта от применения нового способа.

Цель исследования – обоснование размера совокупного экономического эффекта нового способа уборки зерновых колосовых культур с выгрузкой зерна на краю поля.

Материалы и методы. Сущность предложенного способа уборки [2,3,10] заключается в применении новой совокупности взаимосвязанных режимов работы зерноуборочных комбайнов (рабочая ширина захвата жатки и рабочая скорость движения), определяемых в зависимости от условий поля (урожайность, длина гона), а также вместимости бункера при сохранении оптимальной загрузки молотилки, при работе зерноуборочного комбайна челночным способом.

Оценку экономической эффективности предлагаемого способа уборки озимой пшеницы с разгрузкой на краю поля производили в сравнении с базовым традиционно применяемым способом уборки с проездами транспортных средств по полю к местам разгрузки комбайнов.

При расчете экономического эффекта нового способа уборки приняты три составляющие:

– эффект от снижения эксплуатационных затрат зерноуборочного комбайна за счет повышения производительности и снижения расхода топлива;

– эффект от снижения необходимого количества единиц грузового автотранспорта в уборочно - транспортном звене;

– эффект от снижения эксплуатационных затрат при вспашке поля после уборки озимой пшеницы, получаемого за счет повышения производительности и снижения расхода топлива при работе пахотного агрегата, что обусловлено исключением проездов по полю автомобиля КАМАЗ-5320.

Показатели эксплуатационно-технологической оценки на вспашке определены по ГОСТ 24055-2016 «Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технологической оценки» на основе справочных данных [12], представленных по агрегату К-701+ПТК-9-35. Показатели эко-

номической оценки по агрегату определены с использованием действующего ГОСТ 34393–2018 «Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки».

Результаты исследований

Эффективность зерноуборочных комбайнов

В результате анализа традиционно применяемых вариантов совершенствования уборочного процесса было определено, что наиболее радикальным решением проблем, связанных с проездом по полям транспортных средств, является выгрузка зерна из бункеров на краю поля. При этом технологический процесс работы комбайнов новым способом заключается в следующем:

1 Для каждого поля по результатам предуборочной оценки урожайности (по результатам подсчета относительного числа продуктивных стеблей и среднего веса зерна в колосе) определяют урожайность.

2 В зависимости от условий поля (урожайность, длина гона), вместимости бункера комбайна и конструкционной рабочей ширины жатки по формуле [5]? определяют значение уменьшенной рабочей ширины жатки, необходимое для заполнения бункера за целое число проходов комбайна. При этом рабочую скорость увеличивают из условия сохранения подачи в молотилку (по условиям допустимых потерь за молотилкой, как и в традиционном способе).

3 Проходы по длине гона осуществляют челночным способом каждым комбайном по одной стороне загонки.

4 Выгрузку заполненных бункеров производят на краю поля.

В условиях равенства подач в молотилки комбайнов в новом и базовом способах работы обеспечивается равенство намолотов зерна за основное время работы. Но в единицу сменного времени при работе новым способом продолжительность поворота комбайнов с 6- и с 7-метровыми жатками сокращается с 34-36 до 21-23 с, т.е. на 32,3-41,7 %., т. к. исключаются переезды комбайнов в пределах ширины загонки, выполняемые в базовом способе. Поэтому производительность в единицу сменного времени в среднем увеличивается с 2,08 до 2,14 га/ч (или на 2,9 %), несмотря на задаваемое меньшее заполнение бункера перед разгрузкой комбайна для снижения расхода топлива.

Как известно, к факторам, повышающим расход топлива комбайном, относится масса комбайна (в том числе с учетом массы зерна в бункере) и соответствующее сопротивление почвы перекатыванию колес. Исходя из этого, установлена существенная экономия топлива при работе комбайна новым способом за счет ограничения заполнения бункеров (таблица 1).

Таблица 1 – Расход топлива комбайнами при разном заполнении бункера при работе

Наименование показателя	Марка и ширина жатки комбайнов	
	Дон-1500Б с 7-метровой жаткой	Дон-1500Б с 6-метровой жаткой
Масса зерна, набираемого в бункер, кг:		
- в базовом варианте	5652	5652
- в новом варианте	4823	4888
Расход топлива, кг/га:		
- в базовом варианте	12,64	13,22
- в новом варианте	10,62	10,78

Таким образом, работа комбайнов с 6-метровыми жатками в новом варианте, благодаря меньшему на 14,7 % заполнению бункера зерном, позволила сократить расход топлива на 2,02 кг/га, т. е. на 16,0 %. Для комбайна с 7-метровой жаткой при меньшем на 13,5 % заполнении бункера (4823 вместо 5652 кг) экономия топлива составила 18,5 %.

Реализация указанных задаваемых ограничений при заполнении бункера в новом способе работы стала возможной благодаря постоянной длине прохода комбайна между выгрузками зерна, соответствующей целому числу проходов по длине гона.

Показатели экономической оценки комбайнов в сравниваемых вариантах уборочного звена определены на основе эксплуатационно-технологических показателей. В результате расчета уста-

новлено, что применение предлагаемого способа работы зерноуборочного комбайна с разгрузкой зерна на краю поля приводит к снижению эксплуатационных затрат денежных средств на 167 руб./га (с 2122 до 1955 руб./га) или на 7,9 % (таблица 2).

Таблица 2 – Исходные показатели и эксплуатационные затраты комбайнов в новом и базовом способах уборки

Наименование показателя	Значение показателя для способа уборки:	
	базового	нового
Производительность за 1 ч времени смены, га/ч	2,08	2,14
Расход топлива, кг/га	12,64	10,62
Цена комбайна с жаткой, руб.	2 563 300	
Эксплуатационные затраты денежных средств, руб./га	2 122	1 955

Эффективность применения автомобилей

Производительность автомобиля КАМАЗ при отвозе зерна от двух комбайнов Дон-1500Б в полевом опыте [5] получена:

- в новом способе 22,71 т/ч при расходе топлива на 100 км пробега 38,2 кг;
- в базовом способе 18,53 т/ч при расходе топлива на 100 км пробега 41,94 кг.

Наиболее наглядным результирующим показателем работы сравниваемых автомобилей в новом и базовом вариантах работы послужила продолжительность их циклов по результатам фиксации времени прибытия на ток для взвешивания. В базовом варианте продолжительность цикла автомобиля КАМАЗ-5320 составила 36,7 мин, а в новом – 25,7 мин, т. е. меньше на 30,0 %. При данном существенном сокращении рабочего цикла автомобиля проведена оценка возможности сокращения автомобилей в типичном применяемом крупногрупповом уборочно-транспортном звене (при обслуживании одинакового числа комбайнов).

Предположим, что в новом способе три КАМАЗа отвозят зерно с края поля от 6 комбайнов (т.е. один автомобиль на два комбайна). При этом длина маршрута «поле-ток» такова, что возврат автомобиля и комбайна в точку выгрузки совпадают по времени, что обеспечивает бесперебойную работу, как комбайна, так и автомобиля.

В базовом способе, помимо движения автомобиля по полевой дороге, необходимо проезжать к местам заполнения бункеров двух комбайнов зерном, согласно результатам хронометражных наблюдений среднее расстояние равное 1793 м. При скорости движения автомобиля КАМАЗ-5320 по стерне, равной, согласно нашим оценкам, в среднем 20 км/ч, на это затрачивается 5,38 мин. Если за смену (12 ч) 6 комбайнов могут убирать 120 га и намолачивать 720 т зерна, то, исходя из продолжительности рабочих циклов, согласно расчетам, при групповом способе работы для отвоза зерна потребуется:

- в новом способе 2,64 автомобиля (или 3 из условия бесперебойной работы комбайнов*);*
- в базовом способе 3,24 автомобиля (или 4 из условий бесперебойной работы комбайнов).

Таким образом, применение нового способа работы уборочного звена из 6 комбайнов позволяет сократить потребность автомобилей КАМАЗ-5320 с 4 до 3. При этом капитальные вложения в необходимое количество грузовых автомобилей снижаются на 4 093 тыс. руб. или на 25,0 %; общий фонд оплаты труда водителей снижается на 36 руб./га или также на 25,0 % (таблица 3).

Исходные предпосылки и снижение эксплуатационных затрат на вспашку поля после уборки

Передвижение автомобилей по полю к местам заполнения бункеров комбайнов происходит при большой вариабельности расстояний проезда и при вынужденном ограничении скорости из-за роста сопротивления перекатыванию колес и повышенной динамики. При этом большегрузные автомобили при приеме зерна более чем от одного комбайна отличаются наибольшими расстояниями передвижения по полю.

При высоких урожайностях число проходов по полю транспортных средств в расчете на единицу площади сопоставимо с числом проходов комбайнов. При приеме зерна от двух комбайнов автомобиль КАМАЗ, согласно нашим оценкам, в среднем проезжает по полю типичных размеров

1793 м и за один рейс вывозит зерно с площади около двух гектаров. При этом, при общей ширине следов автомобиля 1,2 м на каждом гектаре уплотняется 21,5 % площади поля. Согласно нашим оценкам, уплотняется следами комбайнов (с 7-метровыми жатками и шириной колес 790 мм) 23,2 % площади поля.

Таблица 3 – Эффективность применения автомобилей КАМАЗ-5320

Наименование показателя	Значение показателя для способов уборки:	
	базового	нового
Потребность в грузовых автомобилях грузоподъемностью 15 т, шт.	4	3
Цена грузового автомобиля, тыс. руб.	4 093	
Капитальные вложения, тыс. руб.	16 372	12 279
Потребность в обслуживающем персонале, чел.	4	3
Средняя тарифная ставка водителя грузового автотранспорта, руб./ч	190	
Фонд оплаты труда водителей, руб./га	109	82
Коэффициент социальных отчислений от размера заработной платы	1,32	
Фонд оплаты труда водителей с учетом отчислений, руб./га	144	108

Таким образом, исключение проездов автомобилей по полю позволяет сохранить от переуплотнения 21,5 % площади поля.

Наряду с исключением уплотнения почвы большегрузными автомобилями в новом способе увеличивается площадь уплотнения почвы колесами комбайна. В зависимости от среднего значения уменьшенной рабочей ширины жатки (1,2 м), например до 5,6 м вместо 6,8 м уплотняемая ходовыми органами комбайна площадь поля может увеличиваться на 5,0 % (с 23,2 до 28,2 %). Таким образом, в новом способе уборки (с исключением передвижений автомобилей по полям) в сравнении с базовым способом общая уплотняемая площадь при средней уменьшенной рабочей ширине жатки сокращается с 44,7 до 28,2 %.

Но проблема переуплотнения почвы колесами автомобилей при уборке зерновых культур намного острее, чем уплотнение комбайнами. Так, известно что прирост сопротивления вспашке по следам у многоколесных транспортных агрегатов с числом проходов колес по одному следу равном 4-7 максимальное давление достигает 407 кПа, а прирост сопротивления вспашке по следам равен 72-90 % [7]. В связи с превышением допустимого давления на почву, наряду с проблемами, связанными со снижением эффективного плодородия, повышается сопротивление почвы обработке [11].

Исходные варианты для расчета эксплуатационных затрат и нормативные значения производительности и расхода топлива [12] при разном удельном сопротивлении вспашке представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Выработка агрегата и расход топлива при вспашке по уплотненным следам автомобилей и при их отсутствии

Наименование показателя	Значение показателя:	
	по уплотненным следам автомобилей	без уплотнения автомобилями
Агрегат	К-701+ПТК-9-35	
Удельное сопротивление вспашке, кПа	72-78	60-65
Выработка за 7-часовую смену, га	9,0	11,7
Производительность, га/ч	1,29	1,67
Расход топлива, кг/га	33,8	26,5

Экономический эффект от сокращения эксплуатационных затрат на послеуборочной вспашке поля

Исключение проездов автомобилей по полю позволяет сохранить от переуплотнения 21,5 % площади поля, на которых перерасход топлива при вспашке, согласно нормативам [12], составляет 7,3 кг/га. Исходя из этого, экономия топлива на вспашке составит 1,61 кг/га.

Эксплуатационные затраты в базовом варианте слагаются из затрат на доле площади, уплотненной колесами (794 руб./га) и затрат на доле, не уплотненной колесами (2226 руб./га) (таблица 5). В сумме данные затраты (на гектар) в базовом варианте составляют 3020 руб./га. За счет исключения переуплотнения 21,5 % площади поля колесами автомобиля эксплуатационные затраты снижаются с 3020 до 2 836 руб./га, т.е. на 184 руб./га или на 6,12 %.

Таблица 5 – Результаты расчета эксплуатационных затрат на вспашке с учетом доли площади, уплотненной автомобилями

Наименование показателя	Значение показателей по вариантам:		
	базовый		новый без уплотнения автомобилем
	уплотненная площадь	не уплотненная площадь	
Процентное содержание уплотненной и не уплотненной площади, %	21,5	78,5	100
Эксплуатационные затраты на вспашке полностью уплотненной и не уплотненной площади, руб./га	3694	2836	2836
Эксплуатационные затраты на долях уплотненной и не уплотненной площади каждого гектара поля, руб.	794	2226	-
Экономия эксплуатационных затрат в новом варианте от исключения уплотнения автомобилей, руб./га	-	-	184

Показатели экономической эффективности предлагаемого способа уборки по сравнению с базовым способом представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Экономическая эффективность от применения нового способа уборки

Наименование показателя	Значение показателя
Экономия эксплуатационных затрат на комбайнировании и на вспашке – всего, руб./га,	351
в том числе на операции:	
- уборка	167
- вспашка	184
Экономия капитальных вложений в транспортном звене, тыс.руб.	4 093
Экономия фонда заработной платы, руб./га	36

Применение предлагаемого способа уборки с разгрузкой зерноуборочных комбайнов на краю поля вместо базового способа уборки, приводит к экономии эксплуатационных затрат денежных средств в размере 351 руб./га, фонда заработной платы - на 36 руб./га, величины капитальных вложений в автомобили – на 4,1 млн.руб.

Вывод. Проведенный сравнительный экономический анализ двух способов уборки позволяет сделать вывод о высокой экономической эффективности нового способа уборки с разгрузкой зерноуборочных комбайнов на краю поля вместо базового способа уборки. Его применение приводит к экономии эксплуатационных затрат денежных средств на 6,8 %, фонда оплаты труда водителей автомобилей – на 25,0 %, капитальных вложений в необходимое количество автомобилей - на 25,0 % что свидетельствует о перспективности производственного освоения.

Список литературы

1. Скорляков В.И Анализ технологических схем транспортировки зерна от комбайнов в типичных условиях южных степных регионов // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 3 (273). – С. 27-32.

2. Патент № 2695452 Российская Федерация, СПК (52) A01D 91/04 (2019.05). Способ уборки зерновых культур прямым комбайнированием с выгрузкой зерна на краю поля : № 2018127042 : заявл. 23.07.2018 : опубл. 23.07.2019 / Скорляков В.И., Назаров А.Н., Петухов Д.А. ; заявитель Росинформагротех. – 3 с..

3. V.I. Skorlyakov, A.N. Nazarov and D.A. Petukhov A new way to unload combine harvesters at the field edge // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2020). E3S Web of Conferences 193, 01023 (2020)

4. Скорляков В.И., Назаров А.Н., Петухов Д.А. Сравнительные показатели работы зерноуборочных комбайнов с выгрузкой зерна на краю поля // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 7 (289). – С. 16-22.

5. Скорляков В.И., Назаров А.Н., Петухов Д.А. Сравнительные показатели перевозок зерна при разгрузке комбайнов на краю поля // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 12. – С. 32-36.

6. Дьячков А.П., Трофимова Т.А., Колесников Н.П. и др. Совершенствование транспортно-технологического процесса функционирования машин и комплексов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 1 (52). – С. 94-101.

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

8. Кравченко В.А., Меликов И.М. Агротехнические показатели функционирования ходовой системы зерноуборочного комбайна высокой производительности // Вестник аграрной науки Дона. – 2018. –Т. 3. № 43. – С. 30-36.

9. Методика определения оптимальной грузоподъёмности бункера зерноуборочного комбайна / А. П. Дьячков [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4 (47), Ч. 2. – С. 92-98.

10. Скорляков В.И., Назаров А.Н., Петухов Д.А. Результаты производственного применения зерноуборочного комбайна с выгрузкой зерна на краю поля // Техника и оборудование для села. – 2021. – № 2. – С. 2–26.

11. Тарасенко Б.И. Обработка почвы. – Краснодар: Кн. изд-во, 1987. – 175 с.

12. Единые нормы выработки и расхода топлива на механизированные полевые работы в сельском хозяйстве. – М., 1981.

References

1. Skorlyakov V.I Analiz tekhnologicheskih skhem transportirovki zerna ot kombajnov v tipichnyh usloviyah yuzhnyh stepnyh regionov // Tekh-nika i oborudovanie dlya sela. – 2020. – № 3 (273). – S. 27-32.

2. Patent № 2695452 Rossijskaya Federaciya, SPK (52) A01D 91/04 (2019.05). Sposob uborki zernovyh kul'tur pryamym kombajnirovaniem s vygruzkoj zerna na krayu polya: № 2018127042 : zayavl. 23.07. 2018: opubl. 23.07.2019 / Skorlyakov V.I., Nazarov A.N., Petuhov D.A. ; zayavitel' Ro-sinformagrotekh. 3 s..

3. V.I. Skorlyakov, A.N. Nazarov and D.A. Petukhov A new way to un-load combine harvesters at the field edge // International Conference on Mod-ern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2020). E3S Web of Conferences 193, 01023 (2020)

4. Skorlyakov V.I., Nazarov A.N., Petuhov D.A. Sravnitel'nye poka-zateli raboty zernouborochnyh kombajnov s vygruzkoj zerna na krayu polya // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. – 2021. – № 7 (289). – S. 16-22.

5. Skorlyakov V.I., Nazarov A.N., Petuhov D.A. Sravnitel'nye poka-zateli perevozok zerna pri razgruzke kombajnov na krayu polya // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. – 2021. – № 12. – S. 32-36.

6. D'yachkov A.P., Trofimova T.A., Kolesnikov N.P. i dr. Sovershen-stvovanie transportno-tekhnologicheskogo processa funkcionirovaniya mashin i kompleksov // Vestnik Voronezhskogo gosu-darstvennogo agrarno-go universiteta. – 2017. – № 1 (52). – S. 94-101.

7. Rusanov V.A. Problema pereuplotneniya pochv dvizhitelyami i ef-fektivnye puti ee resheniya. – M.: VIM, 1998. – 368 s.

8. Kravchenko V.A., Melikov I.M. Agrotekhnicheskie pokazateli funk-cionirovaniya hodovoj sistemy zernouborochnogo kombajna vysokoj pro-izvoditel'nosti // Vestnik agrarnoj nauki Dona. – 2018. –T. 3. № 43. – S. 30-36.

9. Metodika opredeleniya optimal'noj gruzopod"yomnosti bunkera zernouborochnogo kombajna / A. P. D'yachkov [i dr.] // Vestnik Voronezhsko-go gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – № 4 (47), CH. 2. – S. 92-98.

10. Skorlyakov V.I., Nazarov A.N., Petuhov D.A. Rezul'taty proiz-vodstvennogo primeneniya zernouborochnogo kombajna s vygruzkoj zerna na krayu polya // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. – 2021. – № 2. – S. 2–26.

11. Tarasenko B.I. Obrabotka pochvy. – Krasnodar: Kn. izd-vo, 1987. – 175 s.

12. Edinye normy vyrabotki i raskhoda topliva na mekhanizirovan-nye polevye raboty v sel'skom hozyajstve. – M., 1981.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Скорляков Виктор Иосифович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Новокубанского филиала ФГБНУ Росинформагротех, г. Москва, e-mail:skorlv@yandex.ru.

Свиридова Светлана Алексеевна – зав. Лабораторией, научный сотрудник Новокубанского филиала ФГБНУ Росинформагротех, г. Москва, e-mail:s1161803@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Skorlyakov Viktor – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Novokuban Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Rosinformagrotech, Moscow, e-mail: skorlv@yandex.ru.

Sviridova Svetlana - head. Laboratory, researcher of the Novokuban branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution Rosinformagrotech, Moscow, e-mail: s1161803@yandex.ru..

Поступила в редакцию (Received): 01.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2022

УДК 631.1

DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-64-71

РОЛЬ ПРОДУКЦИИ ТЕПЛИЧНОГО ХОЗЯЙСТВА В ПОВЫШЕНИИ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ УЧРЕЖДЕНИЙ УГОЛОВНО-ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

[1]Зазуля Александр Николаевич

[2]Макаров Валентин Алексеевич

[3]Макарова Ольга Владимровна

[3]Гаспарян Светлана Валентиновна

[1]Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

[2]Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева.

[3]Академия права и управления ФСИН России г. Рязань, Российская Федерация

Реферат. *Рассмотрены вопросы развития тепличного хозяйства в подсобных хозяйствах подведомственных ФСИН России. Большое внимание уделено развитию производства продукции растениеводства, а также ее переработки с целью обеспечения спецконтингента продуктами питания для удовлетворения собственных нужд. Для исследования обеспечения продовольственной безопасности учреждении уголовно-исполнительной системы проанализированы преимущества развития тепличных хозяйств с целью получения высоких урожаев овощных культур в течение круглого года. Проанализирована экономическая эффективность тепличного хозяйства на примере типичного исправительного учреждения, функционирующего в одном из территориаль-*

ных органов ФСИН России с целью реализации программы самообеспечения продуктами питания. Рассмотрены показатели экономической эффективности производства продукции растениеводства: объем выпускаемой продукции, себестоимость, прибыль, рентабельность. Из анализа полученных данных установлено, что овощную продукцию экономически эффективно производить в течение года в отапливаемых теплицах на территории подсобных хозяйств учреждений. Отмечен факт неполного использования теплиц по периодам времени, что в свою очередь отражается на снижении экономического эффекта получаемого от сельскохозяйственного производства. В связи с эти наглядно представлены графики возможного использования теплиц на полную мощность, с указанием вида тепличной продукции, сроков ее выращивания и площади посева, занятой под ними. Показана динамика изменения показателей экономической эффективности работы тепличного хозяйства на основе таких мероприятий как: равномерное использование труда осужденных в течении года, круглогодичного высаживания сельскохозяйственных культур в отапливаемых теплицах и применения доступных видов удобрений. В целом, равномерное использование тепличного хозяйства способствует повышению продовольственной безопасности учреждений уголовно-исполнительной системы.

Ключевые слова: *тепличное хозяйство, сельскохозяйственные культуры, подсобное хозяйство, продовольственная безопасность, экономическая эффективность, учреждения уголовно-исполнительной системы.*

THE ROLE OF GREENHOUSE PRODUCTS IN IMPROVING THE FOOD SECURITY OF PENAL INSTITUTIONS

[1]Zazulya Alexander
[2]Makarov Valentin
[3]Makarova Olga
[3]Gasparyan Svetlana
[1]Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"
[2]Ryazan state agrotechnological university named after P. A. Kostychev
[3]Academy of law and management of the federal penitentiary service of Russia

Abstract. *The issues of greenhouse farming development in subsidiary farms subordinated to the Federal Penitentiary Service of Russia are considered. Much attention is paid to the development of crop production, as well as its processing in order to provide the special ingredient with food to meet their own needs. The advantages of developing greenhouse farms in order to obtain high yields of vegetable crops throughout the year are analyzed in the study of ensuring food security of institutions of the penitentiary system. The economic efficiency of a greenhouse farm is analyzed on the example of a typical correctional institution operating in one of the territorial bodies of the Federal Penitentiary Service of Russia in order to implement a self-sufficiency program with food. The indicators of economic efficiency of crop production are considered: the volume of output, cost, profit, profitability. From the analysis of the data obtained, it was found that vegetable products are economically efficient to produce during the year in heated greenhouses on the territory of subsidiary farms of institutions. However, the fact of incomplete use of greenhouses by time periods is noted, which in turn is reflected in a decrease in the economic effect obtained from agricultural production. In this regard, graphs of the possible use of greenhouses at full capacity are clearly presented, indicating the type of greenhouse products, the timing of its cultivation and the area of sowing occupied under them. The dynamics of changes in the indicators of economic efficiency of the greenhouse economy on the basis of such measures as: uniform use of convicts' labor throughout the year, year-round planting of crops in heated greenhouses and the use of available types of fertilizers are shown. In general, the uniform use of greenhouses contributes to improving the food security of institutions of the penal system.*

Keywords: *greenhouse farming, agricultural crops, subsidiary farming, food security, economic efficiency, institutions of the penal system.*

Введение. В настоящее время тепличному хозяйству в системе ФСИН России уделяется большое внимание в обеспечении производства и переработки продукции. Оно развивается как динамичная и, как правило, экономически эффективная отрасль сельского хозяйства в ряде учреждений, имеющая значение не только для продовольственной безопасности учреждений УИС, но и для снабжения гражданского населения свежими и богатыми витаминами овощами круглый год, а также цветами, особенно в сезон, когда из открытого грунта уже не может поступать продукция. Производство продукции в тепличных хозяйствах учреждений - это создание дополнительных рабочих мест для осужденных и обеспечение учреждения качественными продуктами собственного производства. Оно имеет ряд преимуществ, связанных со специфичностью использования и обеспечения продуктами питания трудовых ресурсов и особенностями теплиц в учреждениях. Получение высоких и устойчивых урожаев с гарантированным качеством продукции в учреждениях уголовно-исполнительной системы связано с возможностью равномерного использования мощностей теплиц в течение года; уменьшением энергоемкости на единицу продукции; наличием условий для оптимизации водного, воздушного режимов и точечного внесения минеральных удобрений; возможностью применения стандартизации при проведении агротехнических мероприятий и приготовлении питательных растворов по культурам, автоматизации и перевода на базу электроники рабочих процессов, что сокращает до минимума расход труда, воды, удобрений и других ресурсов. Повысить производительность труда осужденных можно за счет исключения трудоемких процессов, что в свою очередь приведет к улучшению условий для работающего спецконтингента в теплицах. Под теплицы в учреждениях часто используют территории, непригодные для обычного выращивания овощных культур. Ограниченность площадей теплиц обеспечивает более легкую борьбу с болезнями и вредителями растений. Работа в теплицах и на сельскохозяйственных полях для осужденных становится возможностью получить профессию и скорее адаптироваться к жизни после освобождения.

Цель исследования – разработать мероприятия, способствующие повышению продовольственной безопасности учреждений уголовно-исполнительной системы за счет развития тепличного хозяйства.

Вопросами повышения экономической эффективности сельскохозяйственного производства занимались такие ученые, как Зазуля А.Н., Нагорнов С.А., Макаров В.А., Макарова О.В., Гаспарян С.В., Измайлов А.Ю., Фадькин Г.Н., Шемякин А.В., Лупова Е.Н., Виноградов Д.В., Латышенок М.Б., Кибиров А.Я., Новожилова Ж.С. [1-8].

Материалы и методы. Проанализируем экономическую эффективность производства растениеводческой продукции в одном из типичных учреждений системы ФСИН, где имеется тепличное хозяйство (таблица 1). В этом хозяйстве большая часть работ уделяется посадке огурцов и помидоров, а также рассаде цветов. Стоит отметить, что с приходом весеннего сезона происходит посадка различных цветочных культур, таких как: петуния, сальвия, цинерария и др.

Таблица 1 - Показатели экономической эффективности производства продукции растениеводства в типичном тепличном хозяйстве учреждения системы ФСИН

Ассортимент продукции растениеводства	Объем выпускаемой продукции тыс.руб.			Себестоимость			Прибыль, тыс.руб.			Рентабельность, %		
	N, г	N+1, г	N+2, г	N, г	N+1, г	N+2, г	N, г	N+1 г	N+2 г	N, г	N+1, г	N+2, г
Помидоры	2352	892	3129	2269	814	3048	68	59	186	3,00	7,25	6,10
Огурцы свежие	1750	987	2458	1664	931	2374	52	51	96	3,13	5,48	4,04
Рассада цветов	6524	5686	7896	6431	5606	5745	214	504	425	3,33	8,99	7,40
Итого:	10626	7565	13483	10364	7351	11167	334	614	707	3,15	7,24	5,84

Анализируя показатели производства продукции растениеводства, устанавливаем следующее.

Общий объем выпуска тепличной продукции в N- году составил 10626 тыс. руб., в N+1 году он снизился до 7565 тыс.руб, причиной послужило уменьшение государственных заказов, в N+2году был произведен наибольший объем выпускаемой продукции, который составил 13483 тыс.руб.

Аналогичные тенденции имел показатель себестоимости произведенной продукции. Так, в N году он составлял 10634 тыс. руб., в N+1 году он снизился до 7351 тыс. руб., а в N+2 году увеличился до 11167 тыс.руб.

Показатель прибыли за анализируемый период так же претерпевал изменения. Так, в N году он составлял 334 тыс. руб. и являлся самым низким за анализируемые три года по причине небольшого объема производимой продукции; в N+1 году прибыль составила 614 тыс. руб., рост произошел по причине увеличения объемов выпускаемой продукции, в N+1 году показатель вырос до 707 тыс.рублейв связи с обновлением ассортимента выращиваемой продукции.

По показателю рентабельности наблюдаем следующие изменения.

Если при производстве помидор в N году рентабельность составила 3 %, то в N+1 - 7,25% , и в 2N+2 - 6,10 %, мы видим, что производить помидорыучреждению выгодно.

Рентабельность огурцов составила в N году - 3,13 %, в N+1году - 5,48% ,в N+2 году - 4,04%, то есть огурцы также выгодно возделывать в тепличном хозяйстве.

Рентабельность рассады цветов в N году составила 3,33 %, в N+2 году -8,99 %, в N+2 году - 7,40%.

Таким образом, в ходе анализа установлено, что весь возделываемый ассортимент продукции экономически эффективно производить в условиях отапливаемых теплиц. Анализируя каждый показатель (таблица 1) в период с N по N+2 год, мы видим рост объемов производимого ассортимента продукции растениеводства. Это связано с увеличением посевных земель, приобретением новой техники, а также заключением контрактов на поставку товаров. В исправительном учреждении имеются все необходимые виды ресурсов для увеличения доходов, а впоследствии и увеличения финансовой выгоды [2]. Можно констатировать, что учреждению выгоднее всего заниматься растениеводством, так как на его базе имеется тепличное хозяйство, позволяющее приносить доход круглый год. Кроме того, тепличное хозяйство полностью оснащено: проведена вода, отопление, имеется в достаточном количестве вся необходимая сельскохозяйственная техника, благодаря чему учреждение может прийти к сглаживанию сезонности и обеспечивать не только себя, но и другие учреждения необходимыми товарами круглый год.

Результаты и их обсуждение. Однако, как показала практика, мощность теплиц используется не полностью по периодам времени, что снижает экономическую эффективность сельскохозяйственного производства.

Рассмотрим сроки посадки и снятия сельскохозяйственной продукции в тепличном хозяйстве учреждения системы ФСИН (таблица 2).

Таблица 2– Сроки выращивания сельскохозяйственной продукции в тепличном хозяйстве учреждения системы ФСИНв N+2 году

Вид тепличной продукции	Сроки выращивания сельскохозяйственной продукции		Дни выращивания, сутки	Площадь под посев, га
	Дата посадки	Дата снятия урожая		
1	2	3	4	5
Огурцы свежие	01.03	05.04	35	0,5
Помидоры свежие	10.03	05.05	50	0,2
Растениеводство:				
Тюльпаны	01.02	07.03	40	0,2
Петуния	05.03	15.04	45	0,16
Сильвия	01.03	01.04	35	0,09
Цинерария	12.02	28.03	45	0,06
Астерия	15.01	20.02	45	0,06

Анализ показывает, что в N+2 году тепличная продукция выращивалась в основном в период январь-май. Остальное время года (а именно июнь-декабрь) мощности теплиц не задействованы, а значит, посадка сельскохозяйственных культур не производилась. Отметим, что в теплице наибольший период пребывают помидоры (50 суток) с занимаемой площадью 0,2 га, а также рассада цветов (общей сложностью 35-45 суток) площадью 0,57 га. График использования мощности представлен на рисунке 1.

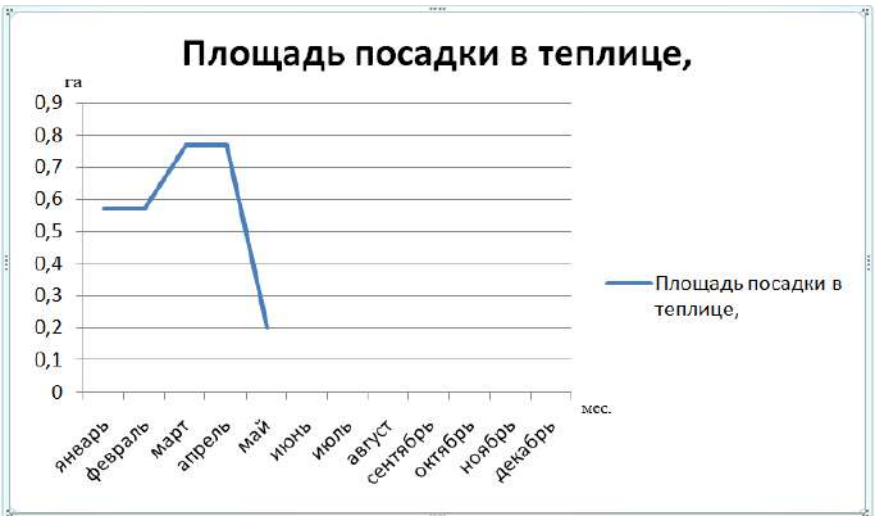


Рисунок - 1. Фактические площади посадки в теплице в N+2 году

Наглядность графика убеждает нас в мысли, что необходимо производить посадку тепличной продукции в летний и осенний периоды. Этот недостаток можно устранить путём организации производства сельскохозяйственной продукции в осенне-зимний период в тепличном хозяйстве. При этом следует рационально использовать имеющиеся, учитывая потребности рынка и возможности реализации производимой продукции.

Для того, чтобы сгладить показатели сезонности загрузки и прийти к экономической эффективности производства тепличной продукции предлагаем выращивать продукцию и в период лето-осень, то есть производить посадку свежих огурцов и помидор для использования их осенью и зимой в рационе питания осужденных [4], для поставки свежей продукции в другие учреждения, так же выращивать цветы такие как хризантемы и гладиолусы перед праздником 1 сентября для обеспечения магазинов (таблица 3).

Таблица 3 - Сроки и площади выращивания продукции при реализации проекта

Вид тепличной продукции	Выращивание сельскохозяйственной продукции в осенне-зимнем периоде		Дни выращивания, сутки	Площадь под посев, га
	Дата посадки	Дата снятия урожая		
Огурцы свежие	01.09.	05.10.	35	0,05
Помидоры свежие	05.09.	25.10.	50	0,02
Растениеводство:				
Хризантемы	28.07.	28.08.	30	0,35
Гладиолусы	01.07.	25.08.	55	0,22

Данные мероприятия не только повысят объем производства, но и станут важным фактором повышения экономической эффективности использования имеющихся производственных мощностей, а также улучшат показатели экономической эффективности работы учреждения в целом. Данные изменения отражены графиком на рисунке 2.

Из графика видно, что в летний период свободным месяцем остается июнь, так как основная посадка производится в открытом грунте в тот момент, как правило, тепличное хозяйство ведет подготовку земли к новому сезону.

Рисунок - 2. Площади посадки в теплице при сглаживании сезонности

Рассмотрим, как изменятся основные показатели экономической эффективности работы тепличного хозяйства в случае реализации предлагаемых мероприятий (таблица 4)

Таблица 4 - Планируемые показатели при сглаживании сезонности в тепличном хозяйстве учреждения

Показатели	Анализируемый период		Изменение N+2 года к прогнозу	
	N+2 год	Прогноз	Абсолютные изменения, тыс. руб.	Относительные изменения, %
Объем производства товаров, выполненных работ и оказанных услуг, тыс. руб.	32660,6	51046,1	18385,55	156,29
Себестоимость произведенной продукции, тыс. руб.	30849,6	46625,61	15776	151,14
Превышение доходов над расходами произведенной продукции, тыс. руб.	1810,94	4420,49	2609,55	244,1
Затраты на 1 руб. реализованной продукции, коп.	0,94	0,91	-0,03	97,17
Фондоотдача, руб./руб.	3,44	5,38	1,94	-
Рентабельность продукции, %	5,9	9,48	3,58	-

Прогнозные расчеты позволяют установить следующее, что:

- объем производства продукции можно увеличить на 18385,55 тыс. руб. или на 56,3 %;
- существенно для учреждения повысить показатель превышения доходов над расходами произведенной продукции на 2609,55 тыс. руб. или на 44,09 %;
- увеличить фондоотдачу на 1,94 руб.;
- повысить рентабельность на 3,6 %.

Вывод. Для достижения этих экономических показателей непосредственно внутри хозяйства следует предпринять следующие меры:

- более равномерно использовать труд осуждённых в течение года;
- высаживать круглогодично в условиях отапливаемых теплиц различные виды сельскохозяйственных культур;
- применять новые доступные виды удобрений.

Все это позволит учреждению выйти на новый более высокий уровень самообеспеченности, а значит повысить свою продовольственную безопасность.

Список литературы

1. Зазуля А.Н., Нагорнов С.А. Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства // Сборник научных докладов XXI Международной научно-практической конференции. Тамбов. 2021- С. 7 – 12

2. Гаспарян С.В. Экономические аспекты сельскохозяйственного производства в интегрированных формированиях агропромышленного комплекса. /– Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. – 140 с.

3. Макарова О.В., Гаспарян С.В. Специфика продовольственного обеспечения учреждений уголовно-исполнительной системы // Курск: ЗАО «Университетская книга», 2020. – 61 с.

4. Макарова О.В., Гаспарян С.В., Цацина М.Н. Повышение экономической эффективности сельскохозяйственного производства пенитенциарной системы // Международный сельскохозяйственный журнал. – 2020. № 1 - С 43-46

5. Измайлов А.Ю., Макаров В.А. К вопросу обоснования технико-экономического уровня сельскохозяйственных машин и оборудования //Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2016. -№3. - С.17-19.

6. Фадькин Г.Н., Шемякин А.В., Лупова Е.И., Втноградов Д.В. Агрохимические приемы повышения продуктивности севооборота // материалы V Международной научно-практической конференции. Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных агротехнологий. Рязань, 2021.С. 423-427

7. Латышенок Н.М., Шемякин А.В., Латышенок М.Б., Цымбал А.А., Мусаев Ф.А. Повышение эффективности хранения семенного зерна в малых крестьянско-фермерских хозяйствах // Вестник РГАТУ. – 2021 № 4– С.144-151.

8. Кибиров А.Я., Новожилова Ж.С. Организационно-экономические механизмы инновационного развития агропромышленного производства учреждений уголовно-исполнительной системы (УИС). Агропродовольственная политика России. 2016. № 2 (50). С. 13-19

References

1. Zazulya A.N., Nagornov S.A. Improving the efficiency of the use of resources in the production of agricultural products - new technologies and equipment of a new generation for crop production and animal husbandry // Collection of scientific reports of the XXI International Scientific and Practical Conference. Tambov. 2021- p . 7-12

2. Gasparyan S.V. Economic aspects of agricultural production in integrated formations of the agro-industrial complex. /- Kursk: CJSC "University Book", 2016. - 140 p.

3. Makarova O.V., Gasparyan S.V. Specifics of food supply of institutions of the penal system // - Kursk: CJSC "University book", 2020. - 61 p.

4. Makarova O.V., Gasparyan S.V., Tsatsina M.N. Improving the economic efficiency of agricultural production of the penitentiary system // International Agricultural Journal. - 2020. No. 1 - From 43-46

5. Izmailov A.Yu., Makarov V.A. On the issue of substantiation of the technical and economic level of agricultural machinery and equipment //Agricultural machines and technologies. - 2016. -No.3. - pp.17-19.

6. Fadkin G.N., Shemyakin A.V., Lupova E.I., Vtnogradov D.V. Agrochemical techniques for increasing crop rotation productivity // Materials of the V International Scientific and Practical Conference. Ecological state of the natural environment and scientific and practical aspects of modern agricultural technologies. Ryazan, 2021.pp. 423-427

7. Latyshenok N.M., Shemyakin A.V., Latyshenok M.B., Tsymbal A.A., Musaev F.A. Improving the efficiency of seed grain storage in small peasant farms. Vestnik RGATU. - 2021 No. 4- pp.144-151.

8. Kibirov A.Ya., Novozhilova Zh.S. Organizational and economic mechanisms of innovative development of agro-industrial production of institutions of the penal system (UIS). Agro-food policy of Russia. 2016. No. 2 (50). p. 13-19

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

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

Макаров Валентин Алексеевич – доктор технических наук, профессор Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, Россия, г. Рязань, e- mail: va_makarov@rambler.ru

Макарова Ольга Владимировна – доктор экономических наук, профессор Академии права и управления ФСИН России, Россия, г. Рязань, e-mail: m_ov_2302@bk.ru

Гаспарян Светлана Валентиновна – кандидат экономических наук, доцент Академии права и управления ФСИН России, Россия, г. Рязань, e-mail: gasparyan.svetlana@yandex.ru

Author credentials

Affiliation

Zazulya Alexander - Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: zazulja_an@rambler.ru

Makarov Valentin - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, Russia, Ryazan, e-mail: va_makarov@rambler.ru

Makarova Olga Vladimirovna - Doctor of Economics, Professor of the Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service of Russia, Russia, Ryazan, e-mail: m_ov_2302@bk.ru

Gasparyan Svetlana - Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Academy of Law and Management of the Federal Penitentiary Service of Russia, Russia, Ryazan, e-mail: gasparyan.svetlana@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 31.01.2022 Принята к публикации (Accepted): 09.02.2022

УДК 662.75
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-71-81

РАСЧЕТ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ КОМБИНИРОВАННОГО СМЕСИТЕЛЯ

[1]Мещеряков Александр Геннадьевич
[1]Мещерякова Юлия Владимировна
[1]Нагорнов Станислав Александрович

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

Реферат. *Одно из перспективных направлений по улучшению качества дизельного топлива является комбинированная обработка топлива волновым воздействием в совокупности с добавлением биотоплива на основе некондиционных растительных масел и растительных масел непищевого происхождения. Комбинированная обработка позволяет изменять структуру и свойства исходного топлива без использования реагентов, а биодобавка улучшить экологические показатели качества топлива. Комбинирование ультразвуковых колебаний с многофакторным механовоздействием позволит добиться наилучшего результата. Проводили расчёт параметров ультразвуковой пластины (длина, толщина, угол заточки) и сопла ультразвукового излучателя (высота и ширина). Для подбора оптимальных размеров ультразвуковой пластины были введены параметры λ и λ1. По мере увеличения λ от 0,1 до 1 геометрическая форма сопла из выраженной прямоугольной переходит в квадратную форму. При прямоугольной форме сопла скорость потока жидко-*

сти на краях струи отличается от скорости в центре на величину погрешности. В случае квадратного сопла отличие скоростей на краях и в центре становится более выраженным. Таким образом, оптимальным можно считать λ взятую в диапазоне от 0,1 до 0,4. Выбор конкретного λ зависит от необходимых характеристик ультразвукового излучателя и давления в системе питания дизельного двигателя. Установлено, что при увеличении частоты колебаний длина колебательной пластины уменьшается. Наибольшая длина пластины требуется для дизельного топлива, и составляет 25 мм при 25 кГц. Наименьшая длина пластины для дизельного смесевого 50% топлива, а именно 7,41 мм при частоте колебания пластины 200 кГц. Таким образом, выбор параметров ультразвуковой пластины и сопла излучателя зависит от характеристик используемого топлива и топливной аппаратуры, в какую планируется встраивать смеситель.

Ключевые слова: *ультразвуковая пластина, сопло, параметры, смеситель, излучатель, топливо.*

CALCULATION AND INVESTIGATION OF PARAMETERS OF THE ULTRASONIC RADIATOR OF THE COMBINED MIXER

[1]Meshcheryakov Alexander
[1]Meshcheryakova Yulia
[1]Nagornov Stanislav
[1]FSBSI All-Russian Scientific Research Institute of Use of Machinery and Oil Products in Agriculture, Tambov

Abstract. *One of the promising directions for improving the quality of diesel fuel is the combined processing of fuel by wave action in conjunction with the addition of biofuels based on substandard vegetable oils and vegetable oils of non-food origin. Combined processing allows you to change the structure and properties of the original fuel without the use of reagents, and the bioadditive improves the environmental performance of fuel quality. The combination of ultrasonic vibrations with multifactorial mechanical action will achieve the best result. The parameters of the ultrasonic plate (length, thickness, sharpening angle) and the nozzle of the ultrasonic emitter (height and width) were calculated. The parameters λ and λ1 were introduced to select the optimal dimensions of the ultrasonic plate. As λ increases from 0.1 to 1, the geometric shape of the nozzle changes from a pronounced rectangular shape to a square one. With a rectangular nozzle, the fluid flow velocity at the edges of the jet differs from the velocity in the center by an error value. In the case of a square nozzle, the difference in velocities at the edges and in the center becomes more pronounced. Thus, λ taken in the range from 0.1 to 0.4 can be considered optimal. The choice of a specific λ depends on the required characteristics of the ultrasonic transducer and the pressure in the diesel engine power supply system. It has been established that with an increase in the oscillation frequency, the length of the oscillation plate decreases. The longest plate length required for diesel fuel is 25 mm at 25 kHz. The smallest plate length for diesel mixed 50% fuel, namely 7.41 mm at a plate oscillation frequency of 200 kHz. Thus, the choice of parameters of the ultrasonic plate and emitter nozzle depends on the characteristics of the fuel used and the fuel equipment into which the mixer is planned to be built.*

Keywords: *ultrasonic plate, nozzle, parameters, mixer, emitter, fuel.*

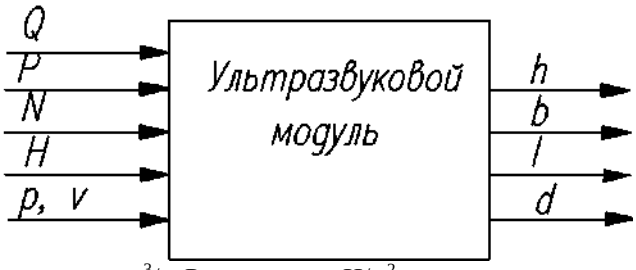
Введение. Использование дизельных двигателей в современном машиностроении позволяет повысить экономичность, мощность, надежность, долговечность эксплуатируемой техники, поэтому он нашел широкое применение в различных отраслях промышленно-экономического комплекса.

В агропромышленном комплексе основную долю ДВС составляют дизельные двигатели. Качество работы дизельного двигателя напрямую зависит от физико-химических свойств используемого топлива. В последнее время для улучшения свойств дизельного топлива применяется биодизельное топливо на основе метиловых эфиров различных растительных масел [1-7]. Одним из современных и перспективных направлений становится механическая обработка жидкости, которая способна без добавления специальных реагентов менять свойства обрабатываемой жидкости за счет волнового воздействия. Волновая или механическая обработка включает в себя кинематиче-

ское, кавитационное, ультразвуковое воздействие на обрабатываемое топливо в специальном сконструированном модуль-смесителе [8].

Целью данной работы является установление параметров ультразвуковой пластины (длина, толщина, угол заточки) и сопла ультразвукового излучателя (высота и ширина).

Материалы и методы. Объектом исследования является ультразвуковая пластина комбинированного модуль-смесителя для обработки дизельного и дизельного смесевого топлива с целью улучшения его свойств. На рисунке 1 представлены основные входные (полученные на основе предварительных экспериментальных данных на лабораторной установке) и выходные параметры ультразвуковой обработки. Зная некоторые параметры протекающей жидкости (дизельного топлива, смесевого топлива) и предварительные параметры ультразвуковой обработки, необходимо рассчитать параметры ультразвуковой пластины: высоту и ширину сопла, угол заточки пластины, длину и толщину ультразвуковой пластины.



Q – расход жидкости, м^3/с; P – давление, Н/м^2; ρ – плотность жидкости, кг/м^3;
ν – кинематическая вязкость жидкости, мм^2/с, N – мощность излучателя, кВт; H_{z1} – частота колебаний, кГц; h – высота сопла, м; b – ширина сопла, м; l – длина ультразвуковой пластины, м; d - толщина пластины, м; β – угол заточки пластины °.

Рисунок 1 – Основные параметры ультразвуковой обработки

Результаты и их обсуждение. Основные параметры рассчитывали по известным [9], формулам (1-6).

$$F = \frac{Q}{U} \tag{1}$$

где F – площадь сопла, м^2;
U – скорость истекающей жидкости, м/с
Q – расход жидкости.

$$F = h \cdot b \tag{2}$$

где h – высота сопла, м;
b – ширина сопла, м.

$$U = \mu\sqrt{2gh} \tag{3}$$

где μ – коэффициент потока жидкости
g – ускорение свободного падения, м/с^2
H – гидродинамический напор, МПа.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{4}$$

где ν - кинематическая вязкость, мм^2/с;
ρ – плотность жидкости, кг/м^3.

$$\mathrm{H} = z + \frac{P}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} \tag{5}$$

где U – скорость истекающей жидкости
γ – удельный вес жидкости, Н/м^3
P – давление в центре тяжести сечения потока, Н/м^2
z – высота положения или геометрический напор - расстояние от произвольно выбранной горизонтальной плоскости сравнения до центра тяжести сечения.

$$\gamma = \rho \cdot g \tag{6}$$

После некоторых преобразований получаем следующую систему уравнений (7):

$$\begin{cases} F = \frac{Q}{U} \\ U = \nu\rho\sqrt{2gH} \\ H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} \end{cases} \quad (7)$$

Если подставить второе уравнение системы в третье, получим уравнение (8):

$$H(1 - \nu^2\rho^2) = z + \frac{P}{\rho g} \quad (8)$$

Откуда уравнения (9-10),

$$U = \nu\rho\sqrt{\frac{z\rho g + P}{\rho g(1-\nu^2\rho^2)}} \quad (9)$$

$$F = \frac{Q}{\nu\rho}\sqrt{\frac{\rho g(1-\nu^2\rho^2)}{z\rho g + P}} \quad (10)$$

Введем коэффициент λ, учитывающий геометрию сопла (показывает отношение высоты к ширине сопла) и коэффициент λ_1, учитывающий отношение ширины сопла к толщине пластины (рисунок 2). Если λ=1 получаем частный случай квадрат.

Для сопла квадратной формы имеем (11)

$$h = b = \sqrt{F} \quad (11)$$

для прямоугольной (12-13):

$$b = \lambda H \quad (12)$$

$$h \cdot \lambda h = F \quad (13)$$

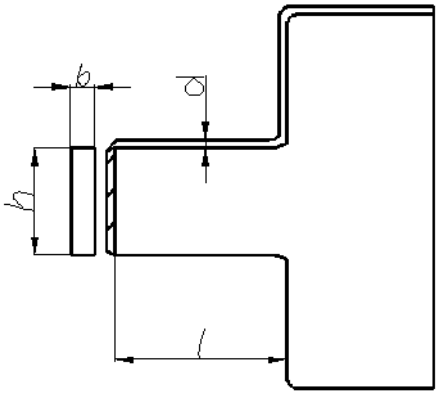


Рисунок 2 – Схема ультразвуковой пластины

Исходя из этого получаем следующую систему уравнений (14):

$$\begin{cases} b = \lambda h \\ \lambda h^2 = \frac{Q}{\nu\rho} \cdot \sqrt{\frac{\rho g(1-\nu^2\rho^2}{z\rho g + P}} \end{cases} \quad (14)$$

Известно [10], что (15)

$$N_{уз} = \frac{m}{2 \cdot 10^3 t}(U_2^2 - U_{max}^2) \quad (15)$$

где $N_{уз}$ – мощность ультразвукового излучателя, кВт

m – масса жидкости, г

t – время перемещения частицы на пути S, с

U_2 – средняя скорость частицы жидкости на участке перемещения пластины, м/с

U_{max} – скорость жидкости при которой закачивается кавитация, м/с.

$$t = \frac{1}{2f\mathrm{H}_{zp}} \quad (16)$$

где f – амплитуда колебания пластинки

H_{zp} – резонансная частота ультразвука, кГц

$$U_2 = 4f\mathrm{H}_{zp} \quad (17)$$

$$U_{mac} = U_2\sqrt{\frac{1}{k_k+1}}4f\mathrm{H}_{zp} \quad (18)$$

где k_k – критическое число кавитаций, для дизельного топлива 1,05…3,5

$$k_k = \frac{H_{\text{нп}}-\mathrm{H}_2}{\mathrm{H}_2} \quad (19)$$

где $H_{\text{нп}}$ – давление насыщенных паров дизельного топлива, 0,02 МПа

H_2 – гидродинамический напор, истекающей из сопла излучателя, МПа.

Если подставить формулы 16-18 в формулу 15 получим формулу 20:

$$N_{\text{уз}} = \frac{m\cdot 16f^3H_{zn}^3}{10^3}\cdot\frac{k_k}{k_k+1} \quad (20)$$

$$f = \frac{P_5l^3}{3EJ_z} \quad (21)$$

где P_5 – усилие, действующее на пластинку перпендикулярно оси заточки, создающее колебание пластины, Н;

l – длина консоли, м;

E – модуль упругости материала (в нашем случае $2\cdot10^5$ МПа), МПа;

J_z – момент инерции сечения, м^4.

$$P_5 = 2P\cdot sin\beta\cdot cos\beta = Psin2\beta \quad (22)$$

где β – половина угла заточки, °;

P – усилие, действующее на пластину, Н.

$$J_z = \frac{hb^3}{12} \quad (23)$$

где H – высота сечения, м;

b – ширина сечения, м.

Если подставить уравнение 22-23 в 21 получим уравнение (24):

$$f = \frac{2Psin2\beta l^3}{10^5hb^3} \quad (24)$$

$$P = \frac{E_{\text{кин}}}{S} = \frac{mQ^2}{2h^2b^2S} = \frac{mQ^2}{2h^3b^3} = \frac{\rho Q^3}{2gh^3b^3} \quad (25)$$

Подставим уравнение 25 в 24, получим уравнение 26.

$$f = \frac{\rho Q^3sin2\beta l^3}{10^5gh^4b^6} \quad (26)$$

$$H_{zn} = 2H_{z1} \quad (27)$$

где H_{z1} – частота колебания пластинки, кГц

$$\mathrm{H}_{z1} = \frac{22{,}4d}{2\pi l^3\sqrt{3}}\sqrt{\frac{E}{\rho_1}} \quad (28)$$

где l – длина пластины, м

d – толщина пластины, м

E – модуль упругости, МПа,

ρ_1 – плотность материала пластины, кг/м^3.

Для прямоугольной формы $b = \lambda h$, допустим, что $b = \lambda_1 d$, тогда $\lambda h = \lambda_1 d$, из этого следует $d = \frac{\lambda}{\lambda_1}h$ или уравнение (29)

$$d = \frac{\lambda}{\lambda_1}\sqrt{F} \quad (29)$$

Из формулы 28 и 29 получаем расчет длины пластины (31), через введённый коэффициент λ.

$$l = \sqrt{\frac{22{,}4\frac{\lambda}{\lambda_1}\sqrt{F}}{2\pi Hz_1}\sqrt{\frac{E}{\rho_1}}} \quad (31)$$

Из формулы 27 получаем формулу (32) для расчета угла заточки:

$$sin2\beta = \frac{f\cdot10^5\cdot gh^4\cdot b^6}{\rho Q^3l^3} \quad (32)$$

откуда половина угла заточки (33):

$$\beta = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{f\cdot10^5\cdot gh^4\cdot b^6}{\rho Q^3l^3}\right) \quad (33)$$

Для упрощения расчётов параметров ультразвукового излучателя и анализа различного рода зависимостей было написано программное обеспечение.

На рисунке 3 показана, зависимость площади сечения сопла ультразвукового модуля от давления, подаваемого насосом. С ростом процентного содержания биотоплива в дизельном топливе площадь сечения сопла убывает. За счет повышения давления возрастает расход жидкости, а это влечет за собой потребность в увеличении площади сечения сопла. С другой стороны, с ростом процентного содержания биотоплива в дизельном смесевом топливе возрастают вязкостно-плотностные характеристики топлива, из-за чего расход жидкости падает, а значит и площади сечения сопла уменьшаются.

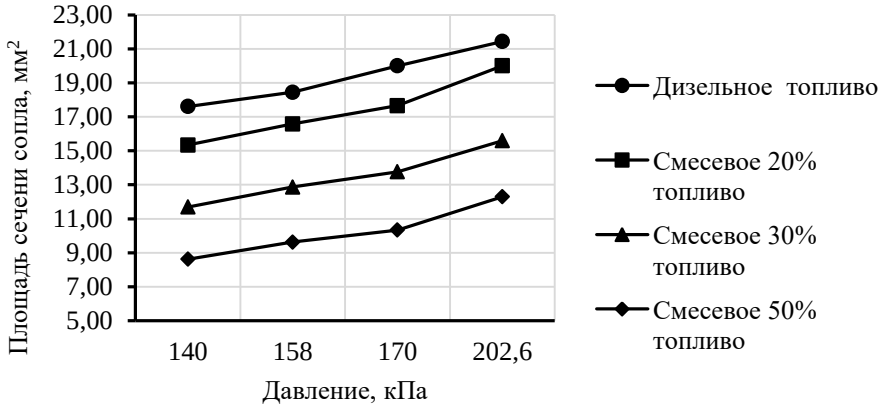
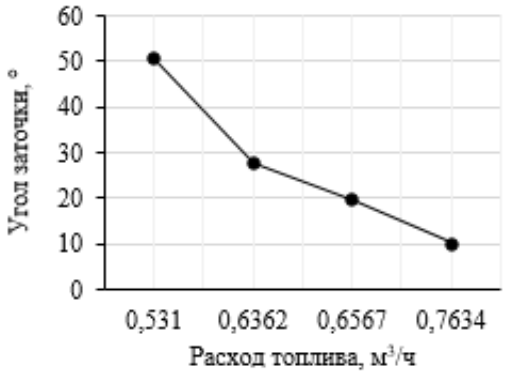
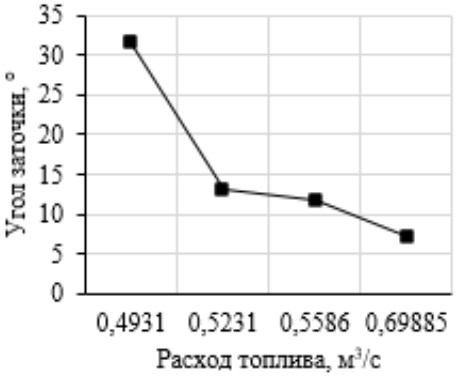


Рисунок 3 – Зависимость площади сечения сопла ультразвукового излучателя от давления, подаваемое насосом

Далее определяли угол заточки ультразвукового излучателя – пластины для разных видов дизельных смесевых топлив. На рисунке 4 а-г представлено изменение угла заточки от расхода топлива характерного для разных видов смесевых топлив при давлениях 140кПа, 158 кПа, 170 кПа, 202,6 кПа соответственно.



а) дизельное топливо



б) 20% дизельное смесевое топливо

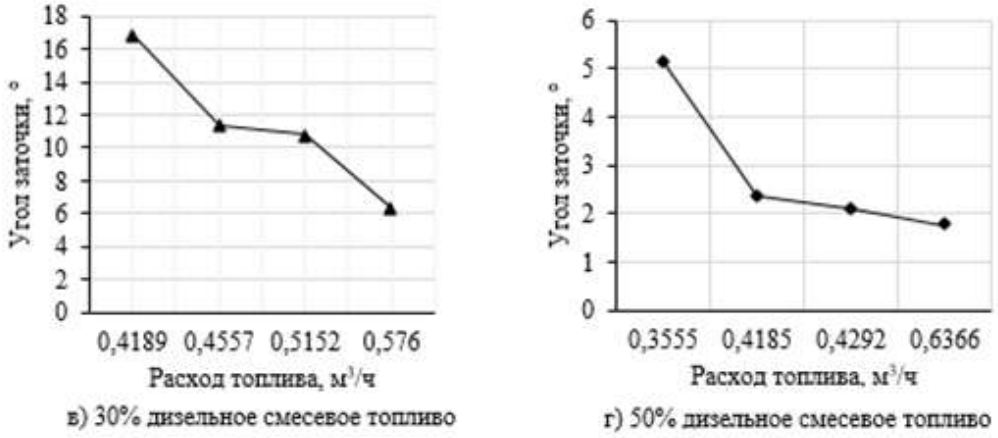


Рисунок 4 – Зависимость угла заточки от расхода топлива при λ=0,1, λ1=1,5

Установлено, что угол заточки для разных видов топлив отличается. Присутствует общая тенденция - с ростом расхода топлива угол заточки пластины уменьшается.

На рисунке 5 а-г при аналогичных параметрах по расходу, но других λ=0,3, λ1=1,5, угол заточки для дизельного топлива и дизельных смесевых 20%, 30%, 50% топлив уменьшается по сравнению с показателями при λ=0,1. Таким образом, по мере увеличения параметра λ, т.е., чем сопло ультразвукового излучателя шире и ниже, тем угол заточки пластины меньше.

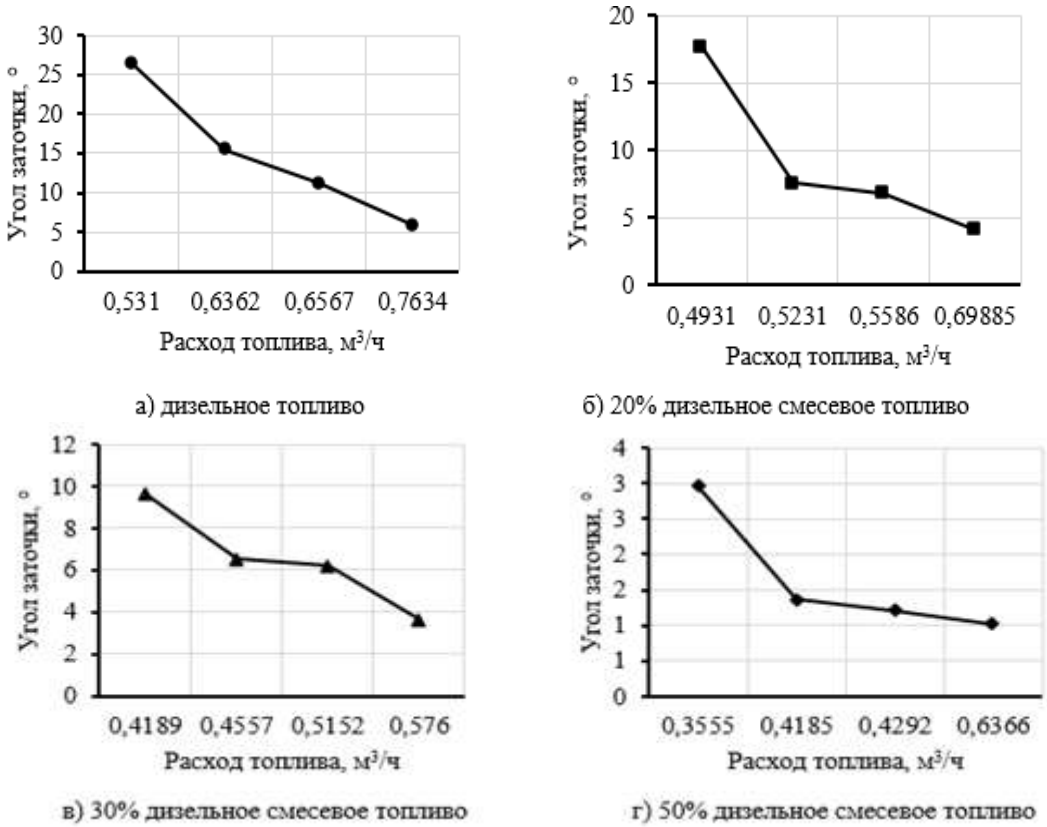
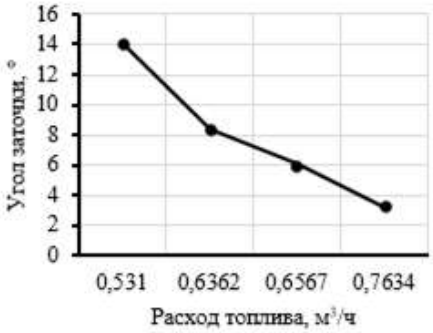
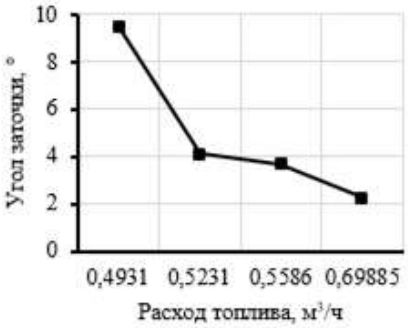


Рисунок 5 – Зависимость угла заточки от расхода жидкости при λ=0,3, λ1=1,5

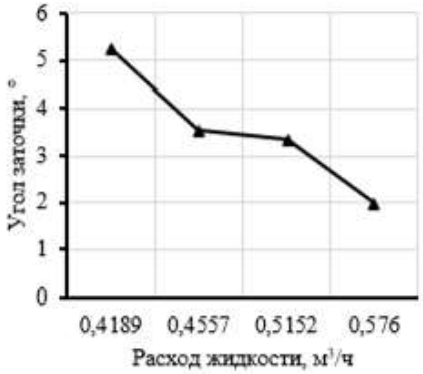
На рисунках 6 - 7 а-г видно, что при увеличении параметра λ1 (от 1 до 2,5) угол заточки ультразвуковой пластины для дизельного топлива и дизельных смесевых 20%, 30%, 50% топлив увеличивается. Следовательно, по мере уменьшения толщины пластины, угол заточки увеличивается.



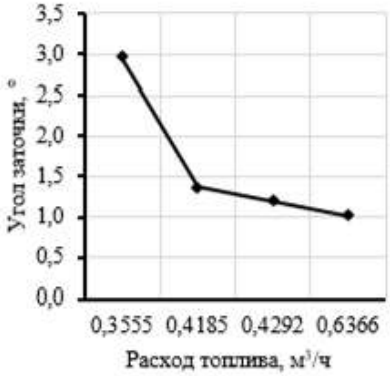
а) дизельное топливо



б) 20% дизельное смесевое топливо

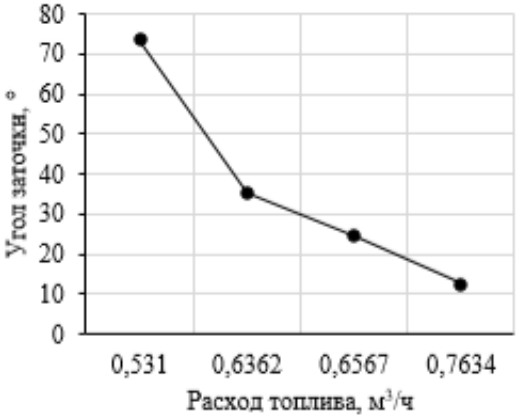


в) 30% дизельное смесевое топливо

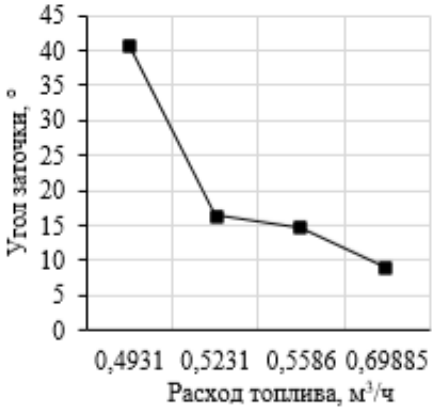


г) 50% дизельное смесевое топливо

Рисунок 6 – Зависимость угла заточки от расхода жидкости при λ=0,3, λ1=1



а) дизельное топливо



б) 20% дизельное смесевое топливо

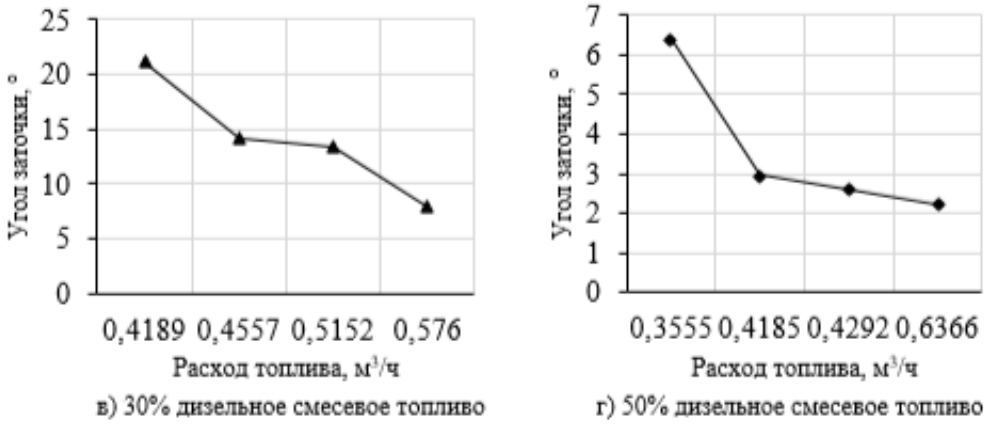


Рисунок 7 – Зависимость угла заточки от расхода жидкости при λ=0,3, λ1=2,5

Установлено, что угол заточки пластины ультразвукового излучателя уменьшается с ростом расхода жидкости. Кроме того, по мере увеличения параметра λ, т.е. чем сопло ультразвукового излучателя шире и ниже, тем угол заточки пластины меньше. Также угол заточки пластины зависит ее от толщины, а именно, чем пластина толще, тем ее угол заточки должен быть больше. Так наименьший угол может достигаться при λ=1 и λ1=1, то есть при сопле квадратной формы и тонкой пластинки. Так угол для дизельного топлива составляет 1,75°, для смесевого 20% - 1,23°, для 30% - 1,09°, для 50% - 0,3°. Максимальный угол заточки достигается при λ=0,1 и λ1=2,5 для дизельного топлива составляет 88°, для смесевого 20% - 78°, для 30% - 38,69°, для 50% - 11,09°.

По мере увеличения λ от 0,1 до 1 геометрическая форма сопла из выраженной прямоугольной переходит в квадратную форму. При прямоугольной форме сопла скорость потока жидкости на краях струи отличается от скорости в центре на величину погрешности. Когда сопло квадратное отличие скоростей на краях и в центре становится более выраженным. Таким образом, оптимальным можно считать λ взятую в диапазоне от 0,1 до 0,4.

Выбор конкретного λ зависит от необходимых характеристик ультразвукового излучателя и давления в системе питания дизельного двигателя.

Параметр λ1 может быть взят из диапазона от 1 до 2,5. По мере его увеличения толщина пластины уменьшается прямо пропорционально. Выбор конкретного λ1 зависит от выбранного λ и частоты колебания пластины. В большинстве случаев λ1 остается в диапазоне от 1,4 до 1,8.

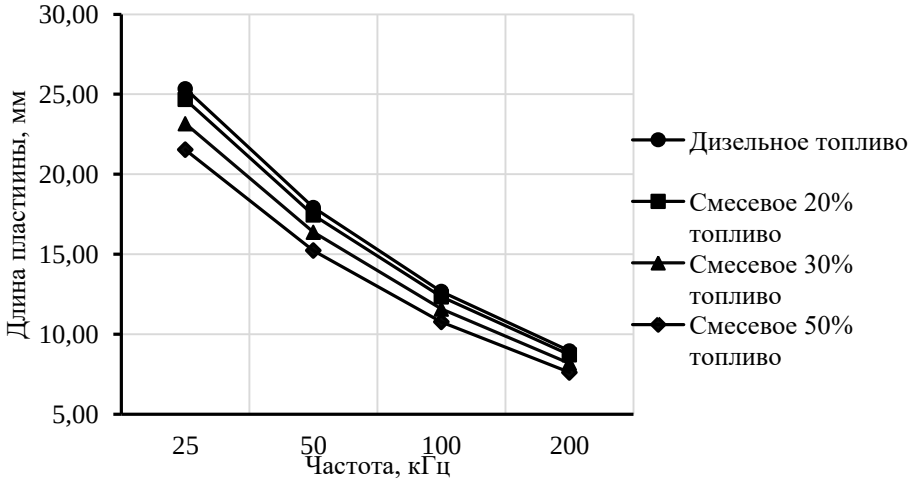


Рисунок 8 – Зависимость длины пластины от частоты модуля при λ=0,1, λ1=1,5, P=140кПа, Nуз =55 Вт

Изменение λ и λ1 влечет за собой корректировку угла заточки, частоты колебания и длины пластины, как следствие, влияет на все параметры и характеристики ультразвукового излучателя.

Далее определяли длину пластины в зависимости от частоты колебаний (рисунок 8). Установлено, что при увеличении частоты колебаний длина колебательной пластины уменьшается. Наибольшая длина пластины требуется для дизельного топлива, и составляет 25 мм при 25 кГц. Наименьшая длина пластины для дизельного смесевого 50% топлива, а именно 7,41 мм при частоте колебания пластины 200 кГц.

Заключение. Таким образом, выбор параметров ультразвуковой пластины и сопла излучателя зависит от характеристик используемого топлива и топливной аппаратуры, в какую планируется встраивать смеситель. Изменение λ и λ1 влечет за собой корректировку угла заточки, частоты колебания и длины пластины, как следствие, влияет на все параметры и характеристики ультразвукового излучателя. Основным ограничением на параметры ультразвукового излучателя является техническая возможность его реализации.

Список литературы

1. Улюкина, Е. А. Особенности применения биотоплива в сельскохозяйственном производстве / Е. А. Улюкина // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина". – 2019. – № 6(94). – С. 23-27.

2. Нагорнов, С. А. Экспериментальное исследование работы дизельного двигателя на смесевом топливе / С. А. Нагорнов, Ю. В. Мещерякова, А. Г. Мещеряков // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – № 1. – С. 9-11.

3. Мещерякова, Ю. В. Получение сырья для биодизельного топлива на основе масла микроводоросли хлорелла / Ю. В. Мещерякова, С. А. Нагорнов // Инновации в сельском хозяйстве. – 2013. – № 3(5). – С. 39-41.

4. Мещерякова, Ю. В. Технология получения биодизельного топлива из биомассы микроводоросли / Ю. В. Мещерякова // Наука в центральной России. – 2013. – № 3. – С. 76-79.

5. Метиловый эфир подсолнечного масла как экологический компонент нефтяных моторных топлив / В.А. Марков, С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – № 4(46). – С. 29-41.

6. Использование смесей дизельного топлива и метилового эфира подсолнечного масла в качестве моторного топлива / В.А. Марков, С.Н. Девянин, Е.А. Улюкина, Н.Н. Пуляев // Грузовик. – 2016. – № 1. – С. 37-48.

7. Систер, В.Г. Технологии получения биодизельного топлива / В.Г. Систер, Е.М. Иванникова, А.И. Ямчук // Известия МГТУ МАМИ. – 2013. – Т. 2. – № 3(17). – С. 109-112.

8. Мещеряков, А. Г. Исследование работы топливной аппаратуры трактора на смесевом топливе с встроенным модульным смесителем / А. Г. Мещеряков, С. А. Нагорнов, Ю. В. Мещерякова // Наука в центральной России. – 2021. – № 5(53). – С. 90-95.

9. Калекин А.А. Основы гидравлики и технической гидромеханики / А.А. Калекин. – М.: Мир, 2008. – 280 с.

10. Егоров И.Н. Улучшение эксплуатационных свойств дизельных топлив в условиях сельскохозяйственного производства: дис. … канд. Тех. наук: 05.20.03: утв.1983. - Великие Луки, 1983. – 290 с.

References

1. Ulyukina, E. A. Features of the use of biofuels in agricultural production / E. A. Ulyukina // Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin". - 2019. - No. 6 (94). - S. 23-27.

2. Nagornov, S. A., Meshcheryakova, Yu. V., and Meshcheryakov, A. G. Experimental study of the operation of a mixed fuel diesel engine, Tractors and agricultural machines. - 2016. - No. 1. - P. 9-11.

3. Meshcheryakova, Yu. V. Obtaining raw materials for biodiesel fuel based on chlorella microalgae oil / Yu. V. Meshcheryakova, SA Nagornov // Innovations in agriculture. - 2013. - No. 3(5). - S. 39-41.

4. Meshcheryakova, Yu. V. Technology for obtaining biodiesel fuel from microalgae biomass / Yu. V. Meshcheryakova // Science in Central Russia. - 2013. - No. 3. - P. 76-79.

5. Methyl ester of sunflower oil as an ecological component of petroleum motor fuels / V.A. Markov, S.N. Devyanin, E.A. Ulyukin, N.N. Pulyaev // Transport on alternative fuel. - 2015. - No. 4 (46). - S. 29-41.

6. Use of mixtures of diesel fuel and sunflower oil methyl ether as a motor fuel / V.A. Markov, S.N. Devyanin, E.A. Ulyukin, N.N. Pulyaev // Truck. - 2016. - No. 1. - P. 37-48.

7. Sister, V.G. Technologies for obtaining biodiesel fuel / V.G. Sister, E.M. Ivannikova, A.I. Yamchuk // Proceedings of MSTU MAMI. - 2013. - T. 2. - No. 3 (17). - S. 109-112.

8. Meshcheryakov, A.G., Nagornov, S.A., and Meshcheryakova, Yu.V., Study of the fuel equipment of a mixed-fuel tractor with a built-in modular mixer, Science in Central Russia. - 2021. - No. 5(53). - S. 90-95.

9. Kalekin A.A. Fundamentals of hydraulics and technical hydromechanics / A.A. Kalekin. – M.: Mir, 2008. – 280 p.

10. Egorov I.N. Improving the performance properties of diesel fuels in agricultural production: dis. … cand. Those. Sciences: 05.20.03: approved.1983. - Velikiye Luki, 1983. - 290 p.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Мещеряков Александр Геннадьевич – соискатель, Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно- исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: alex_mec@bk.ru

Нагорнов Станислав Александрович - 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: snagornov@yandex.ru

Мещерякова Юлия Владимировна - 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: yulya-belova@yandex.ru

Author credentials

Affiliations

Meshcheryakov Alexander - applicant, Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: alex_mec@bk.ru.

Meshcheryakova Yulia - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: yulya-belova@yandex.ru.

Stanislav Nagornov - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", Russia, Tambov, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 02.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 12.02.2022

УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-81-91

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

[1]Ли Роман Иннакентьевич
[2]Псарев Дмитрий Николаевич
[3]Киба Мария Романовна
[1]Мельников Антон Юрьевич
[1]Быконя Андрей Николаевич

[1]ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк
[2]ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», г. Мичуринск
[3]ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный горный университет»

Реферат. *Введение дисперсных металлических частиц в полимерную матрицу многократно увеличивает коэффициент теплопроводности материала. Значения теплопроводности полимерных микрокомпозитов, определенные по формулам Оделевского и Миснара, отличаются от экспериментальных в меньшую сторону более чем на 60%. Необходима оценка пригодности известных аналитических формул для расчета коэффициента теплопроводности полимерных нанокомпозитов. Расчет теплопроводности полимерного двухкомпонентного нанокомпозита по формулам Максвелла, Оделевского и Дульнева показал, что расчетные значения теплопроводности отличаются от экспериментальных от 85,2 до 88,2 раза. Исследована теплопроводность нанокомпозитов на основе эластомера Ф-40С с наполнителями: алюминиевый нанопорошок, углеродные нанотрубки «Таунит». Экспериментально определены коэффициенты теплопроводности эластомерных нанокомпозитов с оптимальными составами, при которых достигаются наиболее высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства материалов. Состав №1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч. Состав №2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., углеродные нанотрубки «Таунит» – 0,1 масс.ч. По формуле Бургера определен поправочный коэффициент С и рассчитаны значения коэффициента теплопроводности нанокомпозитов с массовым содержанием алюминиевого нанопорошка* m_n *= 0,025; 0,05 и 0,1 масс.ч. Экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности* $\lambda_к$ *эластомерного нанокомпозита при различном содержании алюминиевого нанопорошка отличаются от 11 д 19%. Аналогичным образом получена формула Бургера для нанокомпозита, наполненного углеродными нанотрубками «Таунит». Экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности* $\lambda_к$ *эластомерного нанокомпозита при массовом содержании углеродных нанотрубок* m_n *= 0,05 и 0,15 масс.ч. отличаются от 19 д 20%. Формула Бургера, в сочетании с экспериментальными исследованиями, позволяет получить адекватную модель теплопроводности двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.*

Ключевые слова: *восстановление, подшипник, посадка, нанокомпозит, теплопроводность, расчет.*

THERMAL CONDUCTIVITY STUDY OF POLYMER NANOCOMPOSITES

[1]Li Roman
[2]Psarev Dmitry
[3]Kiba Maria
[1]Melnikov Anton
[1]Bykonya Andrew

[1]FGBOU VO "Lipetsk State Technical University"
[2]FGBOU VO "Michurinsky State Agrarian University"
[3]FGBOU VO "St. Petersburg State Mining University"

Abstract. *Introduction of dispersed metal particles into polymer matrix repeatedly increases coefficient of thermal conductivity of material. The thermal conductivity values of polymer microcomposites, determined by the Odelevsky and Misnar formulas, differ from the experimental values by more than 60%. It is necessary to evaluate the suitability of known analytical formulas for calculating the thermal conductivity coefficient of polymer nanocomposites. Calculation of the thermal conductivity of a polymer two-component nanocomposite according to the formulas of Maxwell, Odelevsky and Dulnev showed that the calculated values of thermal conductivity differ from experimental values from 85.2 to 88.2 times. Heat conductivity of nanocomposites on the basis of F-40S elastomer with fillers is investigated: aluminum nanopowder, carbon nanotubes of "Taunit". Thermal conductivity coefficients of elastomeric nanocomposites with optimal compositions at which the highest deformation-strength and adhesion properties of materials are achieved are experimentally determined. Composition No. 1: elastomer F-40S - 100 parts by weight, aluminum nanopowder - 0.075 parts by weight. Composition No. 2: elastomer F-40S - 100 parts by weight, carbon nanotubes "Taunit" - 0.1 parts by weight. According to the Burger formula, the correction coefficient C is determined and the values of the thermal conductivity coefficient of nanocomposites with a mass content of aluminum nanopowder mn = 0.025 are calculated; 0.05 and 0.1 pts.wt*

Experimental and calculated values of thermal conductivity coefficient of elastomeric nanocomposite with different content of aluminium nanopowder differ from 11 d 19%. Similarly, the Burger formula for a nanocomposite filled with Taunit carbon nanotubes was obtained. Experimental and calculated values of thermal conductivity coefficient of elastomeric nanocomposite with mass content of carbon nanotubes mn = 0.05 and 0.15 mass parts. differ from 11 d 19%. The Burger formula, in combination with experimental studies, allows us to obtain an adequate model of the thermal conductivity of two-component polymer nanocomposites.

Keywords: *recovery, bearing, fit, nanocomposite, thermal conductivity, calculation.*

Введение. Подшипник качения является наиболее многочисленной типовой деталью в конструкции автомобилей и тракторов. Износ посадочных мест подшипников снижает ресурс подшипников, валов, шестерен, корпусных деталей. Поэтому увеличение долговечности изношенных посадочных мест подшипников при восстановлении создает условия для повышения надежности подшипниковых узлов и машины в целом. Применение полимерных материалов при восстановлении исключает появление фреттинг-коррозии – основной причины изнашивания посадочных мест, увеличивает многократно ресурс последних, а также подшипников качения и сопрягаемых деталей соединения (валов, осей и корпусных деталей) [1- 8].

Одним из важных факторов, влияющих на ресурс подшипникового узла, является его тепловой баланс. Теплопроводность полимерных материалов отличается от аналогичного параметра металлов меньшую сторону на несколько порядков, поэтому наличие полимерного слоя в сопряжении деталей подшипникового узла несколько затрудняет теплоотвод от вращающихся деталей подшипника. В конечном итоге температура подшипников на полимерной посадке на 3 – 5^0С превышает температуру подшипников со стандартной посадкой [9-10]. Это превышение температуры не влияет отрицательно на ресурс подшипника, однако в тяжело нагруженных подшипниковых узлах, работающих при повышенных температурах окружающей среды, возможно значительное увеличение температуры, перегрев и снижение долговечности подшипника. В этой связи, в настоящее время, для восстановления посадочных мест подшипников используют полимерные композиты. Введение дисперсных металлических частиц в полимерную матрицу многократно увеличивает коэффициент теплопроводности материала. Например, наполнение анаэробного герметика АН-112 металлическими микроразмерными частицами увеличивает коэффициент теплопроводности материала в 23 раза (от 0,44 до 10,06 Вт/м*К), эластомера Ф-40С – 73,96 раза (от 0,27 до 19,97 Вт/м*К).

В сравнении с не наполненным герметиком, температура подшипников на посадке из композита на основе АН-112 значительно уменьшилась на 12^oС [11-12].

В настоящее время все большее применение при восстановлении посадочных мест подшипников получают полимерные нанокомпозиты. Наночастицы отличаются от микроразмерных частиц наполнителя высокой удельной поверхностью и поэтому в единице объема полимерной матрицы их количество будет значительно больше. В итоге наполнение и высокие механические свойства полимерные нанокомпозиты имеют место при очень низкой концентрации наночастиц (до 5%) [13…17].

В работе [18] исследована теплопроводность трехкомпонентных микрокомпозитов на основе двух различных полимерных матриц: диметилсилоксанового каучука СКТН-А и полиуретана Сурэл-7, наполненных кварцем молотым пылевидным, алюминия нитридом и электрокорундом. Расчет теплопроводности композитов по формулам Оделевского и Миснара, сравнение расчетных значений с экспериментальными показали, что расчетные значения отличаются от экспериментальных в меньшую сторону. Чем больше отношение теплопроводности наполнителя $\lambda_н$ к теплопроводности полимерной матрицы $\lambda_п$, тем больше разница: при $\lambda_н / \lambda_п \geq 100$ разница между расчетным и экспериментальным значениями теплопроводности составляет более 40%, при $\lambda_н / \lambda_п \geq 250$ – более чем на 60%.

Анализ литературных источников показал, что отсутствуют подобные исследования в отношении полимерных нанокомпозитов. Представляют научный и практический интерес исследования теплопроводности вышеуказанных материалов. Цель исследований – провести теоретические и экспериментальные исследования и обосновать методику исследования и расчета теплопровод-

ности полимерных нанокомпозитов (Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № **20-38-90070\20**).

Материалы и методы. В экспериментальных исследованиях использовали образцы из нанокомпозитов на основе эластомера Ф-40С. Нанокомпозит, наполненный алюминиевым нанопорошком, имел четыре состава с различным содержанием наполнителя: эластомер Ф-40С (ТУ 6-06-246-92) – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок (ТУ 1791-003-36280340-2008) – 0,025; 0,05; 0,075 и 0,1 масс.ч.; Нанокомпозит, наполненный углеродными нанотрубками имел три состава: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., углеродные нанотрубки «Таунит» – 0,05; 0,1 и 0,15 масс.ч. Образцы изготовлены в виде дисков с размерами: диаметр 15 мм; толщина 0,5 мм.

Установка состоит из холодильника 1 (рис. 1), в котором циркулирует охлаждающая жидкость (водопроводная вода), блока дисков из различных материалов и нагревателя [11]. Блок дисков включает три медных диска 2, между которыми размещены образец-диск из исследуемого полимерного материала 8, диск из оргстекла 6. Размеры дисков: диаметр 15 мм; толщина 0,5 мм. Для тепловой изоляции от окружающей среды дисков 2, 6 и 8, последние поместили с натягом в трубу 7 из ПВХ. Последнюю также установили с натягом в резиновую втулку 4. К дискам 2 припаяны металлические стержни 3.

Первоначально включили нагреватель, затем открыли подачу охлаждающей жидкости в холодильник 1. После достижения установившегося температурного режима измеряли инфракрасным пирометром марки Testo 830-T4 температуру свободных концов стержней 3: T_1, T_2 и T_3.

Коэффициент теплопроводности образцов исследуемого полимерного композита $\lambda_к$ определяли по выражению [19]

$$\lambda_к = \frac{\lambda_2 l_1 (T_2 - T_3) S d\tau}{S d\tau l_2 (T_1 - T_2)} = \lambda_c \frac{l_1}{l_2} \frac{(T_2 - T_3)}{(T_1 - T_2)},$$

где l_1 и l_2 – соответственно толщина дисков 8 и 6, м; λ_c – коэффициент теплопроводности оргстекла, Вт/м·К; T_1, T_2, T_3 – температуры металлических стержней.

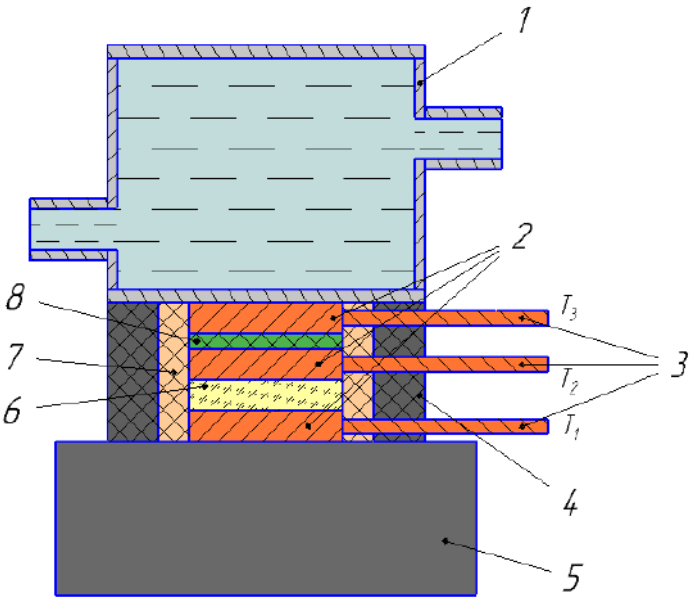


Рисунок 1 - Схема установки для исследования теплопроводности полимерных материалов: 1 – холодильник; 2 – медные диски; 3 – металлические стержни; 4 – резиновая втулка; 5 – нагреватель; 6 – диск из оргстекла; 7 – труба ПВХ; 8 – исследуемый образец [12]

Результаты исследования. На начальном этапе рассчитали по известным формулам теплопроводность полимерного двухкомпонентного композита (состав №1) с содержанием наполнителя $\varphi_н = 0{,}02$ [20]:

Формула Максвелла [21]

$$\lambda_к = \lambda_п \left[\frac{\lambda_н + 2\lambda_п - 2\varphi_н(\lambda_п - \lambda_н)}{\lambda_н + 2\lambda_п + \varphi_н(\lambda_п - \lambda_н)} \right], \qquad (1)$$

где $\lambda_п$ и $\lambda_н$ – коэффициенты теплопроводности полимерной матрицы и наполнителя.

Результат расчета по формуле (1): $\lambda_к = 0{,}29$ Вт/м×К.

Формула Оделевского [20]

$$\lambda_к = \lambda_п \left[1 - \frac{\varphi_н}{\left(\frac{1}{1-\nu}\right) - \left(\frac{1-\varphi_н}{3}\right)} \right], \qquad (2)$$

где $\nu = \lambda_н / \lambda_п$.

Результат расчета по формуле (2): $\lambda_к = 0{,}29 Вт/м \times К$.

Формула Дульнева Г.Н.

$$\lambda_к = \lambda_п \left[\frac{\nu - (\nu - 1)(1 - \varphi_н^{2/3})\varphi_н^{1/3}}{\nu - \varphi_н^{1/3}(\nu - 1)} \right] \qquad (3)$$

Результат расчета по формуле (3): $\lambda_к = 0{,}28 Вт/м \times К$.

Расчет теплопроводности композита по формулам (1) и (2) показал одинаковый результат: $\lambda_к = 0{,}29$ Вт/м×К. Расчет по формуле (3) показал несколько меньший результат: $\lambda_к = 0{,}28$ Вт/м×К. Фактическое значение коэффициента теплопроводности композита состава №1 составляет $\lambda_к = 24{,}7$ Вт/м×К.

Таким образом, если расчет теплопроводности микрокомпозитов по формулам Оделевского и Миснара занижает результат, в сравнении с фактическим значением теплопроводности, в 1,4 – 1,6 раза и несколько более, формулы (1)…(3) занижают расчетные значения теплопроводности эластомерных нанокомпозитов от 85,2 до 88,2 раза. Поэтому вышеприведенные формулы не пригодны для расчета теплопроводности полимерных нанокомпозитов.

Рассмотрим причины такой большой разницы между расчетными и экспериментальными значениями теплопроводности полимерных нанокомпозитов. Процесс теплового переноса в полимерных композитах определяется в значительной мере тремя факторами:

- агрегирование частиц, благодаря чему при определенных условиях между частицами наполнителя возникают проводящие «мостики» и реализуется эффект прыжковой проводимости;
- наличие межфазных слоев, свойства которых значительно отличаются от свойств полимерной матрицы;
- наличие пористости в полимерном композите.

Теоретическая оценка влияния всех факторов на перенос тепла в гетерогенной полимерной системе с наполнителями представляет собой сложную, трудно разрешимую задачу. В инженерной практике сходимость известных аналитических формул расчета коэффициента теплопроводности с фактическими значениями, полученными экспериментально, обеспечивают разработкой расчетных формул, полученных при помощи метода инверсии компонентов.

В работе [18] авторы предложили метод расчета теплопроводности трехкомпонентного композита на основе множественной регрессии. Адекватность полученной регрессионной модели опре-

деляют сопоставлением расчетных значений теплопроводности с фактическими, полученными в ходе контрольного эксперимента.

Метод реализован при исследовании теплопроводности трехкомпонентных микрокомпозитов на основе двух различных полимерных матриц: диметилсилоксанового каучука СКТН-А и полиуретана Сурэл-7, наполненных кварцем молотым пылевидным, алюминия нитридом и электрокорундом. В итоге получена формула для расчета теплопроводности трехкомпонентного композита

$$\lambda_к\left[\varphi_n + C(\varphi_1 + \varphi_2)\right] = \lambda_n\varphi_n + C(\lambda_1\varphi_1 + \lambda_2\varphi_2)\,, \qquad (4)$$

где φ_1 и φ_2 – объемное содержание наполнителей; С – поправочный коэффициент, учитывающий отношение теплопроводности наполнителя к теплопроводности полимерной матрицы.

$$\mathrm{C} = f\left(\frac{\lambda_н}{\lambda_n}\right) \qquad (5)$$

Применительно к исследованиям в работе [18] коэффициент с в формуле (4) имеет значение $\mathrm{C} = \left(\frac{\lambda_н}{\lambda_n}\right)^{-0,65}$.

Формула (4) подобна формуле Бургера, однако она предназначена для трехкомпонентного композита. Оригинальность этой формулы заключается в том, что не требуется инверсия компонентов и в ней используется зависимость $\mathrm{C} = f\left(\frac{\lambda_н}{\lambda_n}\right)$.

В настоящих исследованиях проведена оценка возможности применения формул Бургера, в сочетании с результатами экспериментальных исследований, для расчета двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.

Расчетные значения коэффициента теплопроводности двухкомпонентных полимерных композитов при различном содержании наполнителя рассчитывали по формуле Бургера [22]

$$\lambda_к\left(\varphi_n + C\varphi_н\right) = \lambda_n\varphi_n + C\lambda_н\varphi_н\,, \qquad (6)$$

где с – коэффициент, $\mathrm{C} = \left(\frac{\lambda_н}{\lambda_n}\right)^{\alpha}$.

Экспериментально определили значения коэффициента теплопроводности эластомерных нанокомпозитов с оптимальными составами, при которых достигаются наиболее высокие деформационно-прочностные и адгезионные свойства материалов. Состав №1: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч (в объемных долях – 0,02). Состав №2: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч., углеродные нанотрубки «Таунит» – 0,1 масс.ч. (в объемных долях – 0,036).

Поясним выбор составов. Одним из условий достижения высоких механических свойств композита является наиболее равномерное распределение частиц наполнителя по всему объему полимерной матрицы, а также минимальное агрегирование частиц. При расчете коэффициента теплопроводности по аналитическим формулам (1)…(6) предполагается, что частицы равномерно распределены по объему матрицы. Поэтому расчетное и экспериментальное значения теплопроводности, в сравнении с другим содержанием наполнителя, будут иметь наименьшее расхождение при оптимальном составе композита.

Результаты эксперимента:

состав №1: $\lambda_к = 24{,}7$ Вт/ м×К, состав №2: $\lambda_к = 9{,}3$ Вт/м×К

Затем по формуле (6) определили значение поправочного коэффициента С и рассчитали значения коэффициента теплопроводности нанокомпозитов с массовым содержанием алюминиевого

нанопорошка $m_н = 0{,}025; 0{,}05$ и $0{,}1$ масс.ч. (в объемных долях соответственно: $\varphi_н = 0{,}0066; 0{,}0\,131$ и $0{,}026$).

Результаты расчета по формуле (6):

$$C = \left(\frac{\lambda_н}{\lambda_п}\right)^{\alpha} = \left(\frac{209{,}3}{0{,}27}\right)^{0{,}281} = 6{,}4847\ ;$$

$$\lambda_к\left(\varphi_п + 6{,}4847\,\varphi_н\right) = \lambda_п\varphi_п + 6{,}4847\,\lambda_н\varphi_н \qquad (7)$$

$$\lambda_к = 8{,}9; 16{,}9 и 31{,}1 Вт/м \times К\ .$$

Значения коэффициента теплопроводности нанокомпозитов с массовым содержанием углеродных нанотрубок «Таунит» $m_н = 0{,}05;$ и $0{,}15$ масс.ч. (в объемных долях соответственно: $\varphi_н = 0{,}0184$ и $0{,}053$).

Результаты расчета по формуле (6):

$$C = \left(\frac{\lambda_н}{\lambda_п}\right)^{\alpha} = \left(\frac{6600}{0{,}27}\right)^{-0{,}0328} = 0{,}0367\ ;$$

$$\lambda_к\left(\varphi_п + 0{,}0367\,\varphi_н\right) = \lambda_п\varphi_п + 0{,}0367\,\lambda_н\varphi_н \qquad (8)$$

$$\lambda_к = 4{,}75 \text{ и } 13{,}65 \text{ Вт/м} \times \text{К}\ .$$

На следующем этапе экспериментально определили коэффициенты теплопроводности нанокомпозитов с массовым содержанием алюминиевого нанопорошка $\varphi_н = 0{,}025; 0{,}05$ и $0{,}1$ масс.ч , углеродных нанотрубок – $m_н = 0{,}05$ и $0{,}15$ масс.ч

Проверку экспериментальных значений теплопроводности нанокомпозитов на наличие «выпадающих» точек проводили по критерию Романовского, воспроизводимость эксперимента (однородность дисперсий) по критерию Кохрена при уровне значимости 0,05 [23].

На рис. 2 показаны экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности $\lambda_к$ эластомерного нанокомпозита при различном содержании алюминиевого нанопорошка.

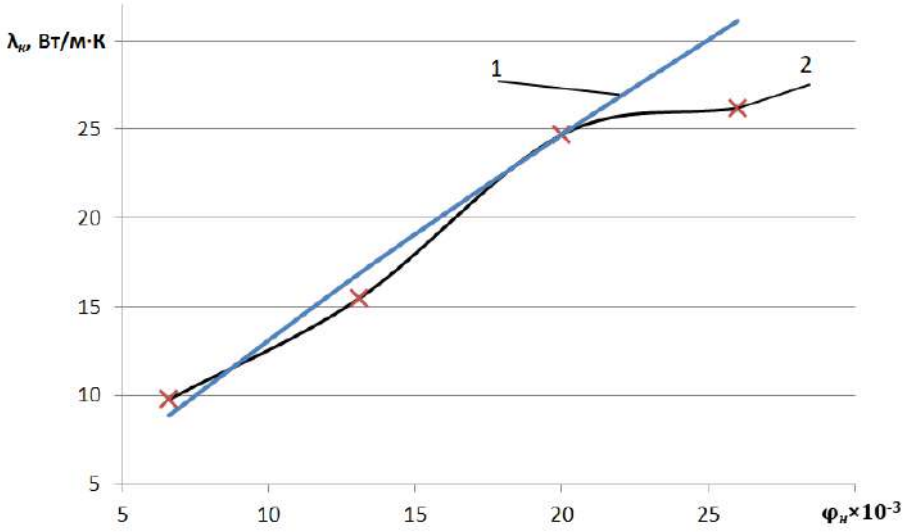


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента теплопроводности $\lambda_к$ эластомерного нанокомпозита от объемного содержания алюминиевого нанопорошка $\varphi_н$: 1 – расчетная зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

При содержании наполнителя $\varphi_н = 6{,}6 \times 10^{-3}$ расчетное значение коэффициента теплопроводности составляет $\lambda_к = 8{,}9$ Вт/м×К, а экспериментальное – $\lambda_к = 9{,}9$ Вт/м×К. Значения теплопроводности отличаются на 11%. При увеличении содержания наполнителя вдвое до $\varphi_н = 13{,}1 \times 10^{-3}$ расчетное значение коэффициента теплопроводности составляет $\lambda_к = 16{,}9$ Вт/м×К, а экспериментальное – $\lambda_к = 15{,}5$ Вт/м×К. Разница между расчетным и фактическим значениями величины $\lambda_к$ составляет 9%. При дальнейшем повышении содержания наполнителя скорость прироста теплопроводности резко снижается и зависимость 2 становится не линейной. Фактическое значение коэффициента теплопроводности нанокомпозита с максимальным содержанием наполнителя $\varphi_н = 26 \times 10^{-3}$ составляет $\lambda_к = 26{,}2$ Вт/м×К, а расчетное значительно больше – $\lambda_к = 31{,}1$ Вт/м×К. Значения теплопроводности отличаются на максимальную величину в 19%. Основной причиной можно назвать агрегирование наночастиц алюминия.

Аналогичная картина имеет место при исследовании нанокомпозита, наполненного углеродными нанотрубками «Таунит». На рис. 3 показаны экспериментальные и расчетные значения коэффициента теплопроводности $\lambda_к$ эластомерного нанокомпозита при различном содержании углеродных нанотрубок. При содержании наполнителя $\varphi_н = 18{,}4 \times 10^{-3}$ расчетное значение коэффициента теплопроводности составляет $\lambda_к = 4{,}75$ Вт/м×К, а экспериментальное – $\lambda_к = 5{,}65$ Вт/м×К. Значения теплопроводности отличаются на 19%.

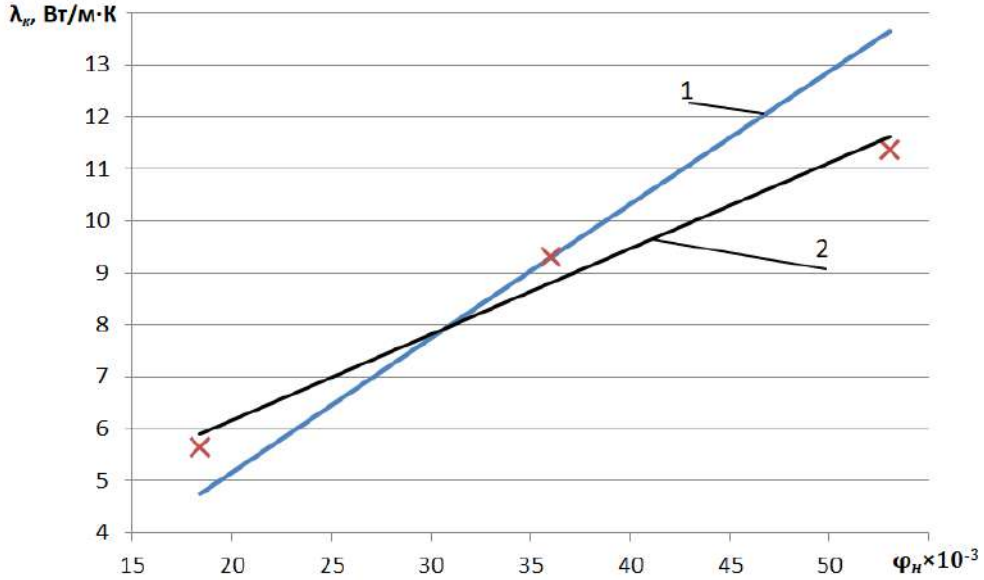


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента теплопроводности $\lambda_к$ эластомерного нанокомпозита от объемного содержания углеродных нанотрубок $\varphi_н$: 1 – расчетная зависимость; 2 – экспериментальная зависимость

При увеличении содержания наполнителя до $\varphi_н = 53 \times 10^{-3}$ расчетное значение коэффициента теплопроводности составляет $\lambda_к = 13{,}65$ Вт/м×К, а экспериментальное – $\lambda_к = 11{,}37$ Вт/м×К. Разница между расчетным и фактическим значениями величины $\lambda_к$ составляет 20%.

Таким образом, формула Бургера, в сочетании с результатами экспериментальных исследований, позволяет с достаточной точностью рассчитывать теплопроводность двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.

Выводы.

1. Расчет теплопроводности полимерных нанокомпозитов по известным аналитическим формулам дает, в сравнении с фактическими, значения, заниженные до 89 раз.

2. Формула Бургера, в сочетании с экспериментальными исследованиями, позволяет получить адекватную модель теплопроводности двухкомпонентных полимерных нанокомпозитов.

Список литературы

1. Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 1. С. 89–94.

2. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Мандрыкин И.А., Беленцов В.Г. Интенсификация восстановления деталей сельхозмашин дисперсно-упрочненным композитным покрытием на основе хрома // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №3 (32). С. 49-54.

3. Коломейченко, А.В. Технология восстановления с упрочнением деталей машин на основе применения микродугового оксидирования / Коломейченко А.В., Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Логачёв В.Н., Титов Н.В. Строительные и дорожные машины. 2014. № 10. С. 16-21.

4. Технологии восстановления и упрочнения деталей автотракторной техники / Р.И. Ли // Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2014. – 379 с.

5. Ли, Р. И. Полимерные композиционные материалы для фиксации подшипников качения в узлах машин монография / Р.И. Ли. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2017. − 224 с.

6. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 15-19.

7. R. I. Li, D. N. Psarev. A Model for Forming a Uniform Polymer Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2015, Vol. 8, No. 3, pp. 249–252.

8. Ли, Р.И. Перспективный полимерный материал для восстановления корпусных деталей машин [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.В. Мироненко, М.Р. Киба // Клеи. Герметики. Технологии – 2017. – №5. – С. 34-37.

9. Бочаров, А. В. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники адгезивами, наполненными дисперсными металлическими порошками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Бочаров А. В. – Мичуринск, 2009. – 150 с.

10. Бутин, А. В. Повышение эффективности восстановления неподвижных соединений подшипников качения сельскохозяйственной техники полимер-полимерными композициями [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03: / Бутин А. В. – Мичуринск, 2012. – 127 с.

11. Малюгин, В. А. Восстановление посадок подшипников качения автомобилей нанокомпозитом на основе анаэробного герметика АН-111: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.03: / Малюгин В. А. – Мичуринск, 2019. – 169 с.

12. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

13. Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

14. Михайлюк, А. Е. Разработка эластомерных материалов на основе этиленпропиленовых каучуков, модифицированных высокодисперсными частицами металлов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Михайлюк А.Е. – Волгоград, 2014. – 140 с.

15. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – Москва: Химия, 2000. – 672 с.

16. Кособудский, И. Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации / И. Д. Кособудский // Известия высших учебных заведений. – 2000. – Т. 43 (4). – С. 3-18.

17. Полимерные нанокомпозиты: многообразие структурных форм и приложений / А.К. Микитаев, Г.В. Козлов, Г.Е. Заиков; Ин-т биохим. физики им. Н.М. Эмануэля РАН. – М.: Наука, 2009.

– 278 с.

18. Моделирование теплопроводности трехкомпонентных композиций / В.А. Михеев, В.Ш. Сулаберидзе, В.Д. Мушенко // ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. 2016. Т. 59, №7. – С. 584-590.

19. Михеев, В. А. Исследование теплопроводности композиционных материалов на основе силикона с наполнителями / Михеев В. А., Сулаберидзе В. Ш., Мушенко В. Д. // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 571–575.

20. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / справочная книга / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк – Л.: изд-во «Энергия», 1974. – 264 с.

21. Киба, М.Р. Восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях сельскохозяйственной техники нанокомпозитом на основе эластомера Ф-40 [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Киба М.Р. – Мичуринск, 2020. – 164 с.

22. А.Ф. Чудновский. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962. – 456 с.

23. Основы научных исследований [Текст]: Учеб. пособие / Р.И. Ли // Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2013. – 190 с.

References

1. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Povyshenie stojkosti polimernyh kompozitov holodnogo otverzhdeniya k vozdejstviyu rabochih zhidkostej ispol'zovaniem nanomaterialov // Mezhdunarodnyj tekhniko-ekonomicheskij zhurnal. 2015. № 1. S. 89–94.

2. ZHachkin S.YU., Pen'kov N.A., Mandrykin I.A., Belencov V.G. Intensifikaciya vosstanovleniya detalej sel'hozmashin dispersno-uprochnennym kompozitnym pokrytiem na osnove hroma // Innovacii v sel'skom hozyajstve. 2019. №3 (32). S. 49-54.

3. Kolomejchenko, A.V. Tekhnologiya vosstanovleniya s uprochneniem detalej mashin na osnove primeneniya mikrodugovogo oksidirovaniya / Kolomejchenko A.V., Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Logachyov V.N., Titov N.V. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2014. № 10. S. 16-21.

4. Tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detalej avtotraktornoj tekhniki / R.I. Li // Lipeck: Izd-vo LGTU, 2014. – 379 s.

5. Li, R. I. Polimernye kompozicionnye materialy dlya fiksacii podshipnikov kacheniya v uzlah mashin monografiya / R.I. Li. – Lipeck: Izd-vo Lipeckogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017. − 224 s.

6. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Teoretical Concerns in Selection of Metall Nanosized Fillers for the F-40 Elastomer Composition. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 15-19.

7. R. I. Li, D. N. Psarev. A Model for Forming a Uniform Polymer Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2015, Vol. 8, No. 3, pp. 249–252.

8. Li, R.I. Perspektivnyj polimernyj material dlya vosstanovleniya korpusnyh detalej mashin [Tekst] / R.I. Li, D.N. Psarev, A.V. Mironenko, M.R. Kiba // Klei. Germetiki. Tekhnologii – 2017. – №5. – S. 34-37.

9. Bocharov, A. V. Povyshenie effektivnosti vosstanovleniya nepodvizhnyh soedinenij podshipnikov kacheniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki adgezivami, napolnennymi dispersnymi metallicheskimi poroshkami [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Bocharov A. V. – Michurinsk, 2009. – 150 s.

10. Butin, A. V. Povyshenie effektivnosti vosstanovleniya nepodvizhnyh soedinenij podshipnikov kacheniya sel'skohozyajstvennoj tekhniki polimer-polimernymi kompoziciyami [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Butin A. V. – Michurinsk, 2012. – 127 s.

11. Malyugin, V. A. Vosstanovlenie posadok podshipnikov kacheniya avtomobilej nanokompozitom na osnove anaerobnogo germetika AN-111: dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.20.03: / Malyugin V. A. – Michurinsk, 2019. – 169 s.

12. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.

13. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svojstva, primenenie. – M.: Mashinostroenie, 2008. – 320 s.

14. Mihajlyuk, A. E. Razrabotka elastomernyh materialov na osnove etilenpropilenovyh kauchukov, modificirovannyh vysokodispersnymi chasticami metallov [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk / Mihajlyuk A.E. – Volgograd, 2014. – 140 s.

15. Pomogajlo, A. D. Nanochasticy metallov v polimerah / A. D. Pomogajlo, A. S. Rozenberg, I. E. Uflyand. – Moskva: Himiya, 2000. – 672 s.

16. Kosobudskij, I. D. Nanorazmernye metallicheskie chasticy v polimernyh matricah: I. Sintez, mekhanizmy obrazovaniya i stabilizacii / I. D. Kosobudskij // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. – 2000. – T. 43 (4). – S. 3-18.

17. Polimernye nanokompozity: mnogoobrazie strukturnyh form i prilozhenij / A.K. Mikitaev, G.V. Kozlov, G.E. Zaikov; In-t biohim. fiziki im. N.M. Emanuelya RAN. – M. : Nauka, 2009. – 278 s.

18. Modelirovanie teploprovodnosti trekhkomponentnyh kompozicij / V.A. Miheev, V.SH. Sulaberidze, V.D. Mushenko // IZVESTIYA VUZOV. PRIBOROSTROENIE. 2016. T. 59, №7. – S. 584-590.

19. Miheev, V. A. Issledovanie teploprovodnosti kompozicionnyh materialov na osnove silikona s napolnitelyami / Miheev V. A., Sulaberidze V. SH., Mushenko V. D. // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2015. T. 58, № 7. S. 571–575.

20. Teploprovodnost' smesej i kompozicionnyh materialov / spravochnaya kniga / G.N. Dul'nev, YU.P. Zarichnyak – L.: izd-vo «Energiya», 1974. – 264 s.

21. Kiba, M.R. Vosstanovlenie posadochnyh otverstij v korpusnyh detalyah sel'skohozyajstvennoj tekhniki nanokompozitom na osnove elastomera F-40 [Tekst]: dis. ... kand. tekhn. nauk / Kiba M.R. – Michurinsk, 2020. – 164 s.

22. A.F. CHudnovskij. Teplofizicheskie harakteristiki dispersnyh materialov. M.: FIZMATGIZ, 1962. – 456 s.

23. Osnovy nauchnyh issledovanij [Tekst]: Ucheb. posobie / R.I. Li // Lipeck: Izd-vo LGTU, 2013. – 190 s.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Ли Роман Иннакентьевич – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: romanlee@list.ru.

Псарев Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», Россия, г. Мичуринск, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Киба Мария Романовна – кандидат технических наук, ассистент, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный горный университет», Россия, г. Санкт-Петербург, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Мельников Антон Юрьевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: reks1r@yandex.ru.

Быконя Андрей Николаевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Россия, г. Липецк, e-mail: loseroff@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

Lee Roman – Doctor of Technical Sciences, Professor, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, e-mail: romanlee@list.ru.

Psarev Dmitry – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Michurinsk State Agrarian University, Russia, Michurinsk, e-mail: psarev_380@mail.ru.

Kiba Maria – Candidate of Technical Sciences, assistant, St. Petersburg State Mining University, Russia, St. Petersburg, e-mail: damsel_91@mail.ru.

Melnikov Anton – post-graduate student, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, e-mail: reks1r@yandex.ru.

Bykonya Andrey – PhD student, Lipetsk State Technical University, Russia, Lipetsk, e-mail: loseroff@mail.ru

Поступила в редакцию (Received): 30.01.2022 Принята к публикации (Accepted): 19.02.2022

УДК 631.3, 62-6
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-92-101

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МОТОРНО-ТРАНСМССИОННЫХ УСТАНОВОК МОБИЛЬНЫХ МАШИН ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БРОСОВОЙ ТЕПЛОТЫ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ

[1]Иванов Николай Михайлович
[1]Иванников Алексей Борисович
[2]Крохта Геннадий Михайлович
[1]ФГБНУ Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства СФНЦА РАН
[2] ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет»

Реферат. *Известно, что поршневые двигатели мобильных машин при выполнении механических работ имеют не очень высокий коэффициент полезного использования теплоты, сгоревшего в двигателе топлива, особенно на режимах послепускового прогрева основных агрегатов до рабочих температур. При холодном пуске двигателя и его прогреве одновременно с теплотой в окружающую среду выбрасывается большое количество вредных веществ, которые представляют продукты не полного сгорания топлива. Исследованиями установлена возможность повышения коэффициента полезного использования теплоты в период послепускового прогрева, особенно в условиях низких температур окружающей среды за счёт вторичного использования энергии выпускных газов. С этой целью был разработан газо-жидкостный рекуператор и система, сокращающая время прогрева масла в коробке передач до оптимальной температуры. Использование теплоты выпускных газов стало возможным только после разработки конструкции рекуператора с регулируемой теплопроизводительностью. Экспериментальные исследования трактора ХТЗ-150К-09 при температуре минус 25°С показали, что вторичное использование теплоты выхлопных газов позволило прогреть масло в коробке передач опытного трактора до 70°С (оптимальная температура) в течение 40 минут, а серийного только до 51°С – за 160 минут. При этом потери мощности в коробке передач для серийного трактора снизились от 52,4 до 12,1 кВт, а опытного – с 52,4 до 5,4 кВт. При температуре окружающей среды плюс 25°С и прочих равных условиях у серийного трактора температура масла в коробке передач стабилизировалась на уровне плюс 69°С к 120 минуте, опытного – к 57 минуте на уровне 80°С. При этом потери мощности в коробке передачу серийного трактора снизились с 26,4 до 9,2 кВт, а у опытного – с 26,4 до 4,5 кВт. Таким образом, результаты исследования показали, что обозначенная проблема может быть решена путём вторичного использования бросовой теплоты, рассеиваемой в окружающую среду жидкостной системой охлаждения двигателя, системой смазки и выхлопными газами.*

Ключевые слова. *Дизельный двигатель, коробка передач, прогрев, эксергия, эффективность прогрева, бросовая теплота, выхлопные газы.*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF MOTOR-TRANSMISSION UNITS OF MOBILE MACHINES BY USING THE WASTE HEAT OF EXHAUST GASES

[1]Ivanov Nikolay
[1]Ivannikov Aleksey
[2]Krochta Gennadiy
[1]FSBNU Siberian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture SFNCA RAS;
[2]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Novosibirsk State Agrarian University

Abstract. *It is known that piston engines of mobile machines when performing mechanical work have not a very high coefficient of useful use of the heat burned in the engine fuel, especially in the modes of post-start heating of the main units to working temperatures. A large number of harmful substances,*

which are products of incomplete combustion of fuel, are emitted during a cold start of the engine and its warming up simultaneously with heat into the environment. Studies have established the possibility of increasing the coefficient of beneficial use of heat during post-start warm-up, especially in conditions of low ambient temperatures due to secondary use of exhaust gas exergy. For this purpose, a gas-liquid heat exchanger and a system that reduces the time of oil heating in the gearbox to the optimal temperature were developed. Utilization of exhaust gas heat became possible only after development of the gas-liquid heat exchanger design with adjustable heat capacity. Experimental studies of HTZ-150K-09 tractor at the temperature minus 25°C have shown that the secondary use of the exhaust heat allowed to warm up the oil in the gearbox of an experimental tractor to 70°C (optimum temperature) during 40 minutes, and the oil in the production tractor to 51°C only during 160 minutes. At the same time, power losses of serial tractor decreased from 52.4 to 12.1 kW, and of experimental tractor - from 52.4 to 5.4 kW. At ambient temperature plus 25°C and other equal conditions with the serial tractor, oil temperature stabilized at plus 69°C by 120 min., with the experimental tractor - at 80°C by 57 min. At the same time, power losses of the serial tractor decreased from 26.4 to 9.2 kW, and of the experimental tractor - from 26.4 to 4.5 kW. Thus, the results of the study showed that the indicated problem can be solved by the secondary use of waste heat dissipated in the environment by the liquid engine cooling system, lubrication system and exhaust gases.

Keywords: *Diesel engine, transmission, heating, exergy, heating efficiency, waste heat, exhaust gases.*

Введение. Современная экономика предполагает постоянный рост потребительского рынка, что связано с увеличением количества используемой энергии. В качестве энергоресурсов можно применять возобновляемые и не возобновляемые источники. К возобновляемым энергоресурсам относятся все виды энергии, постоянно генерируемые планетой «Земля» и её спугником «Луна». К не возобновляемым источникам относят ресурсы, находящиеся в «Земле» в виде запасов (газ, нефть и каменный уголь). В настоящее время в энергетическом балансе, потребляемой человечеством энергии, теплота составляет более 50%. Теплота легко может быть преобразована в механическую или электрическую энергию, например, с помощью ДВС. При этом предпочтение отдаётся дизельным двигателям. Анализ литературных источников показывает, что в ближайшие годы (10-15 лет) в качестве энергетических средств для мобильных машин будут использоваться хорошо зарекомендовавшие себя поршневые ДВС [1].

Известно, что поршневые двигатели наряду с преимуществами имеют ряд существенных недостатков:

- относительно низкий коэффициент полезного использования теплоты, сгоревшего в двигателе топлива;
- низкие пусковые качества;
- при эксплуатации в условиях низких температур требуется предпусковая тепловая подготовка;
- пуск и послепусковой прогрев сопровождается неполным сгоранием топлива, в результате чего в атмосферу выбрасывается большое количество углеводородов, которые подверглись лишь частично окислительному процессу, что снижает экономичность двигателя и увеличивает количество вредных выбросов.

Цель исследования – повышение коэффициента полезного использования теплоты, выделяемой при сгорании топлива двигателем, сокращение времени прогрева масла до оптимальной температуры и, как следствие, снижение потерь мощности в трансмиссии машин за счёт вторичного использования теплоты выхлопных газов (ВГ). Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Оценить энергетический потенциал выхлопных газов в зависимости от степени загрузки двигателя и температуры окружающей среды (ОС).
2. Обосновать конструктивные параметры системы регулируемого рекуператора – теплообменника потребителя.
3. Провести экспериментальные исследования и дать оценку эффективности вторичного использования бросовой теплоты двигателя.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являются процессы тепловой подготовки масла в коробке передач (КП) с помощью разработанного газожидкостного рекуперативного теплообменника, который устанавливаются на выходе выпускного коллектора или после турбокомпрессора, если он имеется в наличие (патент RU № 2523454) [2]. Экспериментальная установка включала в себя тормозной стенд КИ-2118А, установленный в теплом помещении лаборатории. Дизельный двигатель 6ЧН13,0/11,5 и имитатор КП размешались на открытой площадке. Установка была оснащена соответствующим оборудованием и измерительными приборами.

Функциональная схема автоматического поддержания оптимальной температуры масла в коробке передач трактора ХТЗ-150К-09 приведена на рисунке 1. Она представляет собой частный случай разработанной ранее системы (патент RU № 2500899) [3]

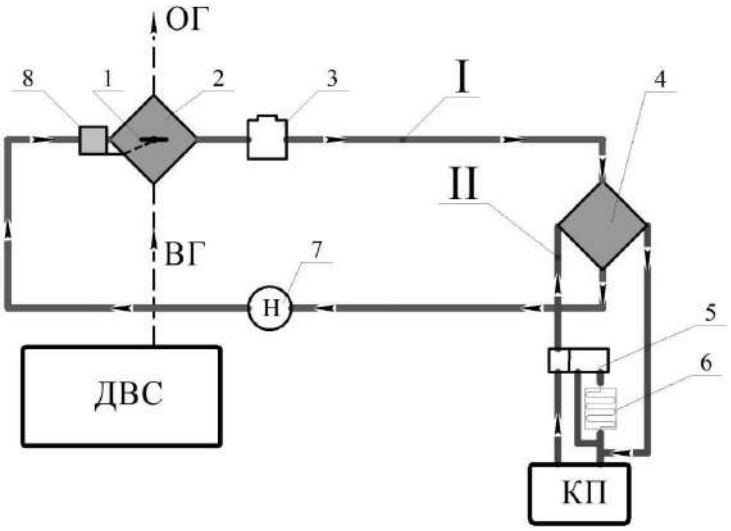


Рисунок 1 – Функциональная схема системы автоматического поддержания оптимальной температуры масла в КП трактора ХТЗ -150К-09: I – утилизационный контур; II – теплопотребляющий контур КП; 1 – газовая заслонка; 2 – газожидкостный рекуперативный теплообменник утилизационного контура; 3 – расширительный бак теплоносителя утилизационного контура; 4 – теплообменник теплопотребляющего контура КП; 5 – терморегулятор теплопотребляющего контура КП; 6 - масляный радиатор системы смазки коробки передач; 7 – циркуляционный насос утилизационного контура; 8 – терморегулятор с приводом газовой заслонки.

Имеются два контура в предлагаемой системе. В утилизационном контуре I происходит отбор теплоты от ВГ. В теплопотребляющий контуре II отобранная теплота вторично используется для поддержания оптимальной температуры масла в КП.

В утилизационном контуре дополнительно установлен циркуляционный насос, расширительный бачок, терморегулятор, управляющий положением газовой заслонкой, в результате чего осуществляется управление потоком ВГ, проходящего через рекуператор, и, как следствие, ограничение максимальной температуры теплоносителя в утилизационном контуре на заданном уровне. В качестве теплоносителя утилизационного контура используется антифриз на основе монопропиленгликоля.

Теплопотребляющий контур включает в себя компактный жидкостно-масляный теплообменник, терморегулятор и радиатор. Масло подаётся насосом КП в теплообменник далее терморегулятор, сливаясь в картер, минуя радиатор, или в радиатор, а затем в картер.

Работа предлагаемого устройства заключается в следующем. В начале после пуска холодного двигателя газовая заслонка рекуператора закрыта [2]. Выхлопные газы проходят через газожидкостный рекуператор, на выходе из которого теплоноситель попадает в камеру термосилового датчика терморегулятора, входящего в состав конструкции рекуператора. После того, как темпе-

ратуры теплоносителя в утилизационном контуре достигает 80-85°С, активная масса в термосиловом датчике терморегулятора, расширяется, выталкивая шток, который через систему рычагов воздействует на газовую заслонку. Она начинает открываться. Часть ВГ выбрасывается в атмосферу, снижая количество утилизируемой теплоты, и поддерживает температуру теплоносителя в контуре на заданном уровне. После достижении теплоносителем температуры 95°С заслонка открывается полностью, и основная часть ВГ выбрасывается в атмосферу, минуя теплообменник рекуператора. Теплопередача прекращается. С понижением температуры теплоносителя менее 80°С заслонка под действием возвратной пружины возвращается в исходное положение, и теплопередача возобновляется. Таким образом, осуществляется автоматическая поддержка температуры теплоносителя в утилизационном контуре. На каких-то установившихся режимах заслонка может занимать промежуточные положения и ВГ имеют возможность одновременно частично проходить через теплообменник и частично сразу через выхлопную трубу.

Из камеры термосилового датчика по трубопроводу теплоноситель поступает в теплообменник 4 теплопотребляющего контура КП, который включён параллельно масляному радиатору 6 коробки передач через терморегулятор 5. Масло, проходящее через теплообменник теплопотребляющего контура, начинает разогреваться. При достижении оптимального теплового режима в системе смазки КП с гидроподжимными муфтами (60-80°С) срабатывает терморегулятор 6 и подача масла в теплообменник прекращается. Если далее температура масла будет возрастать, то автоматически включается в работу масляный радиатор КП. Таким образом, сокращается время прогрева и тепловой режим КП стабилизируется.

Эффективность вторичного использования теплоты выхлопных газов оценивалась эксергетическим коэффициентом полезного использования теплоты в моторно-трансмиссионной установке (МТУ) с помощью уравнения (1). Эксергия или техническая работоспособность – максимальная работа, совершаемая рабочим телом, если в качестве холодного источника теплоты принимается внешняя среда с температурой T_{OC} [4].

$$\eta_{\text{ЭМТ}} = \frac{L_{\text{е}}^{\text{дв}} + \sum_{i=1}^{n} E_Q}{E_T}, \quad (1)$$

где $L_{\text{е}}^{\text{дв}}$ - полезная работа МТУ, включая потери на трение в узлах и агрегатах, которые трансформируется в теплоту Дж/ч;

$\sum_{i=1}^{n} E_Q$ - суммарная эксергия теплоты, полезно используемая в агрегатах и узлах МТУ, ДЖ/ч;

E_T - химическая эксергия топлива, Дж/ч.

Химическая эксергия топлива, израсходованного двигателем, определялась по формуле [5]:

$$E_T = 1.02 \cdot H_U \cdot G_T \quad (2)$$

где H_U - низшая теплота сгорания зимнего топлива, Дж/кг;

G_T - расход топлива, кг/ч.

На режиме прогрева часть механической эксергии, если машина выполняет механическую работу используется по назначению, а другая часть, переходит из механической в тепловую. В данном случае переход части механической эксергии в тепловую обусловлен внутренними потерями на трение, что способствуют интенсификации прогрева машин. Следовательно, числитель уравнения (1) является комплексным показателем, включающий работу и полезно используемую теплоту при прогреве МТУ.

Методика исследования базируется на методах эмпирического уровня: эксперимент, описание, сравнение, счёт. Кроме того, применялись основные положения технической термодинамики, теплотехники и теплопередачи. Исследования выполнялись в соответствие с требованиями ГОСТ-18509-88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний».

Результаты и обсуждение. Анализ множества работ по тепловому балансу ДВС показывает, что на полезную работу тратится максимум 45% теплоты от сгоревшего топлива. В реальных условиях эксплуатации в среднем в полезную работу превращается не более 20-30%. Значительная часть теплоты до 28-30% рассеивается в ОС жидкостной системой охлаждения, до 7% - системой смазки и до 3% - боковой поверхностью МТУ. В тоже время до 40% теплоты теряется с ОГ, следовательно велика потенциальная возможность вторичного использования этой теплоты для разогрева и поддержания оптимального теплового режима в агрегатах МТУ.

Следует ещё раз подчеркнуть, что двигатель является не только источником механической ра-

боты, но и теплоты. Стоит обратить внимание на то, что количество произведённой работы, как правило, меньше бросовой, которая рассеивается в ОС. Причина – низкая себестоимость добычи энергоресурсов, отсутствие ответственности со стороны бизнеса за факт загрязнение ОС вредными выбросами и, как следствие, - расточительное их использование. Следует отметить, что это ископаемые энергоресурсы и относятся к не возобновляемым источникам энергии. Через какое-то время природные запасы энергоресурсов могут быть исчерпаны, прежде чем будут освоены новые источники энергии. Следовательно, энергосбережение и экологическая нагрузка на ОС в настоящее время является основной проблемой, которую необходимо решать в первую очередь.

Исследования системы автоматического поддержания оптимального теплового режима в период послепускового прогрева показали, что если через 2 минуты прогрева двигателя на холостом ходу и температуре ОС - 25°С эксергия теплового потока ВГ достигла 150,8 МДж/ч, то через 8 минут прогрева выхлопного тракта и корпуса рекуператора эксергия потока возросла до 161,2 МДж/ч, что соответствует мощности 44,8 кВт (рисунок 2). Температура ВГ стабилизировалась на уровне + 160°С.

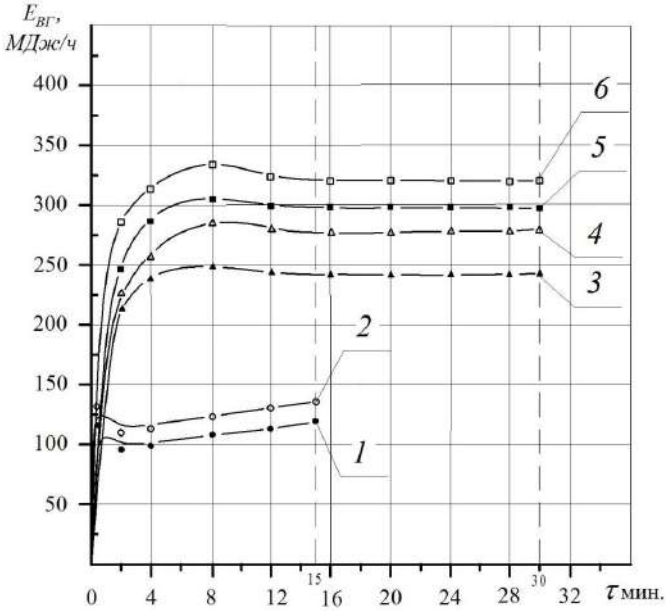


Рисунок 2 – Влияние степени загрузки двигателя трактора ХТЗ -150К-09: и температуры ОС на эксергию теплового потока ВГ: 1 – без нагрузки (послепусковой прогрев двигателя, температура ОС 0°С, $n_{дв}$ - 2100 мин$^{-1}$); 2 – без нагрузки (послепусковой прогрев двигателя, температура ОС минус 25°С, $n_{дв}$ - 2100 мин$^{-1}$); 3 – загрузка двигателя 60% при температуре ОС плюс 25°С; 4 – загрузка двигателя 60% при температуре ОС минус 25°С; 5 – загрузка двигателя 81% при температуре ОС плюс 25°С; 6 – загрузка двигателя 81% при температуре ОС минус 25°С.

Увеличение степени загрузки двигателя до 60% от номинальной и температура ОС - 25°С привели к эксергии теплового потока ВГ 276,2 МДж/ч. В тоже время мощность потока составила 76,7 кВт, а температура ВГ стабилизировалась на уровне плюс 305°С (рисунок 2).

В ходе экспериментальных исследований установлен рост эксергии теплового потока с понижением температуры ОС. Эту зависимость можно объяснить в том случае, если разность температур ВГ и ОС и массовый расход воздуха двигателем напрямую влияют на эксергию теплового потока.

Рост эксергии теплового потока связан с более значительным увеличением расхода воздуха, по сравнению с возникающей разницей температур, возникающими при понижении температуры. Увеличение загрузки двигателя до 81% приводит к росту теплового потока ВГ и потенциальной мощности. Эксергия теплового потока при температуре ОС минус 25°С на установившемся режиме достигает 321,1 МДж/ч. При этом мощность составляет 89,2 кВт, а температура – плюс 329°С.

С повышением температуры ОС до плюс 25°С эксергия теплового потока снижается до 291,5 МДж/ч. Мощность потока при этом соответствует 81 кВт. Температура ВГ стабилизируется на уровне плюс 402°С (рисунок 3).

На примере тракторного двигателя 6ЧН 13,0/11,5 было показано, что тепловой поток ВГ обладает сравнительно высокой потенциальной мощностью, что подтверждает целесообразность разработки и применения систем утилизации бросовой теплоты ВГ дизельных двигателей тракторов и других самоходных машин в узлах и агрегатах МТУ. Актуальность таких разработок возрастает с увеличением мощности двигателей и снижением температуры ОС.

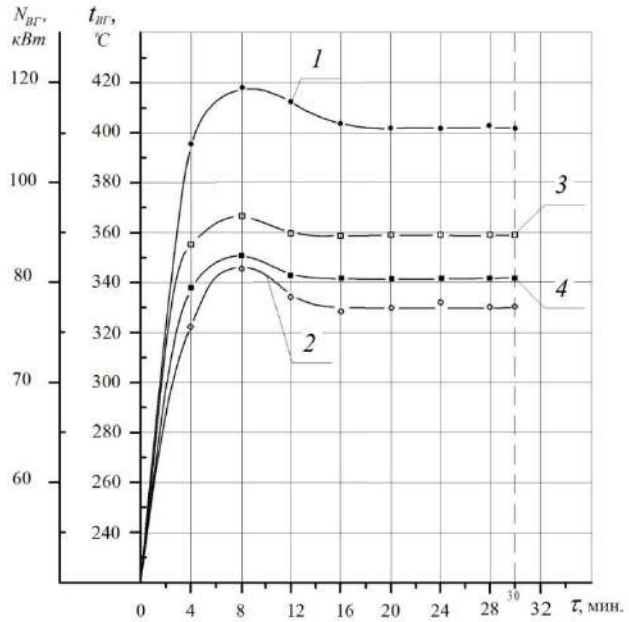


Рисунок 3 – Зависимость потенциальной мощности ВГ от температуры ОС при загрузке двигателя трактора ХТЗ -150К-09 81%:
1 – температура ВГ при температуре ОС плюс 25°С; 2 – температура ВГ при температуре ОС минус 25°С; 3 – потенциальная мощность ВГ при температуре ОС минус 25°С; 4 – потенциальная мощность ВГ при температуре ОС плюс 25°С.

На примере тракторного двигателя 6ЧН 13,0/11,5 было показано, что тепловой поток ВГ обладает сравнительно высокой потенциальной мощностью, что подтверждает целесообразность разработки и применения систем утилизации бросовой теплоты ВГ дизельных двигателей тракторов и других самоходных машин в узлах и агрегатах МТУ. Актуальность таких разработок возрастает с увеличением мощности двигателей и снижением температуры ОС.

Рассмотрим зависимость потерь мощности, и роста температуры масла в КП от времени прогрева. С учётом результатов предыдущих исследований и желания потребителей достижения максимальной производительности системы «человек-машина» с минимальными непроизводительными трудозатратами принимаем время послепускового прогрева (без движения) не более 10 минут [6]. В течение этого времени прогрева (4-6 минут) расход топлива резко снижается, появляется масляный туман в картере двигателя. Кроме того, в это время заполняется тормозная система воздухом, до требуемого давления, водитель должен осмотреть машину и проверить работоспособность всех её систем, а в кабине должны быть созданы минимально комфортные условия для водителя, что гарантирует безопасность при движении агрегата.

В тоже время ряд исследователей утверждают, что конечная температура масла и охлаждающей жидкости после прогрева не должна быть менее плюс 70°С. Эта температура является оптимальной, при которой потери на трение в ЦПГ и в КП снижаются до минимальных значений и стабилизируются [7,8,9].

В ходе экспериментальных исследований было доказано, что большая часть теплоты затрачивается на нагрев металла основных деталей МТУ машин. Например, на прогрев деталей двигателя затрачивается теплоты в 4,2, а - КП в 6 раз больше, чем на прогрев охлаждающей жидкости и масла соответственно, что способствует увеличению внутренних потерь теплоты и потерь боковой поверхностью корпусными деталями в ОС, что негативно сказывается на времени прогрева.

Известно, что основная часть самоходных машин имеют трансмиссии, тепловой режим которых не поддерживается на оптимальном уровне, что сопровождается значительными потерями мощности двигателя на трение в сопряжениях машины [10]. Потери на трение, как известно, преобразуются в теплоту, которая разогревает масло в трансмиссии.

Очевидно, что использование бросовой теплоты ВГ позволит сократить потери на трение. Кроме того, избыток теплоты создаст возможность сократить время прогрева масла до оптимального теплового режима в КП и поддерживать его на заданном уровне. Рассмотрим зависимость потерь мощности и температуры масла от температуры ОС и времени прогрева (рисунок 4). Испытания опытной системы смазки КП показали, что использование бросовой эксергии ВГ позволило за 10 минут прогрева МТУ нагреть масло в КП на 18°С от его первоначального состояния без учёта теплоты, выделившейся при трении в сопряжениях, муфтах, шестернях КП и т.п.

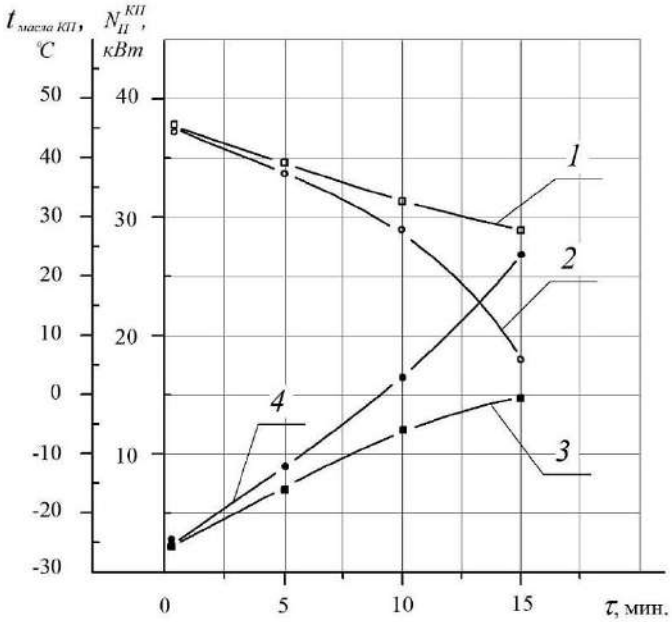


Рисунок 4 – Влияние температуры ОС и времени работы в период послепускового прогрева двигателя (без нагрузки, температура ОС минус 25°С, *пдв* - 2100 мин$^{-1}$) на потери мощности и температуры масла в КП: 1,2 – потери мощности в серийной (1) и опытной (2) системе смазки; 3,4 – температура масла в серийной (3) и опытной (4)системе смазки

Поскольку зимой основной вид работ связан с транспортом, то актуально получить зависимость потерь мощности в КП от температуры ОС. Предполагая, что трактор начинает движение сразу после пуска двигателя, можно считать, что начальная температура масла в КП близка к температуре ОС (рисунок 5).

При движении трактора на 8 передаче и температуре ОС минус 25°С температура масла в КП серийного трактора стабилизировалась на уровне 51°С по истечению 160 минут, а опытного – 81°С на 60 минуте. У серийного трактора потери мощности снизились соответственно с 52,4 до 12,1 кВт, а у опытного – 52,4 до 5,4 кВт. При температуре ОС плюс 25°С и прочих равных условиях у серийного трактора температура масла стабилизировалась на уровне плюс 69°С к 120 минуте, опытного – к 57 минуте на уровне 80°С. При этом потери мощности у серийного трактора снизились с 26,4 до 9,2 кВт, а у опытного – с 26,4 до 4,5 кВт.

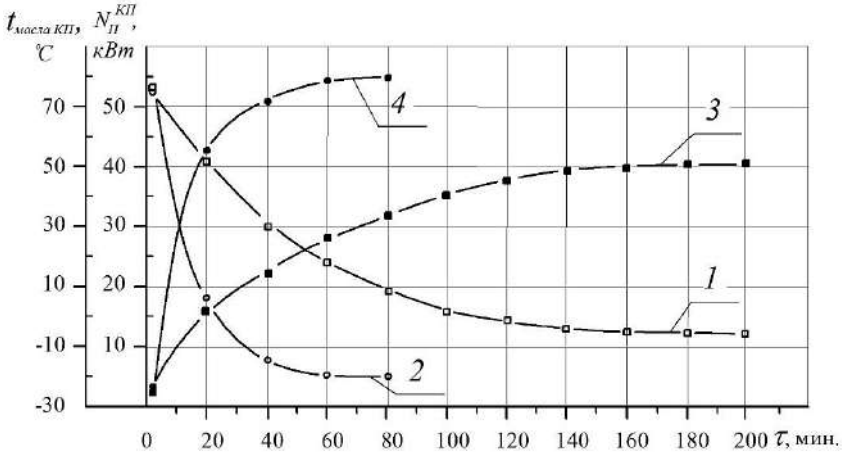


Рисунок 5 – Влияние времени работы на восьмой передаче (загрузка двигателя 60%, температура ОС минус 25°С) на потери мощности и температуры масла в КП: 1,2 – потери мощности в серийной (1) и опытной (2) системе смазки 3,4 – температура масла в серийной (3) и опытной (4) системе смазки

Одной из задач настоящего исследования была разработка способа вторичного использования бросовой теплоты ВГ. Другая не менее важная задача была посвящена разработке методики или применению уже существующей, которая предлагает оценивать эффективность вторичного использования теплоты, рассеиваемой в ОС, с помощью коэффициента теплоиспользования ($\eta_{ЭМТ}$).

С помощью уравнений (1) и (2) и полученным результатам экспериментальных исследований были определены коэффициенты полезного использования бросовой теплоты ($\eta_{ЭМТ}$) сгоревшего в двигателе топлива. При загрузке двигателя на 60% (73,5 кВт) и температуре ОС минус 25°С $\eta_{ЭМТ}$ достигал 60,1%. С повышением температуры ОС до плюс 25°С коэффициент снизился до 51,3%. Повышение нагрузки до 81% (97,8 кВт) и температуре ОС минус 25°С коэффициент $\eta_{ЭМТ}$ по сравнению с нагрузкой 60% снизился до 52,2%, С повышением температуры до плюс 25°С и нагрузке 81% также снизился до 49%.

Таким образом, потери мощности в КП самоходных машин (в т.ч. тракторов) имеют место в течение всего календарного года и достигают максимальных значений зимой. Увеличение потерь сопровождается повышением расхода топлива. Основная причина высоких потерь мощности в КП машины связана с низким тепловым режимом и его нестабильностью в течение рабочей смены, в результате чего в сотни раз и более может возрастать вязкость масла, которая вызывает резкое повышение гидравлических потерь. Исследования показали, что обозначенная проблема может быть частично решена путём вторичного использования бросовой теплоты, рассеиваемой в ОС жидкостной системой охлаждения двигателя, системой смазки и выхлопными газами.

Выводы.

1. Предложена методика оценки полезного использования теплоты сгоревшего в двигателе топлива с помощью эксергетического коэффициента теплоиспользования.

2. Разработана и испытана двухконтурная система автоматического поддержания оптимальной температуры масла в КП трактора ХТЗ-150К-09. Теплообменник-рекуператор системы устанавливался вместо глушителя, выполняя его функции.

3. Установлено, что после холодного пуска и двух минут прогрева на холостом ходу эксергия теплового потока ВГ достигла 150,8 МДж/ч или 42 кВт, что соответствует мощности серийно выпускаемого автономного жидкостного подогревателя. С увеличением нагрузки до 60% эксергия потока возрастает до 276 МДж/ч или 76,7 кВт.

4. Теплообменник-рекуператор показал относительно надёжную и эффективную работу в процессе стендовых испытаний. Однако есть замечания по работе механизма управления газовой заслонкой. Конструкция механизма требует доработки.

Список литературы

1. Дизельный двигатель в своем мощностном ряду пока вне конкуренции // tmholding.ru: Сайт АО «ТРАНСМАШХОЛДИНГ URL: http:// www.tmholding.ru/media/article/10163.html (дата обращения: 10.01.2022).

2. Пат. № 2523454, Российская Федерация, C1 МПК F28D 7/00 F28F 27/00. Газожидкостный кожухотрубный теплообменник с автоматической системой управления процессом теплообмена / Г.М. Крохта, А.Б. Иванников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Новосибирский носударственный аграрный университет. – № 2013100549/06; заявл. 09.01.13; опубл. 20.07.14, Бюл. № 20. – 12 с.

3. Пат. № 2500899, Российская Федерация, C1 МПК F01м 5/00. Система автоматического поддержания оптимальных температур рабочих жидкостей и масел в агрегатах и узлах самоходных машин / Г.М. Крохта, А.Б. Иванников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Новосибирский государственный аграрный университет. – № 2012111617/06; заявл. 26.03.12; опубл. 10.12.13, Бюл. № 34. – 8 с.

4. Кукис, В.С. Об эксергетическом балансе и эксергетическом коэффициенте полезного действия турбопоршневых ДВС/ В.С. Кукис. // В кн. Двигатели внутреннего сгорания. – Иркутск, 1974.

5. Жмудяк Л. Н. Исследование возможностей совершенствования рабочих процессов быстроходных дизелей [Текст]: автореф. дис. … канд. техн. наук. – М., 1974. – 25 с.

6. Крохта Г.М. Особенности прогрева двигателя внутреннего сгорания после холодного пуска / Г.М. Крохта, Н.А. Усатых, Е.Н. Хомченко // Двигателестроение. – 2021. - №4. – С.3-12.

7. Неговора, А.В. Предпусковая подготовка двигателя и агрегатов трансмиссии автомобиля к принятию нагрузки / А.В. Неговора, М.М. Разяпов, Ю.К. Филиппов // Известия международной академии аграрного образования. - 2012. – Т.1. № 14.

8. Крохта, Г.М. Вторичное использование бросовой теплоты двигателя для оптимизации тепловых режимов в агрегатах самоходных машин. / Г.М. Крохта, А.Б. Иванников, Е.А. Пронин // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 4.

9. Куликов, М.В. Прогрев рабочих жидкостей систем и агрегатов трактора выхлопными газами при низких температурах работы трактора Т-150К / М.В. Куликов, С.Н. Орловский // Вестник Алтайского государственного аграрного университета № 8 (94). – 2012. – С.116-121.

10. Селиванов, Н.И. Потери мощности в коробке передач трактора К-701 / Н.И. Селиванов и др. // Сборник. науч. тр. КрасГАУ. – 2000. – часть 1.

Refrrences

1. Dizel'nyj dvigatel' v svoem moshchnostnom ryadu poka vne konkurencii // tmholding.ru: Sajt AO «TRANSMASHKHOLDING URL: http:// www.tmholding.ru/media/article/10163.html (data obrashcheniya: 10.01.2022).

2. Pat. № 2523454, Rossijskaya Federaciya, C1 MPK F28D 7/00 F28F 27/00. Gazozhidkostnyj kozhuhotrubnyj teploobmennik s avtomaticheskoj sistemoj upravleniya processom teploobmena / G.M. Krohta, A.B. Ivannikov; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO Novosibirskij nosudarstvennyj agrarnyj universitet. – № 2013100549/06; zayavl. 09.01.13; opubl. 20.07.14, Byul. № 20. – 12 s.

3. Pat. № 2500899, Rossijskaya Federaciya, C1 MPK F01m 5/00. Sistema avtomaticheskogo podderzhaniya optimal'nyh temperatur rabochih zhidkostej i masel v agregatah i uzlah samohodnyh mashin / G.M. Krohta, A.B. Ivannikov; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO Novosibirskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet. – № 2012111617/06; zayavl. 26.03.12; opubl. 10.12.13, Byul. № 34. – 8 s.

4. Kukis, B.C. Ob eksergeticheskom balanse i eksergeticheskom koefficiente poleznogo dejstviya turboporshnevyh DVS/ B.C. Kukis. // V kn. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – Irkutsk, 1974.

5. ZHmudyak L. N. Issledovanie vozmozhnostej sovershenstvovaniya rabochih processov bystrohodnyh dizelej [Tekst]: avtoref. dis. … kand. tekhn. nauk. – M., 1974. – 25 s.

6. Krohta G.M. Osobennosti progreva dvigatelya vnutrennego sgoraniya posle holodnogo puska / G.M. Krohta, N.A. Usatyh, E.N. Homchenko // Dvigatelestroenie. – 2021. - №4. – S.3-12.

7. Negovora, A.V. Predpuskovaya podgotovka dvigatelya i agregatov transmissii avtomobilya k prinyatiyu nagruzki / A.V. Negovora, M.M. Razyapov, YU.K. Filippov // Izvestiya mezhdunarodnoj akademii agrarnogo obrazovaniya. - 2012. – T.1. № 14.

8. Krohta, G.M. Vtorichnoe ispol'zovanie brosovoj teploty dvigatelya dlya optimizacii teplovyh rezhimov v agregatah samohodnyh mashin. / G.M. Krohta, A.B. Ivannikov, E.A. Pronin // Traktory i sel'hozmashiny. – 2015. – № 4.

9. Kulikov, M.V. Progrev rabochih zhidkostej sistem i agregatov traktora vyhlopnymi gazami pri nizkih temperaturah raboty traktora T-150K / M.V. Kulikov, S.N. Orlovskij // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta № 8 (94). – 2012. – S.116-121.

10. Selivanov, N.I. Poteri moshchnosti v korobke peredach traktora K-701 / N.I. Selivanov i dr. // Sbornik. nauch. tr. KrasGAU. – 2000. – chast' 1.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Иванов Николай Михайлович - доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, руководитель организации, ФГБНУ Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства СФНЦА РАН, Россия, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск.

Иванников Алексей Борисович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства СФНЦА РАН, Россия, Новосибирская обл., Новосибирский район, р.п. Краснообск, email: alekc73@rambler.ru.

Крохта Геннадий Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», Россия, г. Новосибирск.

Author credentials

Affiliations

Ivanov Nikolai - Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Organization, Siberian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, Siberian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Russia, Novosibirsk Region, r.p. Krasnoobsk.

Ivannikov Aleksey – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Siberian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, Siberian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Russia, Novosibirsk Region, r.p. Krasnoobsk, email: alekc73@rambler.ru.

Krokhta Gennady – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Agricultural Machines, Novosibirsk State Agrarian University, Russia, Novosibirsk.

Поступила в редакцию (Received): 27.01.2022 Принята к публикации (Accepted): 18.02.2022

УДК 631.171

DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-101-108

ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ВАРОЧНОГО КОТЛА С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ

[1]Шувалов Анатолий Михайлович

[1]Машков Алексей Николаевич

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

Реферат. *На основе результатов информационно-патентных исследований установлено, что существует широкий спектр варочных газоиспользующих котлов, имеющих различный уровень автоматизации процесса термической обработки продукта и обеспечения безопасности в процессе эксплуатации. Анализ систем энергообеспечения в варочных и отопительных котлах показал целесообразность разработки новой перспективной схемы саморегулирования мощности на базе полупроводниковых термоэлементов. Определены допустимые параметры напряжения термоэлектрической батареи для расчета количества термоэлектрических элементов, необходимые для работы действующего экспериментального образца газоиспользующей системы энер-*

гообеспечения варочного котла с саморегулированием мощности, минимальное напряжение – 0,7 В; максимальное напряжение 7 В. Проводились исследования по разработке энергоэкономного газоиспользующего варочного котла с регулированием расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку в процессе приготовления корма или пищи. Экспериментальные исследования показали, что применение системы энергообеспечения с регулированием мощности газовой горелки пропорционально потребляемому тепловому потоку варочного котла позволяет экономить энергии до 19,75%. В настоящее время создана перспективная система автоматического регулирования расхода газа по изменяющемуся в процессе нагрева температурному напору – разности температур пара и поверхности варочной ёмкости. В качестве основного узла регулирования газа приняты полупроводниковые элементы, которые без промежуточного усилителя управляют исполнительным механизмом газового клапана. Экспериментальные исследования подтвердили перспективность применения варочных котлов с пропорциональным регулированием расхода газа.

Ключевые слова: *варочный котел, газ, мощность, полупроводниковый термоэлектрический элемент.*

STUDY OF THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF THE DIGESTER WITH SMOOTH POWER REGULATION

[1]Shuvalov Anatoliy
[1]Mashkov Alexey
[1]Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute for Use machinery and Petroleum products in Agriculture"

Abstract. *It has been established on the basis of the results of information and patent research that there is a wide range of cooking gas-using boilers with a different level of automation of the process of thermal processing of the product and ensuring safety during operation. An analysis of power supply systems in digesters and heating boilers showed the feasibility of developing a new advanced power self-regulation scheme based on semiconductor thermoelements. The allowable voltage parameters of a thermoelectric battery for calculating the number of thermoelectric elements necessary for the operation of an existing experimental sample of a gas-using power supply system of a digester with self-regulation of power were determined, the minimum voltage is 0.7 V; maximum voltage 7 V. Research was carried out on the development of an energy-saving gas-using digester with gas flow control in proportion to the heat flux consumed in the process of preparing feed or food. Experimental studies have shown that the use of an energy supply system with gas burner power control in proportion to the consumed heat flow of the digester allows energy savings of up to 19.75%. At present, a promising system has been created for automatic control of gas flow according to the temperature difference that changes during heating - the temperature difference between the steam and the surface of the brewing vessel. Semiconductor elements are adopted as the main gas control unit, which control the gas valve actuator without an intermediate amplifier. Experimental studies have confirmed the promise of using digesters with proportional control of gas flow*

Keywords: *digester, gas, power, semiconductor thermoelectric element.*

Введение. В личных подсобных и фермерских хозяйства основным способом обработки кормов является тепловая с использованием для этих целей дров, электроэнергии и газа. В настоящее время интенсивно развивается газификация села. Природный газ – самый дешевый энергоноситель и применение его в хозяйстве на приготовление корма снизит себестоимость мяса или молока, что повысит конкурентоспособность на внутреннем рынке.

В существующих газовых котлах для приготовления пищи и кормов предусмотрены средства автоматизации с одноступенчатым регулированием мощности (включено-выключено) или двухступенчатое – максимальный и минимальный расход газа. Однако в этом случае существует недостаток: при повышении температуры в варочной ёмкости котла близко к закипанию продукта увеличивается частота включения и выключения газовой горелки. Такой режим её работы снижает надёжность, увеличивает износ автоматики и устройств газовой горелки. Кроме того при частом включении и отключении подачи газа возможен срыв пламени, что может привести к тяжелым

последствиям. К тому же для поддержания «тихого кипения» оператор постоянно должен вручную дополнительно настраивать газовую горелку на требуемый режим. И конечно отсутствие плавного регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку приводит к излишнему его расходу. Таким образом, возникает потребность в применении плавного регулирования расхода газа.

Цель исследований – теоретическое и экспериментальное обоснование создания системы энергообеспечения газоиспользующего варочного котла с плавным регулированием мощности.

Материалы и методы исследований. Для реализации цели были проведены информационно - патентные исследования [1-3] , выявлены перспективные технические средства автоматизации газовых горелочных устройств [4-7]. Информационно-патентные исследования технических средств автоматики различных газоиспользующих котлов по устройству и назначению показывают, что наиболее высокий уровень научной проработки и практического применения достигнут в бытовых отопительных котлах малой мощности [7-15]. С точки зрения автоматизации систем энергообеспечения: процесса розжига газовой горелки, контроль наличия пламени, тяги в дымоходе, обеспечения безопасной работы (контроль давления в газовом трубопроводе, утечки газа, перегрева теплоносителя и др.) они оказались наиболее продвинутыми [4]. По-видимому катализатором к совершенствованию средств автоматизации таких котлов являлся повышенный спрос на них и широкомасштабное внедрение, а так же ужесточенные требования по обеспечению техники безопасности. В этой связи была выдвинута идея максимально использовать средства автоматизации бытовых отопительных котлов для систем энергообеспечения варочных котлов. После внесения изменений в схему автоматики, проводя корректировку, применили её и для газоиспользующих кормоварочных котлов.

Режимы работы варочных котлов принципиально отличаются от режимов газовых отопительных и водонагревательных котлов, то есть технологии отопления или проточного нагрева воды не сопоставимы с технологиями варки кормов или продуктов. В варочном котле в начальный период системой энергообеспечения осуществляется нагрев продукта от минимальной температуры (5 – 14 °С) до кипения, затем идет процесс варки продукта при температуре кипения, а когда продукт будет сварен, система энергообеспечения должна отключиться. Эти циклы повторяются при каждой новой порции приготовляемого продукта и система энергообеспечения должна четко выдерживать технологию каждого цикла. Теоретически было доказано [8-10], что потребляемый тепловой поток варочного котла в начальный период разогрева продукта и металлоконструкций котла должен быть максимальным, а в процессе нагрева продукта, когда температурный напор (разность температур между температурой пара и продукта) уменьшается, то потребляемый тепловой поток также должен уменьшаться в такой же пропорции. Если же системой энергообеспечения тепловой поток не будет изменяться пропорционально потребляемому тепловому потоку, то будет наблюдаться значительный перерасход газа. Все эти особенности были учтены при разработке новой системы энергообеспечения газоиспользующего варочного котла.

В результате литературного обзора и исследований было установлено, что работоспособную и перспективную схему пропорционального регулирования расхода газа в варочном котле можно выполнить на базе полупроводниковых термоэлементов [11-13].

Использование идеи термоэлектрического преобразования и производства электроэнергии стало возможным благодаря исследованиям отечественных ученых под руководством академика А.Ф. Иоффе [14], который предложил применять в термоэлементах вместо металлических проводников полупроводниковые материалы, обладающие высокой термоэлектродвижущей силой в 40 – 50 раз большей, чем в металлах. И многие десятилетия термоэлементы на базе полупроводниковых материалов применяются в технике во всём мире в качестве термопар для измерения температуры в различных средах, а также в схемах автоматики теплотехнических изделий.

Однако следует отметить, что в термопарах величина электрического тока крайне мала и недостаточная для регуляторов прямого действия в схемах автоматического пропорционального регулирования расхода газа в варочных котлах. В то же время полупроводнниковые термоэлементы оказались более продвинутыми с точки зрения конструктивного исполнения, серийного производства и использования их в тепло – холодо - технике. В настоящее время на рынке сбыта появились относительно не дорогие, компактные, малогабаритные модули (рисунок 1), включающих в себя

120 и более полупроводниковых термоэлектрических элементов. Производят их в основном в Китае и частично в России [11].

Используя такие модули не для прямого (производство холода и тепла), а для обратного назначения – производство электроэнергии, в ФГБНУ ВНИИТиН разработана конструктивно-технологическая схема системы регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку. Она представляет собой термоэлектрическую батарею, выполненную из нескольких термоэлектрических модулей. Такая термоэлектрическая батарея (сборка), смонтированная на днище варочной ёмкости или на другом месте варочной ёмкости за счет разности температур на внутренней и наружной стенках каждого термоэлектрического модуля вырабатывает электрический сигнал, величина которого изменяется пропорционально температурному напору. В результате получена энергонезависимая от централизованного электроснабжения система энергообеспечения варочного котла с пропорциональным регулированием расхода газа и использованием при этом нетрадиционного источника электроэнергии.

Это позволяет независимо от аварийных или плановых отключений централизованной системы электроснабжения продолжать работу газоиспользующих варочных котлов в режиме пропорционального регулирования расхода газа.

Рисунок 1 – Полупроводниковые термоэлектрические элементы

Следует отметить, что важным преимуществом по сравнению с традиционной системой регулирования расхода газа является то, что в разработанной схеме отсутствует промежуточный усилитель сигнала (процессор), то есть термоэлектрическая батарея, выполненная на базе полупроводниковых термоэлектрических модулей, выдаёт энергию (мощность, напряжение, сила тока) достаточную без промежуточных звеньев управлять исполнительным механизмом расхода газа. И применительно к варочному котлу главным преимуществом использования термоэлектрических элементов в такой системе является то, что собранная термоэлектрическая батарея на базе полупроводниковых термоэлектрических модулей и смонтированный на поверхности варочной ёмкости выдаёт сигнал (мощность, напряжение, ток) достаточный по величине и пропорционально разности температур между паром и приготовляемым кормом (продуктом), то есть правильно рассчитанная термоэлектрическая батарея выдаёт в реальном времени достаточное количество энергии для управления регулирующим исполнительным механизмом и изменяет расход газа пропорционально температурному напору. Важно отметить, что полученный таким образом термоэлектрический ток в разработанной конструктивно-технологической схеме системы саморегулирования расхода газа напрямую без промежуточных звеньев воздействует на исполнительный механизм газогорелочного устройства, увеличивая или уменьшая расход газа в зависимости от температурного напора. Это важное преимущество такой схемы, так как упрощается комплект обору-

дования системы пропорционального регулирования расхода газа и повышается надёжность в её работе.

Подбор (расчет) термоэлектрических батарей для получения электроэнергии требует знаний основных их характеристик.

В связи с этим был проведен опыт в лабораторных условиях для определения рабочих параметров термоэлектрических элементов.

Результаты проведенного опыта отражены на графике (рисунок 2).

Из графика (рисунок 2) следует, что зависимость носит пропорциональный характер, то есть напряжение на выходе термоэлектрической батареи изменяется пропорционально температурному напору.

Для расчета количества термоэлектрических элементов, необходимых для работы действующего экспериментального образца газоиспользующей системы энергообеспечения варочного котла с саморегулированием мощности, определены основные характеристики: минимальное напряжение – 0,7 В; максимальное напряжение 7 В. Эта величина напряжения определена исходя из рабочих параметров селеноида, обеспечивающего с помощью задвижки регулирование расхода газа.

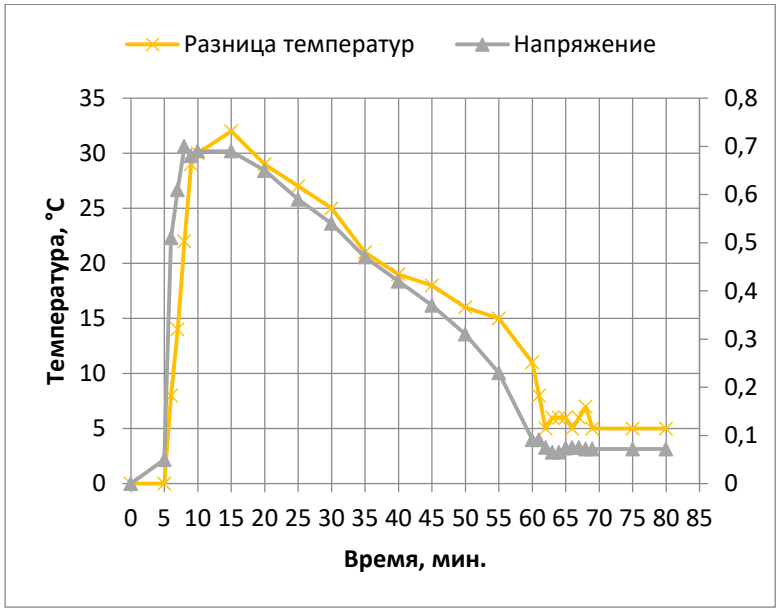


Рисунок 2 – Изменение напряжения на выходе термоэлектрического модуля и температурного напора нагрева воды

Результаты и их обсуждение. На основе теоретических [8-10] и экспериментальных исследований разработан и создан действующий образец перспективного не имеющего аналогов (защищён двумя патентами) кормоварочный котёл с плавным регулированием расхода газа. В нём применена система энергообеспечения процесса варки продукта с плавным регулированием мощности пропорционально потребляемому тепловому потоку, выполненная на базе полупроводниковой термоэлектрической батареи и селеноида с задвижкой, обеспечивающие регулирование расхода газа пропорционально температурному напору.

Такая система энергообеспечения газоиспользующего варочного котла с наименьшими энергетическими затратами может обеспечивать приготовление кормов на животноводческих фермах, пищи в столовых сельхозпредприятий, сельских школах и больницах, а так же термическую обработку различной сельхозпродукции (пастеризацию молока, фруктовых соков, приготовление теста, сыров, колбасных изделий).

Проведены экспериментальные исследования системы энергообеспечения, выполненной на базе полупроводниковых модулей. Как следует из графика (рис. 3) расход газа в варочном котле осуществляется пропорционально температурному напору, то есть при разогреве продукта в ва-

рочной ёмкости до кипения уменьшается температурный напор и вследствие этого уменьшается расход газа. При этом напряжение на выходе полупроводниковой термоэлектрической батареи максимальное при максимальном температурном напоре (продукт не нагрет) и в этот момент осуществляется максимальный расход газа. С уменьшением температурного напора напряжение на термоэлектрической батареи уменьшается и в результате соленоид прикрывает задвижку и уменьшает расход газа. Таким образом экспериментальные исследования подтверждают, что система энергообеспечения, выполненная на базе полупроводниковой термоэлектрической батареи, обеспечивает регулирование расхода газа пропорционально температурному напору. Это позволяет при разогреве продукта до кипения экономить 19,75% используемого газа.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получена следующая научная новизна:

- теоретически и экспериментально обоснованы параметры системы энергообеспечения газоиспользующего котла и создан его действующий образец с плавным регулированием мощности пропорционально изменению теплового потока, расходуемого на нагрев и кипение содержимого в варочной ёмкости.

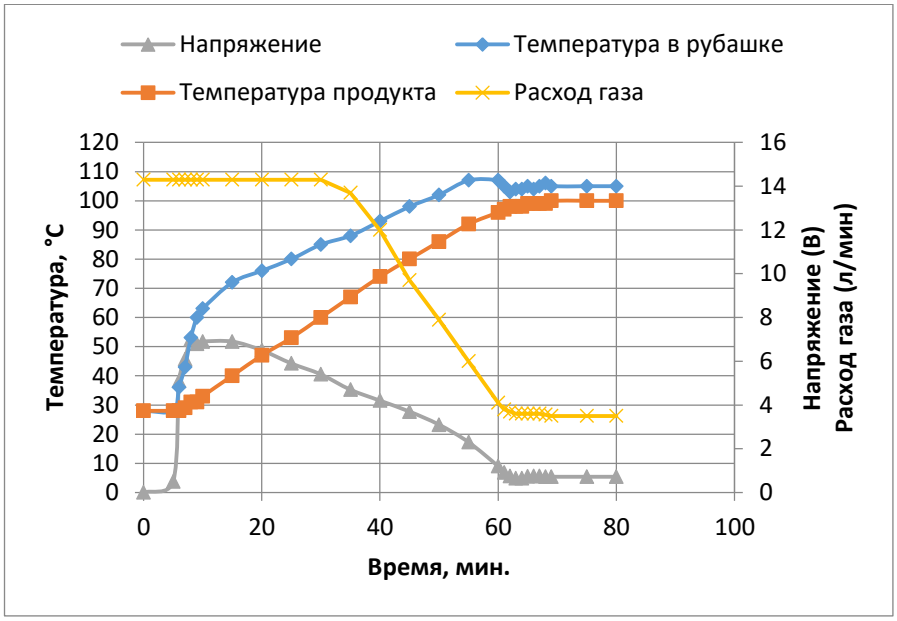


Рисунок 3 – Динамика расхода газа и температуры продукта с пропорциональным регулированием теплового потока.

- Обоснован принцип регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку варочным колом.

- Разработана математическая модель, описывающая энергетические процессы в кормоварочном котле с пропорциональным регулированием мощности.

- Установлены закономерности изменения теплового потока и расхода энергии варочного котла с плавным регулированием расхода газа;

- Получена динамика температурного напора и установлена взаимосвязь его с напряжением на выходе термоэлектрической батареи;

- Обоснована целесообразность применения полупроводниковых термоэлементов Пельтье в схеме пропорционального регулирования расхода газа.

- Обоснованы параметры полупроводниковой термоэлектрической батареи

- Экспериментально обоснована номинальная мощность газовой горелки варочного котла с варочной ёмкостью 100л при пропорциональном регулировании теплового потока, 9 л/мин (14 кВт).

- Экспериментально обоснован КПД котла в режиме пропорционального регулирования расхода газа, который равен 84%.

Выводы.

1. На основе анализа средств автоматического регулирования расхода газа в варочных и отопительных котлах установлена целесообразность разработки новой перспективной схемы саморегулирования мощности для варочных котлов на базе полупроводниковых термоэлементов.

2. Используя широко распространённые в мини холодильной технике, серийно выпускаемые в Китае, в России и предлагаемые для реализации полупроводниковые термоэлементы с эффектом при пропускании тока выделять холод и тепло и применив их не по прямому, а по обратному назначению: выработки электроэнергии за счет значительной разности температур на спаях двух разноимённых полупроводников, была разработана перспективная схема регулирования расхода газа пропорционально потребляемому тепловому потоку в газоиспользующем варочном котле.

3. Разработана конструктивно-технологическая схема, создан действующий газоиспользующий варочный котёл с саморегулируемой системой энергообеспечения процесса термической обработки кормов и сельхозпродукции.

4. Исследования созданного действующего образца системы энергообеспечения с пропорциональным регулированием расхода газа, выполненной на базе полупроводниковых термоэлементов, показали эффективность применения её в варочных котлах. Установлено, что экономия газа составляет 19,75%.

Список литературы

1. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013-2020 годы. – М., 2013. – 388 с.

2. Антуфьев, В.Т. Концепция совершенствования газовых пищеварочных котлов / В.Т. Антуфьев, М.А. Амосова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищеварочных производств», 2007. - №1.

3. sovet-ingenera.com/otoplenie/kotly/avtomatika-dlya-gazovyx-kotlov-otopleniya.html

4. https://znatoktepla.ru/kotly/obzor-ob-avtomatike.html

5. otople.com/avtomatika-i-sredstva-upravleniya

6. https://studopedia.su/18_148766_avtomatika-gazovih-apparatov.html

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

8. Шувалов А.М., Машков А.Н., Чернов Д.С. Математическая модель тепло- массообменных процессов в газоиспользующем кормоварочном котле с саморегулированием мощности // Наука в центральной России. 2020. - № 2 (44). - С. 93-99.

9. Шувалов А.М., Машков А.Н., Чернов Д.С. Обоснование принципа саморегулирования мощности кормоварочного котла на газовом топливе // Наука в центральной России. 2020. - № 4 (46). - С. 62-67.

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

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

12.Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. –М. –Л.:изд-во АН СССР,1956.

13.Тихомиров Д.А., Тихомиров А.В. Оценка потребностей сельского хозяйства РФ в энергоресурсах и их структура на период до 2030 г. // Инновации в сельском хозяйстве. - 2018. - № 28. -С. 101-109.

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

References

1. Gosudarstvennaya programma razvitiya sel'skogo hozyajstva i regulirovaniya rynkov sel'skohozyajstvennoj produkcii, syr'ya i prodovol'stviya na 2013-2020 gody. – M., 2013. – 388 s.

2. Antuf'ev, V.T. Koncepciya sovershenstvovaniya gazovyh pishchevarochnyh kotlov / V.T. Antuf'ev, M.A. Amosova // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya «Processy i apparaty pishchevarochnyh proizvodstv», 2007. - №1.

3. sovet-ingenera.com/otoplenie/kotly/avtomatika-dlya-gazovyx-kotlov-otopleniya.html
4. https://znatoktepla.ru/kotly/obzor-ob-avtomatike.html
5. otople.com/avtomatika-i-sredstva-upravleniya
6. https://studopedia.su/18_148766_avtomatika-gazovih-apparatov.html
7. Litvina L.S. Frolova Z.S. Teplovoe oborudovanie obshchestvennogo pitaniya. – M.: Ekonomika, 1987. – 272 s.
8. SHuvalov A.M., Mashkov A.N., CHernov D.S. Matematicheskaya model' teplo- massoobmennyh processov v gazoispol'zuyushchem kormovarochnom kotle s samoregulirovaniem moshchnosti // Nauka v central'noj Rossii. 2020. - № 2 (44). - S. 93-99.
9. SHuvalov A.M., Mashkov A.N., CHernov D.S. Obosnovanie principa samoregulirovaniya moshchnosti kormovarochnogo kotla na gazovom toplive // Nauka v central'noj Rossii. 2020. - № 4 (46). - S. 62-67.
10. SHuvalov A.M., Mashkov A.N., Tihomirov D.A. Analiz teploenergeticheskih processov v sisteme energoobespecheniya gazoispol'zuyushchego kormovarochnogo kotla // Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK. 2020. T. 67. - № 1 (38). - S. 71-77.
11. V.N. Belozercev, S.O Nekrasova, D.V. Sarmin, D.A.Uglanov. Opredelenie osnovnyh harakteristik termoelektricheskogo generatora: uchebnoe posobie. – Samara: izd-vo SGAU, 2015. -88s.
12. Ioffe A.F. Poluprovodnikovye termoelementy. –M. –L.: izd-vo AN SSSR,1956.
13.Tihomirov D.A., Tihomirov A.V. Ocenka potrebnostej sel'skogo hozyajstva RF v energoresursah i ih struktura na period do 2030 g. // Innovacii v sel'skom hozyajstve. - 2018. - № 28. -C. 101-109.
14.Trunov S.S., Tihomirov D.A. Termoelektricheskoe osushenie vozduha v sel'skohozyajstvennyh pomeshcheniyah // Nauka v central'noj Rossii. - 2018. -№2 (32). - S. 51-59.

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 научноисследовательский 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.

Поступила в редакцию (Received): 27.01.2022 Принята к публикации (Accepted): 19.02.2022

УДК 621.899:620.19
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-108-118

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБРАЗОВАНИЯ УГЛЕРОДНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ УЗЛА ТРЕНИЯ

[1]Нагдаев Владимир Константинович
[2]Першин Владимир Федорович,
[1,2,3] Вигдорович Михаэль,
[1,4] Остриков Валерий Васильевич
[5]Сафонов Валентин Владимирович,

[2]Алхило Земан Абуд А.А
[1]ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»
[2]ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
[3]Angara GmbH, Германия, г. Дюссельдорф
[4] ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»
[5] ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»

Реферат. *Создаваемые на поверхности трения защитные пленки способствуют продлению сроков службы машин. Но вопрос динамики образования пленки и её разрушения в зависимости от различных факторов изучен недостаточно. Металлизированные пленки обладают недостаточной прочностью сцепления с основой. В работе поставлена задача исследования процессов образования углеродной пленки на поверхности узла трения «ролик – ролик» в смазке Литол-24 с добавкой в виде многослойного графена в количестве 0,2 % масс. Оценка изменений поверхностей трения проводилась с использованием цифрового микроскопа Kromatech и электронной микроскопии. Шероховатость поверхности и толщина углеродной плёнки определялась с помощью профилометра. Сравнительные испытания осуществлялись на машине трения МИ-1М. Определение коэффициента трения проводилось на паре цилиндр – шарик. В результате исследований установлено, что основная масса углерода находилась во впадинах микроповерхностей трения. Исследована динамика образования углеродной пленки на поверхности узла трения «ролик – ролик». В Литол – 24 вносится добавка в виде многослойного графена в количестве 0,2% масс. Образование углеродной пленки наблюдается в первые 30 минут работы узла трения. В течении 60 мин толщина пленки достигает толщины 0,347мкм. В следующие 30 минут преобладает процесс разрушения пленки до толщины 0,291 мкм. После 6 часов испытания узла трения пленка достигает толщины 0,367 мкм. Измерение шероховатости микро- поверхности трения показало, что шероховатость изменилась с 5 класса до 11. Толщина пленки измерялась с помощью профилометра и сканирующим электронным микроскопом. Пленка обладает антифрикционными свойствами – происходит уменьшение температуры ролика и уменьшение момента силы трения. Коэффициент трения уменьшается приблизительно в 2раза, с 0,197 до 0,060. Механизм образования углеродной пленки на узле трения носит периодический характер. Одновременно протекают два процесса – процесс образования углеродной пленки и процесс ее разрушения. То есть на первой стадии углеродная фаза заполняет микровпадины, поскольку в микровпадинах максимальная удельная поверхность, следовательно, максимальная поверхностная энергия. Далее по мере заполнения микровпадин начинается формирование плёнки на всей поверхности трения. После формирования плёнки в процессе работы узла трения происходит относительное разрушение плёнки при определённых условиях.*

Ключевые слова: *углеродная плёнка, многослойный графен, сканирующая электронная микроскопия, шероховатость микро-поверхности, момент силы трения, коэффициент трения, толщина углеродной плёнки.*

INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF THE FORMATION OF A CARBON FILM ON THE SURFACE OF THE FRICTION UNIT

[1]Nagdaev Vladimir
[2]Pershin Vladimir
[1,2,3] Vigdorowitsch Michael
[1,4] Ostrikov Valery
[5]Safonov Valentin
[2]Alhilo Zeman Abud A.A.
[1]FSBSI «All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture»
[2] FSBEI HE "Tambov State Technical University"
[3] Angara GmbH, Dusseldorf, Germany
[4]FSBEI HE "Michurinsk State Agrarian University"

[5]*FSBEI HE " Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov»*

Abstract. *Protective films created on the friction surface contribute to extending the service life of machines. But the question of the dynamics of film formation and its destruction, depending on various factors, has not been studied enough. Metallized films have insufficient adhesion strength to the substrate. The task of studying the processes of formation of a carbon film on the surface of the roller-roller friction unit in Litol-24 lubricant with an additive in the form of multilayer graphene in the amount of 0.2 wt. % put in work. Evaluation of changes in friction surfaces was carried out using a Kromatech digital microscope and electron microscopy. Surface roughness and carbon film thickness were determined using a profilometer. Comparative tests were carried out on a MI-1M friction machine. Determination of the coefficient of friction was carried out on a pair of cylinder - ball. As a result of the research, it was found that the bulk of carbon was in the depressions of the friction microsurfaces. The dynamics of the formation of a carbon film on the surface of the roller-roller friction unit has been investigated. In Litol-24, an additive is introduced in the form of multilayer graphene in an amount of 0.2% of the mass. The formation of a carbon film is observed in the first 30 minutes of operation of the friction unit. Within 60 minutes, the film thickness reaches 0.347 μm. In the next 30 minutes, the process of destruction of the film to a thickness of 0.291 μm prevails. After 6 hours of testing the friction unit, the film reaches a thickness of 0.367 μm. Measurement of the roughness of the micro-friction surface showed that the roughness changed from grade 5 to 11. The thickness of the film was measured using a profilometer and a scanning electron microscope. The film has antifriction properties - the roller temperature decreases and the frictional moment decreases. The friction coefficient decreases approximately 2 times, from 0.197 to 0.060. The mechanism of the formation of a carbon film on the friction unit is periodic. Two processes occur simultaneously - the process of the formation of a carbon film and the process of its destruction. That is, in the first stage, the carbon phase fills the microdepressions, since the microdepressions have the maximum specific surface area, hence, the maximum surface energy. Further, as the microdepressions are filled, the formation of a film begins on the entire friction surface. After the formation of the film in the process of operation of the friction unit, a relative destruction of the film occurs under certain conditions.*

Keywords: *carbon film, multilayer graphene, micro-surface roughness, moment of friction force, coefficient of friction, thickness of the carbon film.*

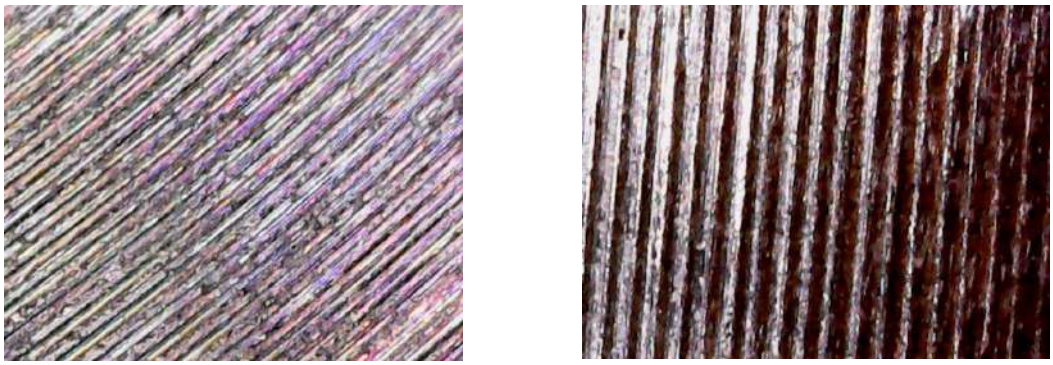
Введение. Искусственно создаваемые на поверхности трения металлические и химические пленки хотя и продлевают срок службы поверхностного слоя, но во многих случаях этого недостаточно. Основной их недостаток – отсутствие компенсации повреждения и износа, ведущих к разрушению узлов трения [1-5]. Кроме этого, металлизированные покрытия обладают недостаточной прочностью сцепления (адгезией) с металлической основой, которая под действием окружающей коррозионной среды и повышенных температурах снижается.

В работе [6] показано образование углеродной плёнки на поверхности трения «ролик-ролик» из смазки на основе Литола-24. Целью данной работы является исследование процессов образования углеродной пленки на поверхности узла трения «ролик-ролик».

Методика проведения исследования. При проведении исследований микрофотографирования поверхностей трения использовался цифровой микроскоп Kromatech 50x500. Сканирующая электронная микроскопия осуществлялась электронным микроскопом. Определение шероховатости ролика и толщины углеродной пленки проводилась профилометром модели 130. Измерение температуры нижнего ролика осуществлялось с помощью лазерного цифрового пирометра Mastech MS6530. Сравнительные испытания смазочных материалов проводили на машине трения МИ-1М, которую тарировали по нагрузке и моменту силы трения, согласно инструкции по эксплуатации, перед началом испытаний. Для изготовления роликов с наружным диаметром – 50 мм, шириной нижнего ролика – 12 мм, верхнего – 10 мм, шероховатостью поверхностей трения R_a – 0,172 мкм, твёрдостью – HRC 60…62 использовали сталь ШХ-15 ГОСТ 2590-88. Частота вращения нижнего ролика составляла 500 мин$^{-1}$.

Экспериментальное определение коэффициента трения проводилось на установке цилиндр – шарик.

Обсуждение результатов исследований. На микрофотографии с углеродным покрытием (рисунок 1) видно, что основная масса углерода (темные полосы) располагается во впадинах микроповерхности металла.

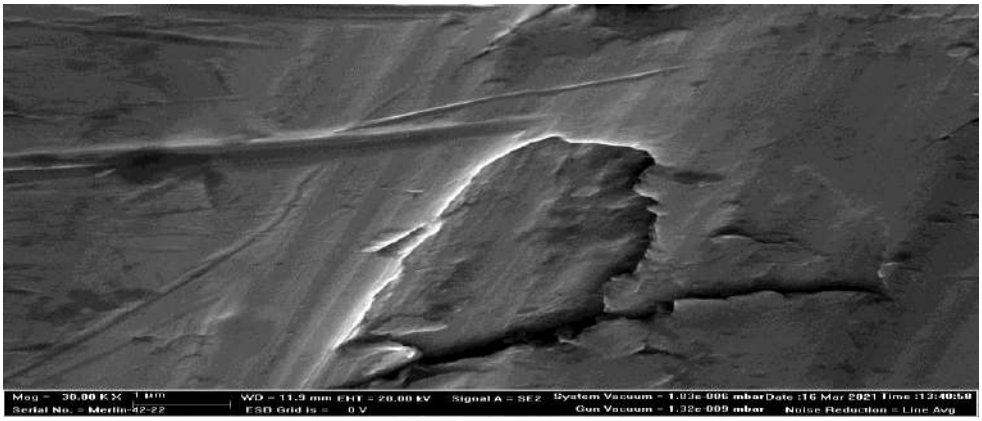


а) б)

Рисунок 1 - а) Микрофотография поверхности металлического ролика (увеличение в 110 раз); б) Микрофотография поверхности ролика после 6 часов работы в смазке Литол 24+графен.

СЭМ (сканирующая электронная микроскопия) изображения поверхности стали ШХ15 с антифрикционной пленкой показаны на рисунке 2.

а)



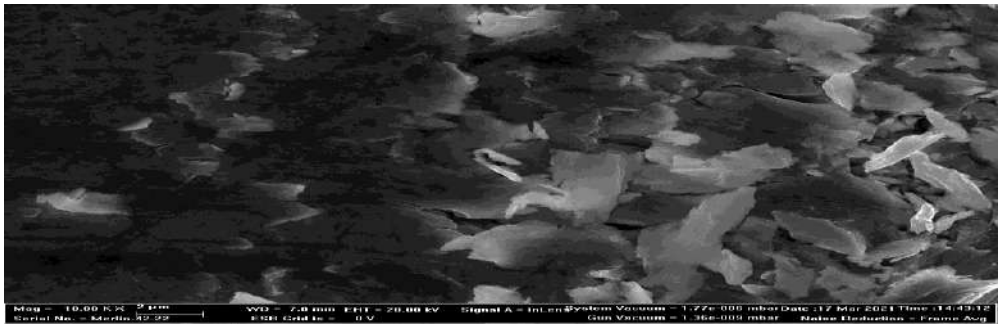
б)

Рисунок 2 - СЭМ изображения поверхности стали ШХ15 с антифрикционной пленкой

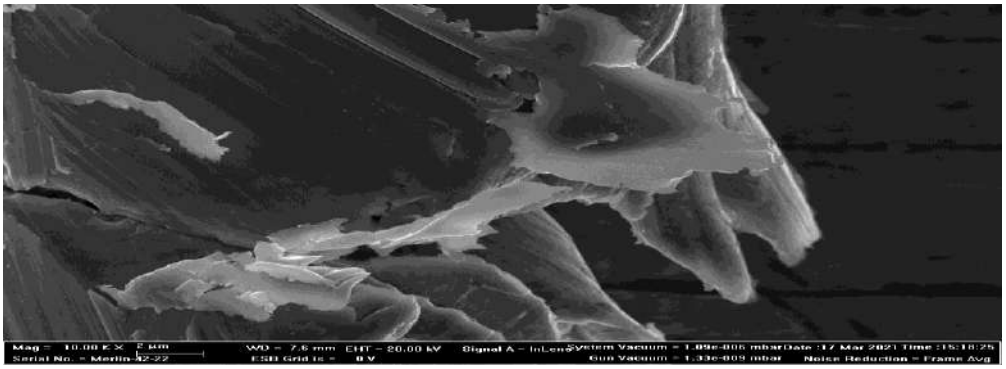
Для определения состава пленки провели ее деформирование с целью разрушения (рисунок 2 а). На рисунках видно, что в нескольких местах пленка оторвалась от поверхности стали и образовались каверны. Увеличенное изображение одной из каверн показано на рисунке. 2 б.

Аналогичная пленка была получена на поверхности цилиндра диаметром 26 мм, изготовленном из бронзы БрЩФ10-1. СЭМ изображения показана на рисунке 3 а**.** Поскольку твердость бронзы меньше твердости стали, при деформации пленки произошло отслоение не только материала пленки, но и бронзы, как это видно на рисунке 3б. Увеличенный фрагмент отслоившихся чешуек показан на рисунке 3 в, а результаты определения толщины чешуек пленки показаны на рисунке 3г.

а)



б)

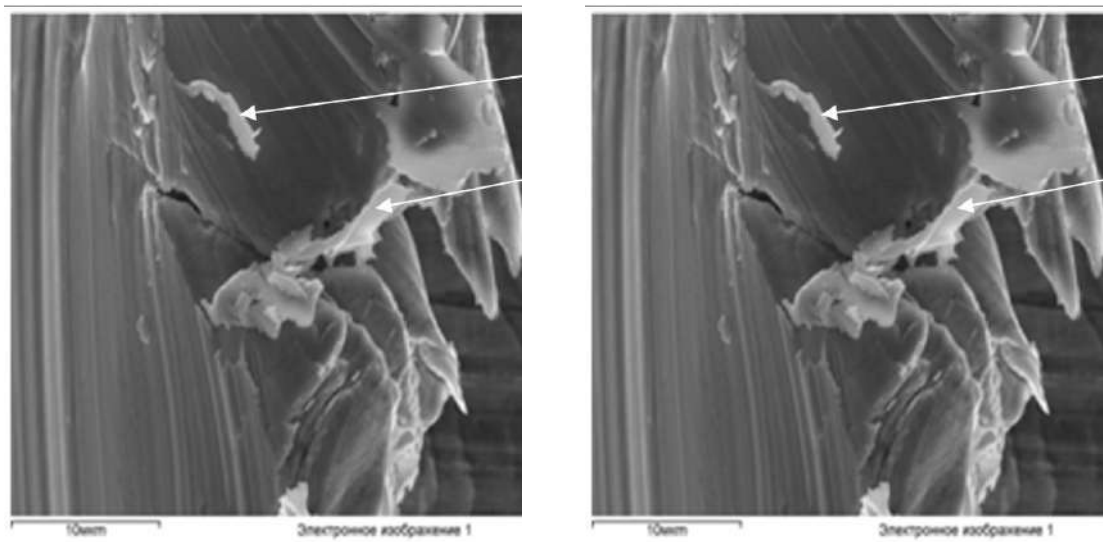


в)

г)

Рисунок 3 - СЭМ изображения бронзовой поверхности с антифрикционной пленкой

Для определения элементного состава пленки было проведено картирование отдельных участков. Характерные результаты картирования показаны на рисунке 4.

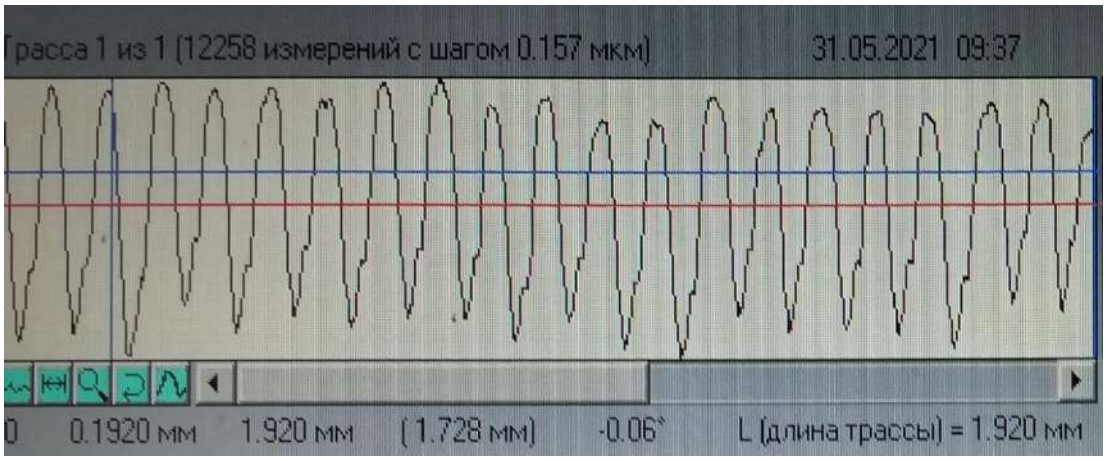


а) б)

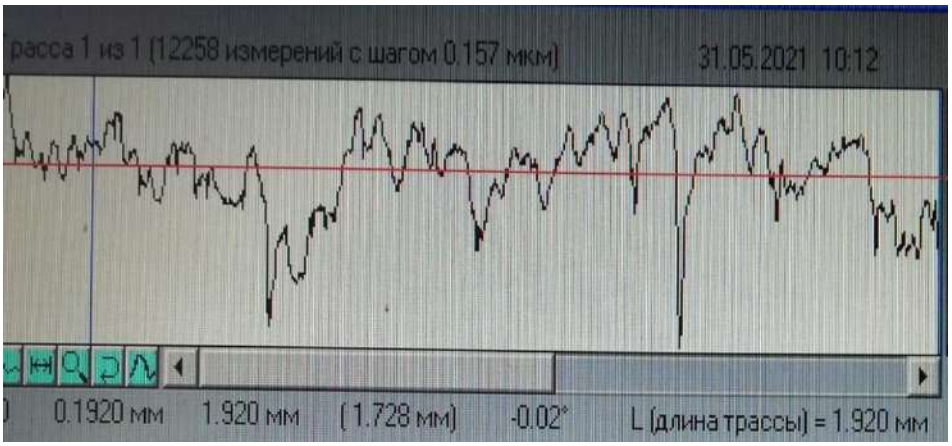
Рисунок 4 - Результаты картирования: а – электронное изображение; б – распределение углерода на данном участке

Сравнение изображений (рисунок 5 а и 5 б) показывает, что ряд чешуек состоят в основном из углерода, что подтверждает состав образовавшейся на поверхности стали ШХ15 углеродной пленки.

С изменением толщины углеродной пленки (времени работы узла трения) изменяется шероховатость углеродной поверхности. За первый час шероховатость меняется с 5 класса до 9-10. С 1часа до 3 часов шероховатость увеличивается до 8-9 класса. Затем происходит уменьшение шероховатости до 10 – 11 класса (таблица 1).



а)



б)

Рисунок 5 - а - профилограмма металлической поверхности ролика,
б - профилограмма углеродной пленки на поверхности ролика

Таблица 1 - Изменение шероховатости углеродной поверхности от времени работы узла трения

Время работы узла трения, час	0	0,5	1,0	1,5	3,0	6,0
Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности, R_a, мкм	0,172	0,06	0,020	0,007	0,017	0,005
Средняя высота профиля поверхности, R_z, мкм	0.450	0,059	0,056	0,022	0,059	0,019
Класс шероховатости поверхности	5	7-9	9-10	8-9	8-9	10-11

В течение первого часа происходит увеличение толщины пленки с 0 до 0,367 мкм. В последующие 0,5 часа преобладает процесс разрушения пленки – толщина уменьшается с 0,367 до 0,291 мкм. Затем толщина пленки увеличивается с 0,291 до 0,367 мкм (рисунок 6).

С целью оценки антифрикционных свойств углеродного покрытия измерялись момент силы трения в узле трения ролик-ролик и изменение температуры нижнего ролика.

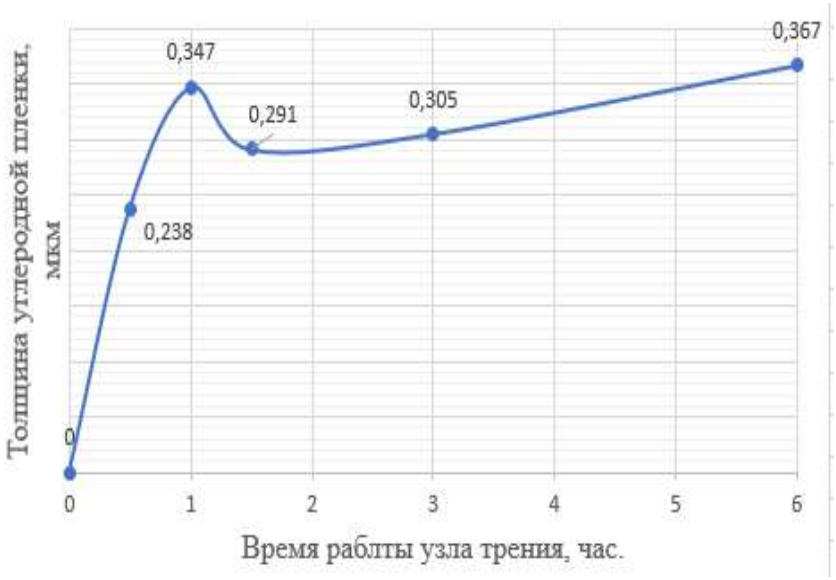


Рисунок 6 - Изменение толщины углеродной пленки от времени работы узла трения.

Момент силы трения возрастает в течении начальных 90 мин работы узла трения от 5,4 до 5,8 (Нм), затем постепенно уменьшается до 4,9 (рисунок 7).

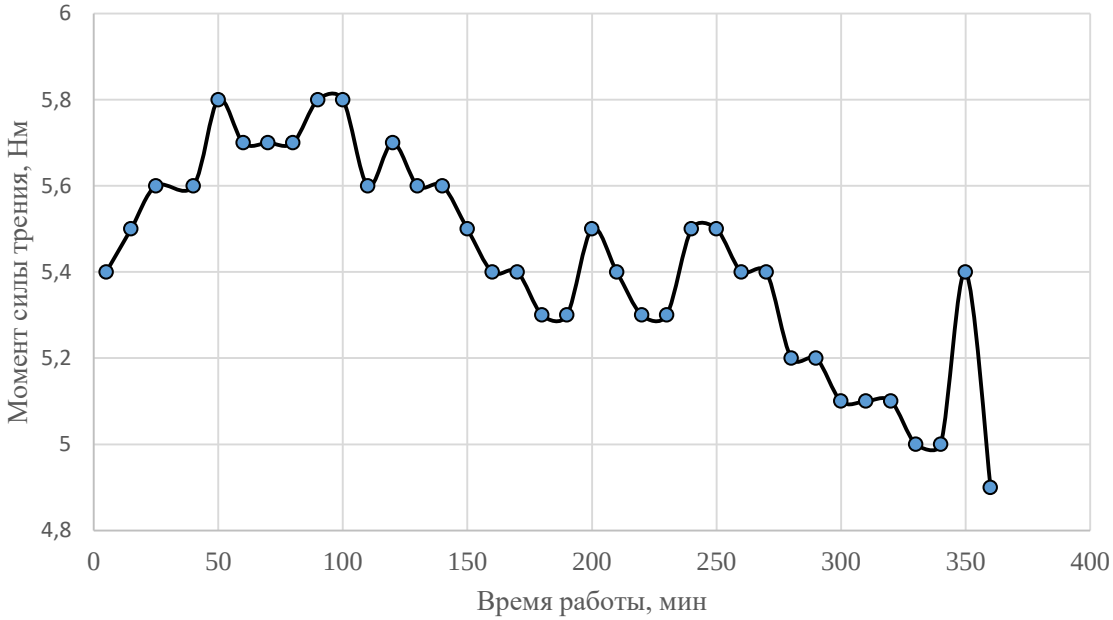


Рисунок 7 - Изменение момента силы трения от времени работы узла трения в течение 360 мин

Во время всего периода работы узла трения наблюдаются скачки величины момента трения. Интерпретация данного эффекта связана с природой действующей силы трения. Зачастую дифференциация трения скольжения и качения производится ассоциативно в зависимости от типа механизма [7]. Тем не менее, базовым представляется подход, изложенный в [8] и связанный с тем, что, в случае трения качения, «при достаточно протяжённых размерах площадки касания в зоне контакта возникает проскальзывание, приводящее к трению скольжения, так как, согласно Рейнольд-

су, материал катящегося тела в зоне касания сжат, а материал основания растянут». В отношении пары «ролик-ролик» следует, очевидно, различать две ситуации. В одной из них имеются ведущий и ведомый ролики, приводящие к возникновению трения качения. В рассмотренной в настоящей работе, равно как в [7] – имеет место притирание поверхностей в зоне контакта при фиксированных различающихся угловых скоростях роликов, что, несмотря на постоянное изменение точек тела, контактирующих с опорой [9], фактически представляет собой скольжение в зоне контакта с полным отсутствием компоненты качения в имеющем место трении. Таким образом, возникновение скачков момента силы трения следует связывать с флуктуационными эффектами при протекании сопутствующих друг другу процессов образования и разрушения углеродной пленки. Возможно, это связано с проскальзыванием роликов относительно друг друга или с протеканием одновременно процессов образования и разрушения углеродной пленки.

В течение первых 1,5 часов температура ролика возрастает с 26^0С до 55^0С, и затем температура ролика не изменяется и составляет около 50^0С (рисунок 8).

Рисунок 8 - Изменение температуры нижнего ролика от времени работы узла трения.

Результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Определение коэффициента трения при контакте шарик-цилиндр

№ п/п	Контактирующие поверхности трения	Коэффициент трения
1	Сталь ШХ-15	0,288
2	Антифрикционная пленка (углеродное покрытие)	0,197
3	Сталь ШХ-15 + Литол24	0,197
4	Антифрикционная пленка+ Литол24	0,141
5	ШХ-15 + Литол24 + 0,2% графена	0,113
6	Антифрикционная пленка + Литол24 + 0,2% графена	0,060

Таким образом, углеродная пленка уменьшает коэффициент трения примерно в 3 раза (с 0,197 до 0,060).

Заключение. Процесс образования углеродной пленки на поверхности узла трения носит периодический характер. Наиболее вероятно, одновременно протекают два процесса: процесс образования углеродной пленки и процесс ее разрушения.

Формирование углеродной пленки протекает в две стадии. На первой стадии углеродная фаза заполняет микро- впадины (на рисунке 1 б эти зоны намного темнее, чем остальная пленка), поскольку именно на поверхностях микро- впадин максимальная удельная поверхность, следовательно, максимальная удельная поверхностная энергия. После заполнения микро- впадин, начинается формирование пленки на всей поверхности трения.

Уменьшение шероховатости поверхностей узла трения в результате образования углеродной пленки приводит к следующим результатам:

1. Уменьшается коэффициент трения приблизительно в 2 раза (это подтверждается уменьшением момента силы трения и понижением температуры нижнего ролика).

2. Происходит уменьшение маслоемкости шероховатой поверхности, что снижает толщину смазочной пленки.

Список литературы

1. Левченко В. А., Буяновский И.А., Большаков А. Н., Матвеенко В. Н. Зеленая трибология: ориентационные свойства углеродных алмазоподобных покрытий трибологических узлов в смазочных средах //Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. Вып. 12. – С. 1499-1513.

2. Жорник В.И., Ивахник А.В., Ивахник В.П., Бухтилова М.А. Химический принцип модифицирования пластичных смазочных материалов наноразмерными добавками// Актуальные вопросы машиноведения. 2014. Т. 3. С. 282-284.

3. Сафонов В.В., Азаров А.С. Трибологические свойства модификаций пластичных смазок// Мехатроника, автоматика и робототехника. 2019. №4. С. 39-41.

4. Padgurskas J., et al. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles // Tribology International - 2013, vol.60, №4б, p.224 – 232.

5. Hainsworth S.V., Uhure N.J. Dimond – like Carbon Coating for Tribology: Production Techniques // International Materials Reviews. – 2007. – Vol.52, №3б, P. 153-174.

6. Нагдаев В.К., Вязинкин В.С., Забродская А.В., Остриков В.В., Сафонов В.В., Першин В.Ф. Результаты исследования смазки модифицированной многослойным графеном //Наука в центральной России. – 2021. - №2 (50). – С. 71 -77.

7. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. С. 245-309

8. Физическая энциклопедия. Т. 5. Под ред. А.М. Прохорова. М.: Большая Российская Энциклопедия, 1998. С. 165

9. Иванов А.П. О трении качения. ДАН. 2019. Т. 485. №3. С. 295-299.

References

1. Levchenko V. A., Buyanovskiy I.A., Bol'shakov A. N., Matveyenko V. N. Zelenaya tribologiya: oriyentatsionnyye svoystva uglerodnykh almazopodobnykh pokrytiy tribologicheskikh uzlov v smazochnykh sredakh //Zhurnal prikladnoy khimii. 2019. T. 92. Vyp. 12. – S. 1499-1513.

2. Zhornik V.I., Ivakhnik A.V., Ivakhnik V.P., Bukhtilova M.A. Khimicheskiy printsip modifitsirovaniya plastichnykh smazochnykh materialov nanorazmernymi dobavkami// Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya. 2014. T. 3. S. 282-284.

3. Safonov V.V., Azarov A.S. Tribologicheskiye svoystva modifikatsiy plastichnykh smazok// Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika. 2019. №4. S. 39-41.

4. Padgurskas J., et al. Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles // Tribology International - 2013, vol.60, №4b, r.224 – 232.

5. Hainsworth S.V., Uhure N.J. Dimond – like Carbon Coating for Tribology: Production Techniques // International Materials Reviews. – 2007. – Vol.52, №3b, P. 153-174.

6. Nagdayev V.K., Vyazinkin V.S., Zabrodskaya A.V., Ostrikov V.V., Safonov V.V., Pershin V.F. Rezul'taty issledovaniya smazki modifitsirovannoy mnogosloynym grafenom //Nauka v tsentral'noy Rossii. – 2021. - №2 (50). – S. 71 -77.

7. Goryacheva I.G. Mekhanika friktsionnogo vzaimodeystviya. M.: Nauka, 2001. S. 245-309

8. Fizicheskaya entsiklopediya. T. 5. Pod red. A.M. Prokhorova. M.: Bol'shaya Rossiyskaya Entsiklopediya, 1998. S. 165

9. Ivanov A.P. O trenii kacheniya. DAN. 2019. T. 485. №3. S. 295-299.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Нагдаев Владимир Константинович – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Першин Владимир Федорович - доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: pershin.home@mail.ru

Вигдорович Михаэль – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, профессор ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, директор Angara GmbH, Германия, г. Дюссельдорф, e-mail: mv016@yahoo.com.

Остриков Валерий Васильевич –доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», профессор кафедры «Стандартизации, метрологии и технического сервиса ФГБОУ ВО «Мичуринский ГАУ», Россия, г. Тамбов, e -mail: viitinlab8@bk.ru

Сафонов Валентин Владимирович - доктор технических наук, профессор кафедры «Техническое обеспечение АПК» ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ имени Н. И. Вавилова», Россия, г. Саратов, e-mail: safonow2010sgau@yandex.ru

Алхило Земан Абуд А.А. – аспирант ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов.

Author credentials
Affiliations

Nagdaev Vladimir – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru.

Pershin Vladimir - Doctor of Technical Sciences, Professor, Tambov State Technical University, Russia, Tambov, e-mail: pershin.home@mail.ru

Vigdorovich Mikhael - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher of the All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Russia, Tambov, Professor of the Tambov State Technical University, Russia, Tambov, director of Angara GmbH, Germany, Dusseldorf, e-mail: mv016@yahoo.com.

Ostrikov Valery - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Professor of the Department of Standardization, Metrology and Technical Service of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Michurinsky GAU", Russia, Tambov, e-mail: viitinlab8@bk.ru

Safonov Valentin - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Technical support of the agro-industrial complex" of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov", Russia, Saratov, e-mail: safonow2010sgau@yandex.ru

Alhilo Zeman Abud – PhD student of Tambov State Technical University, Russia, Tambov

Поступила в редакцию (Received): 10.01.2022 Принята к публикации (Accepted): 22.01.2022

УДК 620.197.7:631.17
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-118-134

ЛАКОКРАСОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ОТ КОРРОЗИИ

[1]Князева Лариса Геннадьевна,
[1]Петрашев Александр Иванович,
[1]Дорохов Андрей Валерьевич,
[1]Курьято Николай Алексеевич,

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

Реферат. *Анализ лакокрасочных материалов для защиты сельскохозяйственной техники показал преимущества грунт-эмалей. Приведены данные о свойствах и применении грунт-эмалей, предлагаемых отечественным рынком. Проведены сравнительные испытания защитных свойств грунт-эмали Полиуретол (УФ) и пентафталевой эмали ПФ-115 на углеродистой стали 0,8кп. Кинематическая вязкость исходного Полиуретола (УФ при температуре 23 °С составила 413 мм²/с для основного компонента и 357 мм²/с для отвердителя. Было определено, что при нанесении Полиуретола длительность формирования покрытия до степени высыхания 1 «от пыли» составила: с применением отвердителя – 2 ч 40 мин, без отвердителя – 3 ч. Сравнивали толщину образующихся покрытий из Полиуретола (УФ) и ПФ-115 при нанесении их пневмораспылением. Получили, что покрытие из Полиуретола имеет толщину в.1,8 раз более высокую, чем ПФ-115 при нанесении в 2 слоя и в 2,4 раза более высокую при нанесении в один слой. Изучено влияние концентрированных растворов минеральных удобрений на коррозию стальных пластин. Из внешнего вида образцов после испытаний и данных гравиметрических исследований установлено, что коррозионные разрушения на стали сильно зависят от природы минеральных удобрений. Наименьшее воздействие на стальные образцы оказывали концентрированные растворы диаммофоски, суперфосфата и карбамида. Установлено превосходство покрытий из Полиуретола над покрытиями из ПФ-115 по защитной способности при длительном воздействии растворов минеральных удобрений: карбамида, хлористого калия, аммиачной селитры, борофоски, диаммофоски, нитрофоски,суперфосфата. ЛКП из Полиуретола выдержали испытание практически без коррозионных разрушений. Покрытия из ПФ-115 оказались относительно устойчивыми только к действию карбамида.*

Ключевые слова*: сельскохозяйственная техника, грунт-эмаль, Полиуретол, сталь, защита, минеральные удобрения.*

PAINT COATINGS FOR AGRICULTURAL PROTECTION TECHNIQUES FROM CORROSION

[1]Knyazeva Larisa
[1]Petrashev Alexander
[1]Dorokhov Andrey
[1]Kuryato Nikolai
[1]Klepikov Viktor
[1]FGBNU "All-Russian Research Institute for the Use of Technology and Oil Products in Agriculture"

Abstract*. The analysis of paints and varnishes for the protection of agricultural machinery showed the advantages of primer enamels. Data on the properties and application of primer-enamels offered by the domestic market are given. Comparative tests of the primer-enamel Polyuretol (UV) and pentaphthalic enamel PF-115 on carbon steel 0.8kp were carried out. The kinematic viscosity of the original Polyurethol (UV at 23°C was 413 mm2/s for the main component and 357 mm2/s for the hardener. It was determined that when applying Polyurethol, the duration of coating formation to the degree of drying 1 "from dust" was: with the use of a hardener - 2 hours 40 minutes, without a hardener - 3 hours. Comparing the thickness of the resulting coatings from Polyurethol (UV) and PF-115 when applied by pneumatic spraying, it was obtained that the coating of Polyurethol has a thickness 1.8 times higher than PF-115 when applied in 2 layers and 2.4 times higher when applied in one layer. The influence of concentrated solutions of mineral fertilizers on the corrosion of steel plates has been studied. From the appearance of the samples after testing and the data of gravimetric studies, it was found that corrosion damage on steel strongly depends on the nature of mineral fertilizers. Concentrated solutions of diammophoska, superphosphate and urea had the least effect on steel samples. The superiority of coatings from Polyurethol over coatings from PF-115 in terms of protective ability during prolonged exposure to solutions of mineral fertilizers: carbamide, potassium chloride, ammonium nitrate, borofoska, diammofoska, nitrophoska,*

superphosphate was established. Paintwork made of Polyurethol withstood the test with virtually no corrosion damage. Coatings from PF-115 turned out to be relatively resistant only to the action of urea.

Keywords: *agricultural machinery, primer-enamel, Polyurethol, steel, protection, mineral fertilizers.*

Введение. Сельскохозяйственная техника и оборудование в период неиспользования подвергаются интенсивным коррозионным разрушениям. Существует широкая номенклатура различных консервационных материалов, чтобы замедлить эти процессы: пластичные смазки, консервационные масла, защитные восковые дисперсии, пленкообразующие ингибированные нефтяные составы, бензино-битумные составы, маслорастворимые ингибиторы и противокоррозионные присадки [1-13]. Но традиционно используют для этих целей и лакокрасочные материалы (ЛКМ) [14-16]., причем они должны удовлетворять требованиям, связанным с условиями эксплуатации сельскохозяйственной техники и оборудования: повышенной стойкостью к действию ультрафиолета; эластичностью; высокой твердостью, прочностью к удару; возможностью нанесения различными способами, включая ручную окраску; иметь различные температурные интервалы сушки; хорошими антикоррозионными свойствами, в том числе, и в агрессивных средах сельскохозяйственного производства. В Российской Федерации доля затрат на защиту от коррозии с применением лакокрасочных покрытий (ЛКП) составляет 39,5 % [14].

Одним из основных компонентов ЛКМ являются связующие пленкообразующие вещества (рисунок 1). К природным пленкообразующим веществам относятся растительные масла и продукты их переработки, смолы (канифоль, шеллак, копалы). Среди синтетических пленкообразователей чаще всего используются поликонденсационные смолы: алкидные, амино- и фенолформальдегидные, эпоксидные, полиуретановые, кремнийорганические. По ГОСТ 9825-73 [17] марка ЛКМ должна указывать на химическую природу пленкообразователя и его назначение, например, эпоксидные – ЭП; полиуретановые – УР; акриловые – АК; кремнийорганические – КО; полиамидные – АД, пентафталевые -ПФ. Внутри перечисленных групп ЛКМ классифицируют по преимущественному назначению материала: атмосферостойкие – 1; водостойкие – 4; химически стойкие – 7; грунтовки – 0. Например, эмаль ПФ -115 – эмаль пентафталевая, атмосферостойкая с регистрационным номером 15.

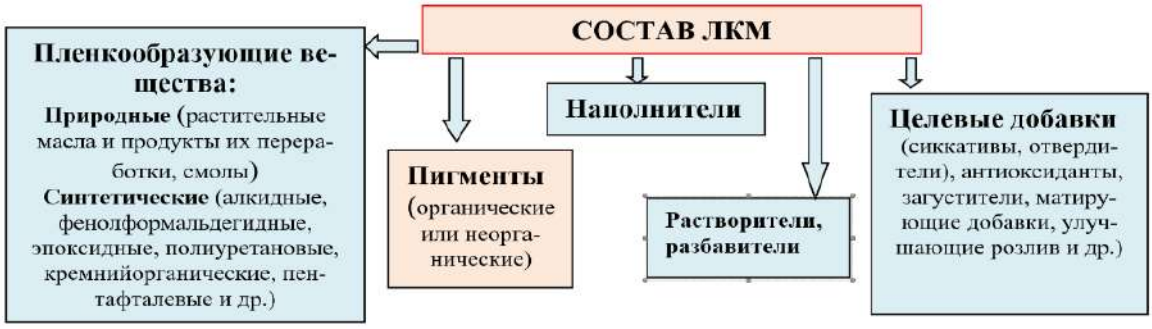


Рисунок 1 – Состав ЛКМ

Технологический процесс окраски достаточно прост и включает в себя подготовку поверхности (удаление окалины и ржавчины, обезжиривание) и нанесение ЛКМ. Обычно получают многослойные ЛКП, состоящие из грунтовочных, промежуточных и покрывных слоев (рисунок 2).

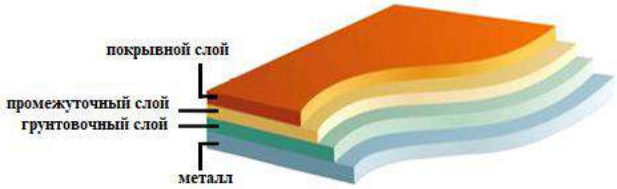


Рисунок 2 – Строение многослойного ЛКП

В «системе ЛКП», каждый слой выполняет определенную функцию. Грунтовочный слой после высыхания представляет собой однородную пленку с хорошей адгезией к окрашиваемой поверхности. Промежуточный слой обеспечивает качественную поверхность под окончательную окраску, высокую адгезию как к эмали или краске, так и к противокоррозионной грунтовке. Покровной слой придает системе ЛКП декоративные и защитные свойства.

Марочный ассортимент современных лакокрасочных материалов (ЛКМ) велик, в настоящее время насчитывает более 2500 наименований, что, с одной стороны, расширяет возможности обеспечения заданных свойств покрытий, а с другой стороны, затрудняет их выбор и эффективное применение. К наиболее распространенным ЛКМ относятся лаки, краски, эмали, грунтовки, грунт-эмали (рисунок 3) [14-16].

Первые четыре предназначены для подготовки поверхности и повышения адгезии при окрашивании. Эмаль отличается от краски тем, что в нее добавлен лак, поэтому она образует блестящую плёнку, повышающую стойкость покрытия. Грунтовки, определяющие характер взаимодействия покрытия с поверхностью металла, представляют собой суспензии пигментов (преимущественно антикоррозионных) с наполнителями в пленкообразователях и после высыхания должны образовывать однородные пленки с хорошей адгезией с подложкой и покрывными слоями.

Грунт-эмали являются универсальными смесями, в их состав входят антикоррозионные пигменты и наполнители, выполняющие функции выравнивания поверхности, финишного покрытия и защиты от ржавчины. Грунт-эмали относят к мультифункциональным материалам «3-в-1», соединяющим в себе свойства модификатора ржавчины, антикоррозионного покрытия и пигментированной краски [15, 16,18-20]. Применение грунт-эмали позволяет получить декоративное покрытие без предварительного грунтования на чистом или повреждённом ржавчиной участке металла. Грунт-эмали создают защиту от атмосферной коррозии.

В соответствии с ГОСТ 6572-91 [21] «Покрытия лакокрасочные тракторов и сельскохозяйственных машин» для окраски сельскохозяйственных машин рекомендуется использовать эмали: алкидно-акриловые (АС-182 (ГОСТ 19024-79)), пентафталевые (ПФ-133, ПФ-188, ПФ-115), этрифталевые (ЭТ-199), бензостойкие (МЛ-629, МЛ-152), перхлорвиниловые (ХВ-1100), сополимерно-винилхлоридные (ХС-76, ХС-436, ХС-710), а также лаки (ХВ-784) и грунтовки ГФ-017, ГФ-0119, ФЛ-03К, ФЛ-О3Ж. Из грунт-эмалей упомянута, например АС-1247.

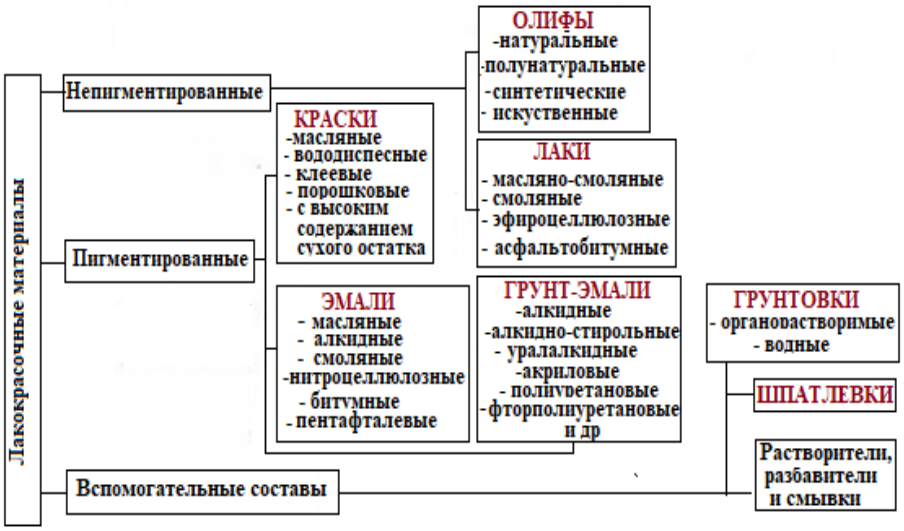


Рисунок 3 - Классификация ЛКМ

Сегодня отечественный рынок грунт-эмалей широк, но только немногие из них разработчики рекомендуют специально для применения в качестве защиты для сельскохозяйственной техники и оборудования. В таблице 1 приведены данные о некоторых из распространенных сегодня грунт-эмалях.

Таблица 1 - Свойства и применение грунт-эмалей

Производитель	Грунт-эмаль	Свойства	Применение
АО Пигмент. г. Тамбов	Грунт – Эмаль “ГРЭМИКОР” АУ	Образует гладкое (полуматовое, полуглянцевое) атмосферостойкое покрытие, устойчивое к временным обливам слабых растворов кислот, щелочей и бензинам.	Для защиты металлических поверхностей *сельхозтехники*, железнодорожного транспорта, надводной части судов и судовых надстроек, а также для защиты металлических поверхностей эксплуатирующихся в атмосферных условиях
ПО «ХИМТЭК». Г. Ярославль	АС-1214 (двухкомпонентная акриловая с изоцианатным отвердителем)	Гладкая, однородная, полуматовая или полуглянцевая поверхность без дефектов. Физико-механические свойства: высоковязкая; адгезия – 1 балл, высокая твердость и прочность при ударе при высокой эластичности, высокая стойкость к воздействию воды, бензина, индустриального масла, дизельного топлива. Сохраняет защитные свойства в течение 10 лет.	Для окраски *сельхозтехники*. Наносится в два слоя на предварительно загрунтованную и подготовленную поверхность методами пневматического или безвоздушного распыления. Время высыхания грунт-эмали до степени 3 при температуре 20°С – 10 часов; при температуре 60°С – 1 час, при 80°С – 30 мин. Гарантийный срок хранения грунт-эмали – 6 месяцев с даты изготовления.
Компания «Ярославские краски»	«Спецназ» 3 в 1	С высокой устойчивостью к агрессивной среде при нанесении на ржавый металл при температуре от -10 до +40 °С. Содержит преобразователь ржавчины.	Для окрашивания сооружений со сложным строением, для покраски деталей легковых машин (днища и крыльев).
ОАО «Русские краски» Ярославль	- Продекор; - VIKA; - Спецназ 3 в 1; - по ржавчине	Толщина 1 слоя 80-100 мкм	Как самостоятельное покрытие для окрашивания, в том числе ремонтного, металлических поверхностей.
Завод спецэмалей «Эклир», Челябинск	АС-1247	Покрытие глянцевое, гладкое, обладает отличными физико-механическими свойствами – создает прочное сцепление с окрашиваемой поверхностью, образует эластичное, твердое покрытие, устойчивое к действию воды, масел и кратковременным обливам нефтепродуктами.	Для окраски сельскохозяйственной техники, оборудования и других металлических изделий.
	Быстро сохнущая БС-130 (ТУ 20.30.12-003-45629149-2017		Для защиты от коррозии металлических конструкций промышленного назначения, эксплуатируемых в атмосферных условиях различных климатических зон и внутри помещений.
	AMETCOR ТУ 20.30.12-003-45629149-2017		

Котовская лакокрасочная компания ЛКЗ «Колорит», Новосибирск ООО «ЯЗЛМ», Ярославль	ХВ-0278 (ТУ 2313-078-68124156-2012)	Суспензия пигментов и наполнителей в растворе перхлорвиниловой и алкидной смол в органических растворителях с введением модификатора ржавчины и других модифицирующих добавок. Время высыхания до степени 3 при температуре (20+-2)°С, час, не более 1часа. Твердость пленки, не менее, по маятниковому прибору типа ТМЛ-2124, 0,15 отн. единиц. Эластичность покрытия при изгибе не более 1мм. Адгезия пленки не более 2 баллов. Стойкость покрытия к воздействию 3% раствора NaCl, воды не менее 72 ч. Коэффициент эффективности преобразования ржавчины, не менее 0,70	Для окраски стальных и чугунных поверхностей с остатками окалины и плотно держащейся ржавчины (толщина слоя продуктов коррозии до 70 мкм), подвергающихся воздействию промышленной атмосферы, содержащей агрессивные газы и пары, а также воздействию солей и других химических реагентов, имеющих температуру не выше 60^0С, в качестве самостоятельного покрытия и в комплексном многослойном покрытии с атмосферостойкими эмалями и лаками типа ХС, ХВ, НЦ, ПФ, ЭП. Теоретический расход на однослойное покрытие 150 – 200г/м^2
ООО «Новбытхим» (Санкт-Петербург)	Пассивирующая 3:1	Матовая быстросохнущая, образует атмосферостойкое и водостойкое долговечное покрытие.	Для окрашивания нетронутых и повреждённых ржавчиной металлических поверхностей крупных изделий. Наносится на металл, покрытый легкой ржавчиной.
ООО «Калужский Лакокрасочный Завод»	Преобразующая эмаль-грунт 3:1	Свойства эмали, преобразователя ржавчины и грунтовки	Для долгосрочной защиты в условиях умеренного климата
Новосибирская фирма «ЛКМ технологии»	Пентал -Амор 2:1	Свойства эмали и противокоррозионной грунтовки	Для металлических поверхностей внутри и снаружи помещений.
	Корроед	Преобразующая	Для ремонтной покраски различных объектов (мостовых пролётов, ангаров, опор ЛЭП), изделий со сложным строением.
ФКП «Пермский пороховой завод»	Акромет	Термостойкая, хорошо сцепляется с обрабатываемым материалом	Для надёжной защиты металлоконструкций от внешних природных влияний.
ЗАО «Альп Эмаль» (Москва)	Северон	Быстросохнущая, атмосферостойкая и химически устойчивая грунт-эмаль	Для использования в районах с жёстким климатом и неустойчивой погодой.
ООО «Ханвал Рус»	Акриловая эмаль GTGEA	Время высыхания эмали до степени 1 -20 мин. Эластичность пленки при изгибе, не более 1 мм. Твердость покрытия по маятнику 0,2 отн.ед.	Для покрытия порогов автомобиля
ООО «Краски для всех»	Акриловая АК-142	Укрывистость пленки 50 г/м^2. Условная светостойкость покрытия, не менее 4 ч	
ООО «Экопол»	AS-60	Время высыхания до степени 3 – 29 мин.	
ЭКОДОМ	Экодом по ржавчине 3 в 1	Время высыхания одного слоя: на отлип – 1 час, до полного – 24 часа.	Для окраски по новым и ранее окрашенным стальным и чугунным поверхностям.
ООО Научно-производственное предприятие РОГНЕДА	- Экодом по ржавчине 3 в 1; - Экодом по металлу 3 в 1; - пентафталевая антикоррозионная (по ржавчине 3 в		

	1); - DALI (по ржавчине 3 в 1)		
ООО НПП РОГНЕДА ООО «ЛКМ технологии»	ХВ-0278	Влаго-, масло-, бензо-, износостойкость. Стойкость к минеральным удобрениям и моющим средствам. Условная вязкость при (20,0±0,5)°С по вискозиметру ВЗ-4 – не менее 20 с. Время высыхания до степени 3 при (20±2)°С - не более 1 часа	Для окраски стальных и чугунных поверхностей с остатками окалины и плотно держащейся ржавчины (до 70 мкм), подвергающихся воздействию атмосферы, содержащей агрессивные газы и пары. Окраска производится при температуре от -10°С до + 35 °С (при распылении) и от – 10°С до +25 °С (при ручном нанесении) и относительной влажности воздуха не выше 80%.
ООО ВИТ завод	- по ржавчине 3 в 1; - по ржавчине 4 в 1		Для окраски металлических поверхностей, покрытых легкой ржавчиной
Федеральное казенное предприятие Пермский пороховой завод; ООО ТКП «Пентан»	Акромет	Обеспечивает длительную защиту поверхности от атмосферных воздействий (влажности, ультрафиолетового облучения). Совместима с акриловыми, алкидными, нитроцеллюлозными, меламинными, каучуковыми, поливинилхлоридными, перхлорвиниловыми и другими эмалями (в соответствии с ГОСТ 9.401). Высыхание однослойного покрытия при температуре плюс (20±2)°С не более 1 часа. Расход грунт-эмали от 80 до 250 г/м² на однослойное покрытие	Для окрашивания поверхностей из углеродистой и нержавеющей стали, алюминиевой, оцинкованной, бетонной поверхности, не требует предварительного грунтования.
НПФ «Эмаль» Чувашия	Цинконаполненная «ЦИНКOFULL»	Покрытие гладкое, матовое, эластичность при изгибе - не более 1мм. Прочность при ударе на приборе У-1А – не менее 50 см Предотвращает возникновение подпленочной коррозии.	Для антикоррозионной защиты изделий и сооружений из стали и цветных металлов, эксплуатируемых в атмосферных условиях всех макроклиматических районов, типов и категорий размещения.
Hammer	по ржавчине	Однокомпонентная, быстросохнущая	Для внутренних и наружных работ при защите металлической поверхности
Престиж	Алкидная 3 в 1	Однокомпонентная, быстросохнущая, долговечная, морозостойкая	
ООО «НПО Краско»	«Быстромет»	Однокомпонентная, ингибирующая, ударопрочная полуматовая	
Hammerite (Англия – Польша)	по ржавчине	Густая и быстросохнущая, образует плотную атмосферостойкую пленку	Заявленный срок службы покрытия до 10 лет.
Olecolor	по ржавчине 3 в 1		Для преобразования ржавчины, грунтования и окраски чистых и прокорродированных металлических поверхностей внутри и снаружи помещений.
НПКФ «КОЛОРИТ»,	Быстросохнущая антикоррозионная ПФ-1333 3 в 1	На покрытие без вреда для качественных характеристик могут воздействовать нефти, технические масла, этиловый спирт и дизельное топливо, морская и пресная вода, бензин и слабые	Для покрытия элементов промышленного оборудования, строительных конструкций, ворот, ангаров.

		кислоты	
	Алкидно-уретановая АУ-1518	Сохраняет защитно-декоративные свойства в условиях открытой промышленной атмосферы умеренного и холодного климатов в течении 8 лет. Блеск, %, не менее: 45;твердость пленки по ТМЛ 2124 не менее 0,2 отн.ед.; Адгезия не более 1 балла; Прочность пленки при ударе по прибору У-1А не менее 50 см; Эластичность пленки при изгибе, 1 мм; Стойкость при температуре (20±2)°С к статическому воздействию не менее: воды — 48 ч; трансформаторного масла — 24 ч	Для самостоятельной защиты прокорродировавших и чистых металлических, бетонных и железобетонных поверхностей. Теоретический расход: 90-150 г/м^2 на 1 слой
ЗАО Научно-производственный холдинг ВМП производственное предприятие	ИЗОЛЭП-mastic	Продолжительный срок хранения и возможность нанесения при минусовой температуре и влажности до 85 %	Как самостоятельное покрытие или грунтовочный слой для защиты металлических конструкций, сооружений и зданий в АПК, в том числе с режимом влажной дезинфекции
	ПОЛИТОН-ZP ТУ 20.30.12-111-12288779-2017	Теоретический расход составляет 110-265 г/м^2 на 1 слой. Окраску производить при температуре от -10 °С до +40 °С и влажности воздуха не более 85%. Время высыхания до степени 3 не более 1,5 часа при (20±2)°С. Последующие слои наносить не менее чем через 4 часа при (20±2)ºС	Как самостоятельное покрытие для защиты в слабо- и среднеагрессивных средах. В качестве финишного слоя в комплексных системах защиты от коррозии по грунтовкам на эпоксидной и полиуретановой основах и для проведения локальных ремонтных работ покрытий на основе эпоксидных и полиуретановых грунтовок и эмалей.
Текс (Россия)	РжавоStop 3 в 1	Высокая адгезия к цветным металлам (цинк, медь). Долговечность – до 8 лет. Может наноситься на остатки ЛКМ.	Для окраски металлических поверхностей с плотной ржавчиной. Подходит для оцинкованных и алюминиевых поверхностей.
ООО «ЛКМ технологии» ООО Завод «Краски КВИЛ», г. Белгород	Полиуретановая УР-2К ИП (торговая марка HardMax)	Продолжительный срок службы внутри различных климатических зон. Обладает исключительной износостойкостью и сопротивляемостью механическим нагрузкам; хорошей устойчивостью к воздействию пресной и морской воды, кислотных, щелочных и других моющих растворов, бензину, дизельному топливу, нефти, индустриальным маслам. Не требует предварительного грунтования.	Для противокоррозионной защиты *сельскохозяйственной техники*
ООО Завод «Краски КВИЛ», г. Белгород	УР-2К PRO 224	Высокие адгезия, антикоррозионные свойства, механическая прочность. ЛКП стойко к воздействию воды, растворов кислот и щелочей, светлых и темных нефтепродуктов, факторов морской, городской и промышленной атмосферы, к изменению	Для окраски надводных частей судов, мостовых конструкций, *сельскохозяйственных* и строительных машин, стальных конструкций, металлических элементов, где требуется высокая устойчивость к механическим, химическим факторам, а также к воздействию агрессивной

		температуры окружающего воздуха от минус 60 до 60°С.	промышленной атмосферы.
	Быстродействующая Экспресс PRO 121	Прочное антикоррозионное покрытие с хорошей адгезионной прочностью, высокой твердостью и износостойкостью, устойчивое к кратковременному воздействию пресной и морской воды, дизельного топлива и индустриального масла, имеющее хороший декоративный вид. Устойчиво к изменению температуры окружающего воздуха от минус 60°С до 60°С.	Защитно-декоративное окрашивание *сельскохозяйственной*, коммунально-бытовой и дорожно-строительной техники, технологического оборудования, наружных поверхностей емкостей для индустриальных масел, гаражей, кованых металлических изделий, строительных металлоконструкций.
	HARDMAX PUR 223 (с отвердителем на основе алифатического изоцианата)	Продолжительный срок службы, исключительная износостойкость и устойчивость к механическим нагрузкам, к воздействию пресной и морской воды, бензину, дизельному топливу, индустриальным маслам. Легко наносится на большие поверхности, обладает превосходным розливом.	Для окраски *сельскохозяйственных* и строительных машин, стальных конструкций, металлических элементов
	HARDMAX EPO 225	Высокая твердость, хорошая адгезионная прочность, антикоррозионная стойкость, устойчивость к воздействию пресной и морской воды, растворов кислот, щелочей, спиртов, светлых и темных нефтепродуктов. ЛКП устойчиво к изменению температуры от минус 60 °С до 120°С	Для антикоррозионной защиты внутренней поверхности стальных резервуаров и трубопроводов для хранения и транспортировки сырой и товарной нефти, темных и светлых нефтепродуктов. Покрытие устойчиво к морской, пресной и «подтоварной» воде. Толщина однослойного нанесения до 300 мкм сухой пленки.
ООО «НПО Крас-Ко»	Полиуретол (УФ) (3 в 1) с изоцианатным отвердителем «прямо на ржавчину»	Химически и влагостойкое покрытие с высокими прочностью и износостойкостью в широком интервале температур, с эффектом «микро-титан». Устойчиво к длительному воздействию нефтепродуктов, масел, бензина, растворам кислот, щелочей, солей, УФ-излучения. Сохраняет свои защитно-декоративные свойства, при условии соблюдения технологии нанесения, в условиях умеренного и холодного климата – более 15 лет, в условиях тропического и морского климата – 8 лет.	Для длительной защиты *сельхозмашин*, транспорта. Рекомендуется к применению в условиях агрессивных атмосфер, в морском и тропическом климате. Расход 80-110 г/м^2 при толщине одного слоя 25-35 мкм, рекомендуется 2 слоя. Наносят в два слоя при температуре не ниже +5 °С с временем высыхания каждого слоя при (20±2) °С – не более 1 часа. Повторное окрашивание допускается через 4 часа. Жизнеспособность грунт-эмали в смешанном состоянии при (20±2) °С не более 1 часа, при (60±2) °С не более 30 минут. Окончательная полимеризация покрытия проходит в течение 5-7 дней.

Следует отметить, что рекомендаций разработчиков не всегда достаточно для выбора грунт-эмалей для защиты сельскохозяйственной техники, работающей в конкретных сельскохозяйственных средах. Если посмотреть на приведенные выше данные (таблица 1), то выбрать грунт-эмаль для защиты сельскохозяйственной техники, работающей в присутствии минеральных удобрений по данным, предлагаемым разработчиками, не представляется возможным. Необходимо изучать защитную эффективность конкретных ЛКМ в конкретных условиях, подобные исследования всегда актуальны. В данной работе проводятся сравнительные исследования защитной эффективно-

сти пентафталевой эмали ПФ-115, рекомендуемой для защиты сельскохозяйственной техники в ГОСТ 6572-91 и грунт-эмали Полиуретол (УФ), предлагаемой сегодня отечественным рынком, на углеродистой стали 0,8кп.

Объекты и методика исследования. Объекты исследования: грунт-эмаль Полиуретол (УФ) (таблица 1) и пентафталевая эмаль ПФ-115.

По заявлению разработчика ПФ-115 обладает хорошей адгезией практически ко всем конструкционным материалам, проста в применении, водостойка, не боится ультрафиолета, довольно эластична. Представляет собой суспензию, взвесь частиц, представленных растворителями, красителями, пигментами, сиккативом, двуокисью титана и другими наполнителями в жидкой среде. В основе эмали вязкий пентафталевый лак, который растворяется уайт-спиритом или другими органическими жидкостями. Окрашивание металлов производят эмалью только после грунтовки составами ГФ 0119, ВЛ 05, ГФ 021 или их аналогами. Окрашивали сталь эмалью ПФ 115 в два слоя.

Кинематическую вязкость ЛКМ определяли с помощью вискозиметра типа ВПЖ. Длительность формирования ЛКП определяли по ГОСТ 19007-73. Толщину покрытия определяли гравиметрически [22]. Исследовали защитную эффективность покрытий Полиуретола (УФ) и ПФ-115 на стали 0,8кп в концентрированных растворах минеральных удобрений: борофоске, аммиачной селитре, хлористом калии, суперфосфате, диаммофоске, карбамиде, нитрофоске [22].

Результаты и обсуждение. Определили кинематическую вязкость исходного Полиуретола (УФ). При температуре 23 °С он составила 413 мм^2/с для основного компонента и 357 мм^2/с для отвердителя.

Было определено, что при нанесении Полиуретола длительность формирования покрытия до степени высыхания 1 «от пыли» составила: с применением отвердителя – 2 ч 40 мин, без отвердителя – 3 ч.

Сравнивая толщину образующихся покрытий из Полиуретола (УФ) и ПФ-115 при нанесении их пневмораспылением (таблица 2), получили, что в первом случае толщина покрытия выше. Значение толщины покрытия на образце с Полиуретолом, нанесенным в два слоя составляет 157 ± 3 % мкм, в один слой - 72 ± 3% мкм. Значение толщины покрытия на образце с ПФ-115, нанесенного в два слоя, составляет 89±3% мкм, в один слой - 48±3% мкм. Следовательно, толщина двуслойного покрытия из Полиуретола больше в 2,18 раза, из ПФ-115 – в 1,82 раза, чем однослойного. Покрытие из Полиуретола имеет толщину в.1,8 раз более высокую, чем ПФ-115 при нанесении в 2 слоя и в 2,4 раза более высокую при нанесении в один слой, соответственно, расход исходного Полиуретола при любом нанесении окажется выше. Следует отметить, что рекомендуемая толщина ЛКП для сельской местности 120 мкм [45]. Пентафталевые покрытия не удовлетворяют такому условию даже при нанесении в два слоя.

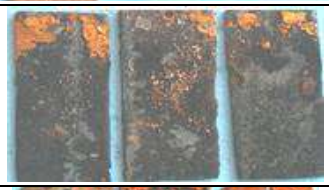
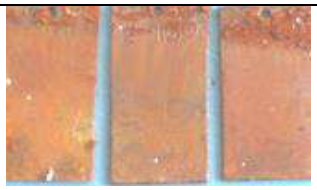
Таблица 2 – Толщина покрытий, полученных путем пневмораспыления

Толщина покрытий, мкм, при использовании различных ЛКМ:			
Полиуретол		ПФ-115	
2 слоя	1 слой	2 слоя	1 слой
127	67	81	35
191	64	95	36
150	64	96	48
163	81	93	47
163	80	91	53
148	78	93	59
154	66	77	56

Изучено влияние концентрированных растворов минеральных удобрений на коррозию стальных пластин. Как следует из внешнего вида образцов после испытаний и данных гравиметрических исследований, коррозионные разрушения на стали сильно зависели от природы минеральных удобрений, (таблица 3). Наименьшее воздействие на стальные образцы оказывали концентрированные растворы диаммофоски, суперфосфата и карбамида.

Наибольшую скорость коррозии наблюдали на стали 0,8 кп, выдержанной в концентрированных растворах аммиачной селитры К = 0,2690 г/м^2·ч, наименьшую - в растворах диаммофоски К = 0,0146 г/м^2·ч.

Таблица 3 – Результаты коррозионных испытаний стали 08кп в концентрированных растворах минеральных удобрений (время – 78 сут.)

№	Наименование удобрения	Внешний вид образцов после испытаний	Потеря массы	Скорость коррозии
			Δm, г/м^2	К, г/м^2·ч
1	Борофоска		105,8	0,0560
2	Аммиачная селитра		504,1	0,2690
3	Калий хлористый		99,6	0,0532
4	Суперфосфат		61,3	0,0327
5	Диаммофоска		27,3	0,0146
6	Карбамид		53,7	0,0287
7	Нитрофоска		124,6	0,0665

Просматривается некоторая связь скорости коррозии с растворимостью удобрений в воде, которая доставляет агрессивные компоненты к поверхности металла. Растворимость при 20 ^{0}С на 100 г воды составляет для диаммофоски 71 г, карбамида - 80 г, суперфосфата - 16 г, а для аммиач-

ной селитры гораздо больше – 215 г. Есть еще один аргумент, объясняющий наибольшую агрессивность аммиачной селитры. В силу химического строения основного вещества (NH_4NO_3), аммиачная селитра вызывает подкисление среды.

В данной работе исследовали длительное воздействие растворов концентрированных минеральных удобрений на покрытия из Полиуретола и эмали ПФ-115, нанесённых на сталь 0,8кп. На рисунке 4 показано изменение вешнего вида этих покрытий после воздействия растворов в течение 84 суток.

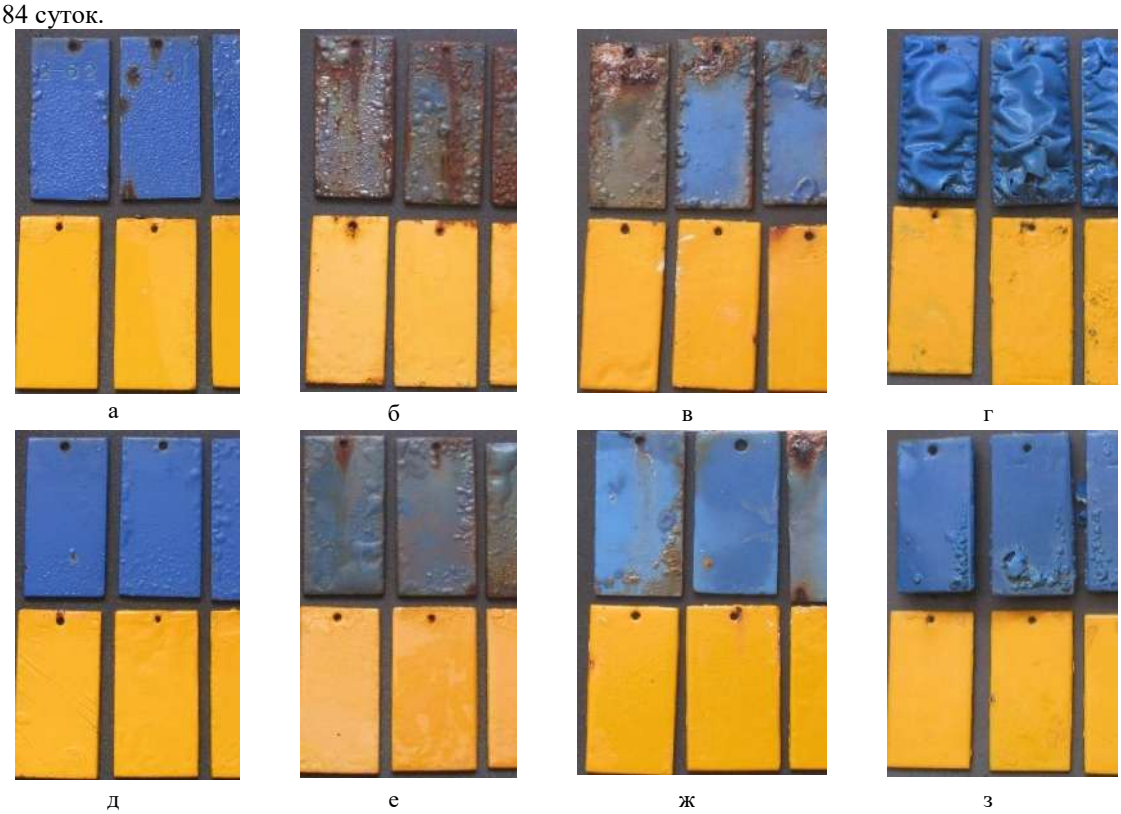


Рисунок 4 – Внешний вид покрытий из ПФ-115 (синие) и Полиуретола (желтые), нанесенных в один (а, б, в, г) и в два (д, е, ж, з) слоя после экспозиции в течении 180 суток в растворах удобрений: карбамида (а, д); аммиачной селитры (б, е); нитрофоски (в, ж); суперфосфата (г, з)

Хорошо заметно превосходство покрытий из Полиуретола над покрытиями из ПФ-115 по защитной способности во всех растворах минеральных удобрений. ЛКП из Полиуретола выдержали испытание практически без коррозионных разрушений. Пентафталевые ЛКП оказались относительно устойчивыми только к действию карбамида, хотя по границам покрытий наблюдали небольшие пузыри. Большие пузыри вплоть до отслаивания покрытий отмечены у ПФ-115 в суперфосфате.

По рисункам 5, 6 можно судить о качестве покрытия из Полиуритола после 6-ти месячных испытаний в концентрированных растворах удобрений.

Покрытия из Полиуретола с отвердителем были менее эластичными, чем покрытия без отвердителя, они крошились ножом при снятии. У покрытий с отвердителем, выдержанных в концентрированном растворе диаммофоски, изменился цвет и отсутствовал блеск. Отмечено хорошее сцепление этого покрытия со сталью 08кп после испытаний в растворах суперфосфата, диаммофоски и нитрофоски. Растворы аммиачной селитры и борофоски существенно ослабили адгезию покрытия с отвердителем к металлу. После воздействия раствора аммиачной селитры, по кромке покрытия появились очаги коррозионных повреждений. В растворах карбамида и хлористого калия адгезия ЛКП из Полиуретола снизилась до удовлетворительной.

Покрытия без отвердителя после испытаний характеризовались большей эластичностью, чем покрытия с отвердителем, но имели слабое сцепление со сталью. Поэтому они отслаивались кусками от пластин после проникновения сквозь них растворов карбамида, хлористого калия, борофоски, диаммофоски и нитрофоски. Отмечена хорошая адгезия неотвержденных покрытий к стальной поверхности в растворах суперфосфата и аммиачной селитры. При воздействии заточенным ножом эти покрытия продемонстрировали высокую адгезию к металлу и прочность.

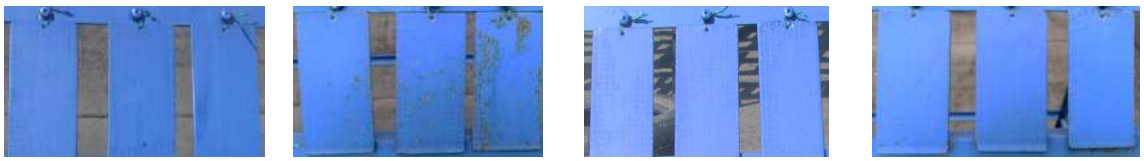
Рисунок 5 – Покрытие из Полиуретола (с отвердителем) после 180 суток экспозиции в концентрированных растворах минеральных удобрений: внешний вид и состояние металла под покрытием

Рисунок 6 – Покрытие из Полиуретола (без отвердителя) после 180 суток экспозиции в концентрированных растворах минеральных удобрений: внешний вид и состояние металла под покрытием

Проведены исследования ЛКП из грунт-эмали Полиуретола и пентафталевой эмали ПФ-115 на атмосферостойкость. Как следует из фотографий, приведенных на рисунке 7, следы коррозионных разрушений на образцах с ЛКП из грунт-эмали Полиуретол не появились. А на образцах, покрытых пентафталевой грунт-эмалью ПФ-115 в один слой, можно видеть следы меления и потери блеска (рисунок 8).

1 слой до испытаний | 1 слой через 205 дней | 2 слоя до испытаний | 2 слоя через 205 дней

Рисунок 7 – Фотографии образцов стали 0,8кп, покрытых грунт-эмалью Полиуретол в один и в два слоя



1 слой до испытаний | 1 слой через 205 дней | 2 слоя до испытаний | 2 слоя через 205 дней

Рисунок 8 – Фотографии образцов стали 0,8кп, покрытых пентафталевой эмалью ПФ-115 в один и в два слоя

Заключение. Таким образом, проведенное исследование атмосферостойкости и защитной способности в растворах минеральных удобрений грунт-эмали Полиуретол (УФ) выявило ее значительное преимущество в сравнении с пентафталевой эмалью ПФ-115, рекомендованной для противокоррозионной защиты сельскохозяйственной техники от воздействия минеральных удобрений.

Список литературы

1. Вигдорович В.И., Насыпайко И.Г., Прохоренков В.Д. Антикоррозионные консервационные материалы. М.: Агропромиздат. - 1987. -128 с.

2. Миронов Е.Б., Косолапов В.В., Тарукин Е.М., Маслов М.М. Оценка консервационных материалов для защиты от коррозии рабочих органов сельскохозяйственной техники//Вестник НГИЭИ. - 2015. - № 8 (51). - С. 48-57.

3. Ostrikov V.V., Sazonov S.N., Vigdorovich V.I., Safonov V.V., Balabanov V.I. Determination of the Composition and Properties of Plastic Lubricants Derived from Used Oils// Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2017. Т. 53. № 2. С. 154-162.

4. Князева Л.Г., Прохоренков В.Д., Остриков В.В., Чернышова И.Ю. Разработка консервационных материалов на основе отработанных масел//Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2002. № 10. С. 38-40.

5. Остриков В.В., Нагорнов С.А., Клейменов О.А., Тупотилов Н.Н., Булавин С.А., Стребков С.В., Прохоренков В.Д., Петрашев А.И., Князева Л.Г. Топливо, смазочные и консервационные материалы//
Учебное пособие для вузов / Белгород, 2008.

6. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Ostrikov V.V., Petrashev A.I.Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion materials//Chemistry and Technology of Fuels and Oils. - 2019. - Т. 55. - № 4. - С. 412-423.

7. Петрашев А.И., Князева Л.Г., Прохоренков В.Д., Клепиков В.В. Технология консервации аграрной техники водно-восковым составом "ГЕРОН"//Наука в центральной России. 2013. № 1. С. 53-56.

8. Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Ивойлов А.А., Еремин В.Н. Консервация сельскохозяйственной техники для внесения минеральных удобрений//Техника в сельском хозяйстве. 2007. № 6. С. 30-32.

9. Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Радченко А.И., Карпова О.И. Противокоррозионные свойства композиций на основе МОБИИН-3 (АКОР-1Б)// Практика противокоррозионной защиты. 2006. № 4 (42). С. 31-38.

10. Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Пономарёва И.И., Радченко А.И., Карпова О.И. Противокоррозионные свойства консервационного масла МОБИИН-4//Практика противокоррозионной защиты. 2007. № 2 (44). С. 40-45.

11. Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Кузнецова Е.Г. Консервационные материалы на основе отработавших моторных масел//Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 5. С. 13-15.

12. Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Ивойлов А.А. Битумные мастики для противокоррозионной защиты автотранспорта и сельскохозяйственного оборудования//Практика противокоррозионной защиты. 2008. № 2 (48). С. 34-37.

13. Прохоренков В.Д., Князева Л.Г., Ивойлов А.А. Битумные мастики для противокоррозионной защиты сельскохозяйственной техники//Техника и оборудование для села. 2008. № 2. С. 32-34.

14. Ильдарханова Ф.И., Богословский К.Г. Выбор лакокрасочных покрытий для долговременной противокоррозионной защиты металлоконструкций нефтегазовой отрасли // Коррозия. Территория Нефтегаз. 2013. Июнь. – С. 22-27.

15. Миронова Г.А., Ильдарханова Ф.И. Лакокрасочные материалы для долговременной антикоррозионной защиты металлоконструкций в атмосферных условиях // Промышленная окраска. 2012. № 2. – С. 8-12.

16. Елисаветский А. М., Елисаветская И. В., Ратников В. Н. Защита металлов от коррозии лакокрасочными покрытиями // Лакокрасочные материалы и их применение. 2001. № 6 – С. 17-21.

17. ГОСТ 9825-73. Материалы лакокрасочные. Термины, определения и обозначения. М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.

18. Патент РФ № 2305693С1 Грунт-эмаль антикоррозионная водно-дисперсионная. Опубл. 10.09.2007. Бюл. №25.

19. Патент РФ № 2376335С1 Грунт-эмаль для покрытия металлических изделий. Опубл. 12.20.2009.

20. Патент РФ № 2376335С1 Грунт-эмаль для защитного противокоррозионного эпоксидного покрытия с толщиной защитного слоя до 500 мкм, способ формирования защитного противокоррозионного эпоксидного покрытия и изделие с защитным противокоррозионным эпоксидным покрытием. Опубл. 22.03.2017. Бюл .№9.

21. ГОСТ 6572-91 «Покрытия лакокрасочные тракторов и сельскохозяйственных машин» М.: Стандартинформ, 2006. – 7 с.

22. Князева Л.Г. Научные основы создания антикоррозионных консервационных материалов на базе отработавших нефтяных масел и растительного сырья/диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук / ГОУВПО "Тамбовский государственный технический университет". Тамбов, 2012.

References

1. Vigdorovich V.I., Nasypajko I.G., Prohorenkov V.D. Antikorrozionnye konservacionnye materialy. M.: Agropromizdat. - 1987. -128 s.

2. Mironov E.B., Kosolapov V.V., Tarukin E.M., Maslov M.M. Ocenka konservacionnyh materialov dlya zashchity ot korrozii rabochih organov sel'skohozyajstvennoj tekhniki//Vestnik NGIEI. - 2015. - № 8 (51). - S. 48-57.

3. Ostrikov V.V., Sazonov S.N., Vigdorovich V.I., Safonov V.V., Balabanov V.I. Determination of the Composi-tion and Properties of Plastic Lubricants Derived from Used Oils//

Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2017. T. 53. № 2. S. 154-162.

4. Knyazeva L.G., Prohorenkov V.D., Ostrikov V.V., CHernyshova I.YU. Razrabotka konservacionnyh mate-rialov na osnove otrabotannyh masel//Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. 2002. № 10. S. 38-40.

5. Ostrikov V.V., Nagornov S.A., Klejmenov O.A., Tupotilov N.N., Bulavin S.A., Strebkov S.V., Proho-renkov V.D., Petrashev A.I., Knyazeva L.G. Toplivo, smazochnye i konservacionnye materialy//

Uchebnoe posobie dlya vuzov / Belgorod, 2008.

6. Vigdorovich V.I., Knyazeva L.G., Tsygankova L.E., Ostrikov V.V., Petrashev A.I.Properties of Petroleum and Synthetic Oils as Bases for Anticorrosion materials//Chemistry and Technology of Fuels and Oils. - 2019. - T. 55. - № 4. - S. 412-423.

7. Petrashev A.I., Knyazeva L.G., Prohorenkov V.D., Klepikov V.V. Tekhnologiya konservacii agrarnoj tekh-niki vodno-voskovym sostavom "GERON"//Nauka v central'noj Rossii. 2013. № 1. S. 53-56.

8. Prohorenkov V.D., Knyazeva L.G., Ivojlov A.A., Eremin V.N. Konservaciya sel'skohozyajst-vennoj tekhni-ki dlya vneseniya mineral'nyh udobrenij//Tekhnika v sel'skom hozyajstve. 2007. № 6. S. 30-32.

9. Prohorenkov V.D., Knyazeva L.G., Radchenko A.I., Karpova O.I. Protivokorrozionnye svojstva kompozi-cij na osnove MOBIIN-3 (AKOR-1B)// Praktika protivokorrozionnoj zashchity. 2006. № 4 (42). S. 31-38.

10. Prohorenkov V.D., Knyazeva L.G., Ponomaryova I.I., Radchenko A.I., Karpova O.I. Protivokor-rozionnye svojstva konservacionnogo masla MOBIIN-4//Praktika protivokorrozionnoj zashchity. 2007. № 2 (44). S. 40-45.

11. Prohorenkov V.D., Knyazeva L.G., Kuznecova E.G. Konservacionnye materialy na osnove otrabotavshih motornyh masel//Mekhanizaciya i elektrifikaciya sel'skogo hozyajstva. 2010. № 5. S. 13-15.

12. Prohorenkov V.D., Knyazeva L.G., Ivojlov A.A. Bitumnye mastiki dlya protivokorrozionnoj zashchity avtotransporta i sel'skohozyajstvennogo oborudovaniya//Praktika protivokorrozionnoj zash-chity. 2008. № 2 (48). S. 34-37.

13. Prohorenkov V.D., Knyazeva L.G., Ivojlov A.A. Bitumnye mastiki dlya protivokorrozionnoj zashchity sel'skohozyajstvennoj tekhniki//Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2008. № 2. S. 32-34.

14. Il'darhanova F.I., Bogoslovskij K.G. Vybor lakokrasochnyh pokrytij dlya dolgovremennoj pro-tivo-korrozionnoj zashchity metallokonstrukcij neftegazovoj otrasli // Korroziya. Territoriya Neftegaz. 2013. Iyun'. – S. 22-27.

15. Mironova G.A., Il'darhanova F.I. Lakokrasochnye materialy dlya dolgovremennoj antikorrozion-noj zashchity metallokonstrukcij v atmosfernyh usloviyah // Promyshlennaya okraska. 2012. № 2. – S. 8-12.

16. Elisavetskij A. M., Elisavetskaya I. V., Ratnikov V. N. Zashchita metallov ot korrozii lakokraso-chnymi pokrytiyami // Lakokrasochnye materialy i ih primenenie. 2001. № 6 – S. 17-21.

17. GOST 9825-73. Materialy lakokrasochnye. Terminy, opredeleniya i oboznacheniya. M.: Standartin-form, 2006. – 7 s.

18. Patent RF № 2305693S1 Grunt-emal' antikorrozionnaya vodno-dispersionnaya. Opubl. 10.09.2007. Byul. №25.

19. Patent RF № 2376335S1 Grunt-emal' dlya pokrytiya metallicheskih izdelij. Opubl. 12.20.2009.

20. Patent RF № 2376335S1 Grunt-emal' dlya zashchitnogo protivokorrozionnogo epoksidnogo pokrytiya s tolshchinoj zashchitnogo sloya do 500 mkm, sposob formirovaniya zashchitnogo protivokor-rozionnogo epoksidnogo pokrytiya i izdelie s zashchitnym protivokorrozionnym epoksidnym pokrytiem. Opubl. 22.03.2017. Byul .№9.

21. GOST 6572-91 «Pokrytiya lakokrasochnye traktorov i sel'skohozyajstvennyh mashin» M.: Standar-tinform, 2006. – 7 s.

22. Knyazeva L.G. Nauchnye osnovy sozdaniya antikorrozionnyh konservacionnyh materialov na baze ot-rabotavshih neftyanyh masel i rastitel'nogo syr'ya/dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora himi-cheskih nauk / GOUVPO "Tambovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet". Tambov, 2012.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Князева Лариса Геннадьевна – доктор химических наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: Knyazeva27@mail.ru.

Петрашев Александр Иванович – доктор технических наук, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научноисследо-

вательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: vitin-10.pet@mail.ru

Дорохов Андрей Валерьевич – старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: dorokhov.andryusha@mail.ru.

Курьято Николай Алексеевич – младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: cskasparta@yandex.ru.

Клепиков Виктор Валерьевич – 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: viktrikt@mail.ru

Author credentials

Affiliations

Knyazeva Larisa – Full Doctor of Chemical Sciences, Associate 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: Knyazeva27@mail.ru.

Petrashev Alexandr – Full Doctor of Technical Sciences, 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

Dorokhov Andrey – Senior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, email: dorokhov.andryusha@mail.ru.

Kuryato Nikolay– Junior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, email: cska-sparta@yandex.ru.

Klepikov Viktor – 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: viktrikt@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 03.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 10.02.2022

УДК 621.643; 621.644; 626.82
DOI: 10.35887/2305-2538-2022-1-134-144

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЛИНИИ СБОРНО-РАЗБОРНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗГИБАЮЩИХ НАГРУЗОК

[1]Елькин Алексей Вячеславович
[2]Улюкина Елена Анатольевна
[3]Прохоров Александр Анатольевич
[1]ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России»
[2]Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
[3]ПАО «Газпром»

Реферат. *Прокладка трубопроводов для транспортировки нефти, нефтепродуктов и воды в сильно пересеченной местности обусловливает возникновение напряжений под воздействием изгибающих нагрузок, которые могут привести к разгерметизации линии трубопровода и потере перекачиваемого продукта. Анализ статистических данных показывает, что разрыв соединений*

составляет до 57% от всех случаев разгерметизации линейной части трубопровода в процессе эксплуатации сборно-разборных трубопроводов (на примере трубопровода с наиболее распространенным соединением типа «Раструб», имеющего угловую подвижность 2^0). По результатам разработки и исследования обобщенной модели с использованием законов классической механики и гидравлики, а также методов и методик, применяемых в математике и физике, разработана математическая модель нагружения линейной части сборно-разборного трубопровода при изгибающих нагрузках. Адекватность полученной модели подтверждена результатами экспериментальных исследований на участке трубопровода, заполненном водой, и рабочим давлением в пределах от 0 до 6,0 МПа с интервалом варьирования 1,5 МПа в соответствии с разработанной методикой. Анализ математической модели показывает, что основными характеристиками, учитываемыми при определении границ устойчивой работы трубопровода, являются угол предельного поворота труб в соединении, а также модуль упругости материала труб. Сделан вывод о том, что применение разработка и внедрение конструкций соединений, позволяющих увеличить безопасный угол поворота труб в соединении (до 10-15^0) а также труб из современных композитных материалов с меньшим модулем упругости, чем у стали ($2 \cdot 10^5$ МПа) позволят снизить жесткость линии сборно-разборного трубопровода, а именно - сократить радиус безопасного изгиба под действием нагрузки (по предварительной оценке - не менее, чем в 3 раза).

***Ключевые слова**: сборно-разборный трубопровод, соединение труб, изгибающие нагрузки.*

SIMULATION OF THE OPERATION OF A COLLAPSIBLE PIPELINE LINE UNDER THE INFLUENCE OF BENDING LOADS

[1]El`kin Aleksey
[2]Ulyukina Elena
[3]Prokhorov Alexander
[1]FAU "25 State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of Russia"
[2]Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev
[3]PAO "Gazprom"

***Absract.** The laying of pipelines for the transportation of oil, oil products and water in very rugged terrain causes the occurrence of stresses under the influence of bending loads, which can lead to depressurization of the pipeline line and loss of the pumped product.Analysis of statistical data shows that the rupture of connections accounts for up to 57% of all cases of depressurization of the linear part of the pipeline during the operation of collapsible pipelines (for example, a pipeline with the most common connection of the "Bell" type, having an angular mobility of 20). Based on the results of the development and research of a generalized model using the laws of classical mechanics and hydraulics, as well as methods and techniques used in mathematics and physics, a mathematical model of loading the linear part of a collapsible pipeline under bending loads has been developed. The adequacy of the obtained model is confirmed by the results of experimental studies on a pipeline section filled with water and operating pressure ranging from 0 to 6.0 MPa with a variation interval of 1.5 MPa in accordance with the developed methodology. The analysis of the mathematical model shows that the main characteristics taken into account when determining the boundaries of the stable operation of the pipeline are the angle of the maximum rotation of the pipes in the joint, as well as the modulus of elasticity of the pipe material. It is concluded that the application, development and implementation of joint designs that increase the safe angle of rotation of pipes in the joint (up to 10-15^0) as well as pipes made of modern composite materials with a lower modulus of elasticity than steel ($2 * 10^5$ MPa) will reduce the rigidity of the collapsible pipeline line, namely, reduce the radius of safe bending under load (according to preliminary estimates - at least 3 times).*

***Keywords**: collapsible pipeline, pipe connection, bending loads.*

Актуальность исследования. Сборно-разборные трубопроводы (далее – СРТ) представляют собой мобильные инженерно-технические комплексы, предназначенные для транспортирования горючего, воды и других жидкостей на значительные расстояния. В Российской Федерации основное развитие СРТ получили в Вооруженных Силах для выполнения задач по

транспортировке горючего [1]. Вместе с тем, СРТ также нашли свое применение при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и стихийных бедствий, в сельском хозяйстве и других отраслях.

Преимуществами СРТ являются высокие темпы сооружения, способность к прокладке при минимальном объеме инженерных работ, модульность конструкции, обеспечивающая возможность сооружения линий различной протяженности и трубопроводных сетей любого начертания, возможность многократного монтажа и демонтажа трубопровода, его перемещения всеми видами транспорта на новые направления использования и другие.

Следует отметить, что мобильность СРТ определяет возможность из использования практически в любой местности. При этом, в большинстве случаев при планировании трассы сборно-разборного трубопровода необходимо учитывать наличие холмов, оврагов, деревьев и кустарников, дорог и других препятствий, так как изгиб трубопровода при определенных условиях может спровоцировать разрыв соединений труб либо разгерметизацию тела трубы в местах сварных швов.

Линейная часть СРТ является одним из основных элементов, определяющих надежность функционирования трубопроводной системы, при этом важнейшим требованием, определяющим эффективность их использования, является количественная сохранность транспортируемого продукта [2]. Исследование условий применения СРТ является актуальным вопросом.

Анализ статистических данных по результатам применения СРТ [3] и нарушений их герметичности по техническим причинам определяется конструкцией соединения труб определил целесообразность дальнейшего исследования на примере стальных СРТ с соединением типа «Раструб», для которых наиболее типичным случаем разгерметизации является разрыв в узле соединения (57,5%). Проведенный анализ условий работы сборно-разборных трубопроводов выявил необходимость разработки обобщенной модели нагружения линейной части при изгибе для определения путей повышения эффективности их использования.

Моделирование процессов развития деформаций в соединениях СРТ. Основными силовыми факторами, воздействующими на соединение типа «Раструб» в процессе эксплуатации являются:

– осевая продольная сила F от внутреннего давления перекачиваемой среды в трубопроводе, которая определяется как $F=\pi D_в^2 p/4$ (где D_p - внутренний диаметр раструба в месте уплотнения);

– изгибающий момент $M_и$ от предварительного напряжения труб от изгиба, влияния сил веса заполненного трубопровода и реакций грунта.

Величина изгибающего момента $M_и$ изменяется от нуля до некоторого предельного значения, при котором происходит отказ соединения труб.

При $M_и = 0$ сила F уравновешивается наклонными силами q, равномерно распределенными по поверхности выступа манжеты диаметром D (рисунок 1).

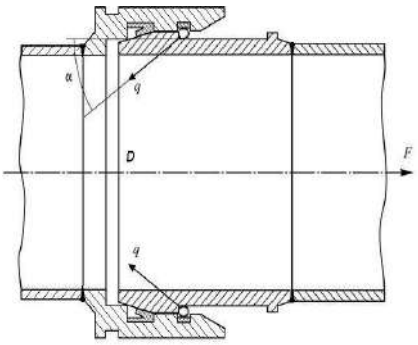


Рисунок 1 - Вариант нагружения соединения без изгиба

При $M_и > 0$ силы q становятся неравномерно распределенными по окружности выступа манжеты, причем в плоскости действия момента уравновешивающие силы будут иметь с одной стороны максимальное, а с другой – минимальные значения. В этом случае сила F будет приложена в условной точке на расстоянии l от оси. В результате анализа этого состояния

нагружения установлено, что неравномерно распределенные по окружности выступа манжеты силы q имеют равнодействующую, радиальная составляющая которой Q_r смещает манжету внутри раструба в поперечном направлении и прижимает ее наружной цилиндрической поверхностью выступа к внутренней поверхности раструба. Со стороны раструба появляется радиальная реакция Q_{r1}, уравновешивающая манжету в поперечно смещенном положении, то есть $Q_{r1} = Q_r$.

Передающийся от трубы на манжету изгибающий момент выражается как $M_u = F*l$.

При состоянии нагружения, когда линия действия смещенной силы F проходит в пределах площади опоры манжеты на запорное кольцо (внутри круга, ограниченного окружностью выступа), то есть при $l < D/2$, соединение находится в состоянии устойчивого равновесия, $M_u < F*D/2$.

При $M_u = F*D/2$ состояние равновесия манжеты становится неустойчивым и при дальнейшем увеличении на величину, достаточную для преодоления сил трения $F_{тр}$ в точке C (рисунок 2), происходит поворот манжеты относительно точки A до упора в точке B. Перемещение у точки B составит величину $\Delta_{ср}$, зазор по торцу манжеты против точки A сохранится прежний - $\Delta_{ср}$, против точки B станет равным нулю.

В состоянии равновесия на манжету, находящуюся в состоянии предельного поворота внутри раструба, действуют следующие силы:

смещенная сила F на плече $l > D/2$, создающая изгибающий момент, обусловивший предельный поворот манжеты внутри раструба на угол Ψ;

реакция на выступ манжеты Q (имеющая составляющие Q_a (осевую) и Q_r (радиальную);

реакция раструба R в точке C, отклоненная от нормали на угол трения φ и имеющая составляющие Q_{r1} (радиальную) и силу трения $F_{тр}$, направленную вдоль цилиндрической поверхности выступа манжеты;

реакция $Q_м$ в точке B, направленная параллельно оси манжеты (перпендикулярно к внутренней упорной поверхности раструба).

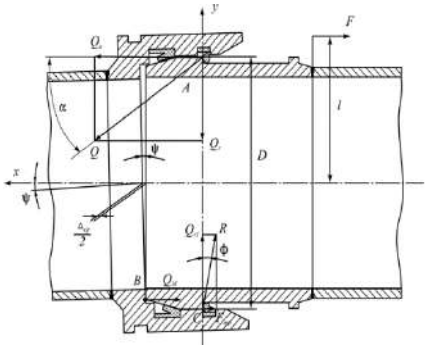


Рисунок 2 - Вариант нагружения соединения «Раструб» с изгибом, вызывающим предельный поворот манжеты внутри раструба

В зависимости от величины изгибающего момента M_u, действие силы трения $F_{тр} = f*Q_м$, проявляется при повороте манжеты в раструбе до появления контакта в точке B, но при отсутствии реакции $Q_м$. При максимальном повороте манжеты происходит касание в точке B, и появляется реакция $Q_м$, обусловленная некоторой малой величиной деформаций. Если изгибающий момент далее остается постоянной величиной, то перенос нагрузки из точки C в точку B неизбежен. При этом сила трения $F_{тр}$ постепенно убывает до нуля, а реакция $Q_м$, соответственно, возрастает (влияние силы $Q_м$ на равновесие манжеты эквивалентно влиянию силы $F_{тр}$). В случае дальнейшего увеличения изгибающего момента осевая реакция $Q_м$ будет расти, что приведет к увеличению нагрузки Q на посадочное место запорного кольца. Необходимо отметить, что исследование ограничено величиной изгибающего момента M_{u1}, которая приводит к предельному повороту манжеты. Для условий ее равновесия нагрузка $Q_м$ принята равной 0, а максимальное значение силы трения $F_{тр} = f*Q_{r1}$.

Возможно такое происхождение нагруженного состояния соединения с предельным углом поворота, когда этот поворот получен заранее, до нагружения линии трубопровода давлением.

При этом влияние трения в точке C будет исключено ($F_{тр}$= 0, f = 0) и изгибающий момент, возникающий при нагружении с предварительным поворотом соединения, будет равен M_{umin}= $F{\cdot}D/2$. Последующий рост момента вызывает появление осевой реакции $Q_м$ в точке B и возможен из-за возрастания внешних поперечных нагрузок на трубопровод или из-за влияния продольных упругих удлинений труб при растяжении от сил внутреннего давления жидкости.

Сравнение всех рассмотренных вариантов нагружения манжеты показывает, что при моменте $M_u<F{\cdot}D/2$ соединение находится в состоянии, при котором концентрация нагрузки на выступ манжеты не достигла своего предельного значения. При этом, если M_u = 0, наблюдается вариант осесимметричного нагружения, а при 0 $<M_u<F{\cdot}D/2$ - более тяжелый вариант, когда на осесимметричное нагружение накладывается влияние изгиба, и максимальная распределенная нагрузка q_{max} в точке A становится больше, чем равномерно распределенная нагрузка q при осесимметричном нагружении. Анализ варианта нагружения с предельным поворотом манжеты позволяет оценить состояние, когда процесс неравномерного распределения нагрузки на выступ манжеты окончательно завершается и появляется полная концентрация нагрузки вблизи точки A. Сконцентрированная в узком секторе запорного кольца нагрузка обусловливает процесс образования и развития дефектов на структуре материала до критических значений, приводящих к разрушению конструктивных элементов (например, смятие выступа манжеты) и, как следствие, вызывает разрушение соединения. Отметим, что при достижении угла поворота манжеты в раструбе предельного значения $\Psi = arctg\Delta_{ср}/D$ в соединении возникает наиболее опасный вариант нагружения.

Как было показано ранее, при M_u= $F{\cdot}D/2$ состояние равновесия манжеты становится неустойчивым. При дальнейшем увеличении изгибающего момента на величину, достаточную для преодоления сил трения $F_{тр}$ в точке C, происходит поворот манжеты относительно точки A. Момент сил трения $M_{тр}$, возникающий в соединении труб с началом перемещения манжеты, будет ограничен углом предельного поворота манжеты внутри раструба $\Psi_{пр}$.

Момент сил трения, возникающий в соединении труб от изгиба, может быть определен по следующей зависимости:

$$M_{тр} = \frac{FDftg\alpha}{1 - ftg\alpha} \tag{1}$$

Модель нагружения (1) будет характеризовать работу соединения труб в процессе поворота манжеты внутри раструба, инициируемого большим изгибающим моментом, вызывающим изгиб линии трубопровода в пределах угла поворота труб в соединениях от 0 до $\Psi_{пр}$.

При условии, что $D_p \approx D$ (различие в размерах очень мало), модель (1) будет иметь следующий вид:

$$M_{тр} = p\left(\frac{\pi D^3 ftg\alpha}{4(1 - ftg\alpha)}\right).$$

Полученные математические модели нагружения соединения типа «Раструб» характеризуют его работу в различных условиях воздействия силовых нагрузок. При этом параметром, характеризующим подвижность соединения в пределах угла поворота от 0 до $\Psi_{пр}$, будет являться величина момента сил трения $M_{тр}$, возникающего при перемещении манжеты внутри раструба.

Исследование работы линии сборно-разборного трубопровода при изгибе.

При прокладке трубопровода на местности неизбежен его изгиб как в горизонтальной (изменение направления прокладки), так и в вертикальной (копирование профиля местности и провисание отдельных участков) плоскостях, при этом изгиб обеспечивается за счет относительного смещения труб в пределах допустимых углов поворота в соединениях. Изгиб линии трубопровода с соединениями «Раструб» характеризуется изменением нагрузок на запорное кольцо и его посадочные поверхности в раструбе и на манжете.

Известно, что при изгибе прямого стержня изгибающий момент пропорционален кривизне оси стержня, вызванной этим моментом, а также жесткости стержня

$$M_u = \frac{1}{\rho} EI \tag{2}$$

где ρ - радиус кривизны оси стержня в сечении, где действует изгибающий момент; E - модуль

упругости материала стержня; *I* - осевой момент инерции сечения стержня.

При определенном значении радиуса изгиба трубопровода достигается предельное нагружение соединений и происходит его разгерметизация. В случае, когда предельный угол поворота труб в соединении достигается до его нагружения давлением, а на предварительно подвергшееся повороту соединение действует минимальный изгибающий момент, радиус кривизны оси одной трубы составит

$$\rho_{max} = EI / M_{umin.}$$

Ось СРТ участка трубопровода, изогнутого моментом M_{umin} представляет собой линию *ABCD* из дуг окружностей радиуса ρ_{max} и длиной *l*, пересекающихся под углом $\Psi_{пр}$ (рисунок 3).

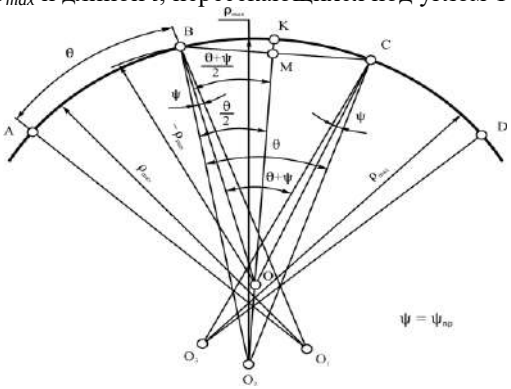


Рисунок 3 - Положение оси трубопровода на участке радиуса ρ_T

Если ломаную *ABCD* представить аппроксимирующей окружностью, проведенной через центры соединений то радиус этой окружности может быть принят за радиус кривизны продольной оси трубопровода $\rho_т$ (при этом $OK < \rho_m < OB$).

Таким образом,

$$\rho_T = \frac{l}{\Theta + \Psi}, \tag{3}$$

где Θ - угол взаимного поворота торцов одной трубы.

На рисунке 3 это центральный угол, соответствующий дуге *AB*, $\Theta = l/\rho_{max}$.

Радиус кривизны оси трубопровода с учетом (3) определится как

$$\rho_т = \rho_{max} l / (l + \rho_{max}\Psi) . \tag{4}$$

При предварительном повороте труб в соединениях поворот манжеты в раструбе на угол Ψ под нагрузкой от давления жидкости достигается без влияния сил трения в соединениях труб.

Если предельный поворот труб в соединениях достигается после нагружения внутренним давлением, упругие удлинения труб приводят к дополнительному изгибу оси, уменьшению радиуса кривизны. В этом случае предельному повороту труб в соединениях дополнительно препятствует сила трения, а изгибающий момент в соединениях труб достигает некоторого значения M_{u1}. Тогда максимальный радиус кривизны оси трубы составит $\rho_{max1} = EI / M_{u1}$.

Значение изгибающего момента M_{u1}, возникающего в соединениях труб с учетом сил трения, инициируемых внутренним давлением, определим как

$$M_{u1} = F\frac{D}{2}\frac{1+ftg\alpha}{1-ftg\alpha}, \tag{5}$$

(здесь *F* - сила давления жидкости в трубе, $F=\pi D_в^2 p/4$).

Радиус кривизны продольной оси нагруженного трубопровода при изгибающем моменте M_{u1} определится выражением

$$\rho_{T1} = \frac{\rho_{max1} l}{l + \rho_{max1}\Psi}$$

Изгиб осевой линии трубопровода неизбежен и в вертикальной плоскости при копировании профиля местности и на провисающих участках. Так, например, развертывание трубопровода по

пологим холмам с радиусом выпуклости поверхности земли не более $\rho_т$, чего на большом протяжении трубопровода невозможно избежать, обусловливает предварительный изгиб трубопровода в вертикальной плоскости по дуге с указанным радиусом кривизны. При этом повторяются условия изгиба сборно-разборного трубопровода, рассмотренные для горизонтальной плоскости.

При анализе состояний нагружения соединений труб на провисающих участках при условиях, наименее опасных для изгиба сборно-разборного трубопровода, свободно провисающий участок трубопровода длиной L представится как пролет двухопорной балки с равномерно распределенной нагрузкой q_o. Величина q_o определяется массой трубы, заполненной продуктом, условно распределенной по ее длине. При увеличении длины пролета L изгибающий момент растет. В средней части пролета появляются соединения, нагруженные предельным изгибающим моментом, дальнейшее увеличение которого приведет к неминуемому разрушению пролета. Возможна такая длина пролета, при которой соединение, находящееся точно на середине пролета, будет изгибаться с минимальным моментом M_{umin}, который соответствует неустойчивому состоянию равновесия соединения (для соединений «Раструб» $M_{umin}= F\ D/2$). Соединение труб, находящееся в середине такого пролета, при свободном провисании трубопровода над низиной (ручьем с пологими берегами), нагруженного внутренним давлением жидкости, подвергается действию изгибающего момента более M_{umin}, а манжета в раструбе имеет угол поворота $0 < \Psi \leq \Psi_{пр}$.

Достаточно произойти любому, сравнительно малому воздействию, кратковременно увеличивающему изгибающий момент (пульсации внутреннего давления, увеличение ветровой нагрузки), чтобы манжета в раструбе повернулась на угол $\Psi_{пр}$. При достижении предельного поворота возможно соударение кромки малого кольцевого паза раструба и выступа манжеты с запорным кольцом. Такие циклы колебаний и ударов в соединении труб повторяются. При этом происходит два удара за один цикл колебаний пролета: один - при достижении предельного поворота манжеты в раструбе (более опасный удар), другой - при возвращении манжеты в первоначальное положение.

Колебательные движения пролетов сборно-разборного трубопровода при циклическом нагружении могут вызывать взаимные поперечные перемещения манжеты и раструба, с неизбежным соударением деталей соединения. Эти явления наиболее проявляются в зонах действия на трубопровод изгибающего момента $M_u \geq M_{umin}$.

Модель нагружения линейной части СРТ при изгибе.

Для исследования влияния радиусов кривизны СРТ на изменение нагрузки, распределяющейся на основные конструктивные элементы соединений, на рисунке 4 построены расчетные графические характеристики изгиба для сборно-разборного и условно цельного трубопровода (характеристика условно цельного представлена пунктирной линией).

Рисунок 4 - Характеристика изгиба линейной части СРТ

Как видно из рисунка 4, изгибающий момент и радиус изгиба связаны обратной пропорциональной зависимостью. В интервале радиуса кривизны $\rho_{max} \leq \rho \leq \infty$ характеристика изгиба сборно-разборного трубопровода описывается уравнением (2) и совпадает с характеристикой изгиба условно цельной трубы. При радиусе кривизны оси сборно-разборного

трубопровода $\rho = \rho_{max}$ и изгибающем моменте $M_u = M_{umin}$ зарождается переходный процесс в соединениях трубопровода, обусловленный началом поворота труб в них. При этом минимальный изгибающий момент инициирующий поворот соединения от сил давления жидкости $M_{umin} = F \cdot D/2$. С учетом сил трения, возникающих в соединении, зарождение переходного процесса может задержаться до значения $\rho = \rho_{max1}$ и изгибающего момента $M_u = M_{u1}$. При этом наступает условие (5)

$$M_u = F\frac{D}{2}\frac{1+ftg\alpha}{1-ftg\alpha}.$$

При неполном повороте манжеты внутри раструба на угол $\Psi < \Psi_{пр}$ радиус кривизны сборно-разборного трубопровода находится в интервале $\rho_{т1} < \rho < \rho_{max}$. В этом интервале характеристика изгиба сборно-разборного трубопровода раздваивается. Верхняя ее ветвь N_1N_3 отражает изгиб трубопровода за счет поворотов манжет внутри раструбов с учетом влияния сил трения в соединениях, а нижняя ветвь N_2N без влияния сил трения в них.

Если уравнение кривой NN_3 определяется формулой (2), то уравнение кривой N_2N_1 надо вывести, то есть дать зависимость $M_u = f(\Psi,\rho)$ в области $\rho \le \rho_т$. Для этого используем формулу (4), решенную относительно ρ_{max}

$$\rho_{max} = \frac{\rho_T l}{l - \rho_T \Psi}$$

Так как изгибающий момент трубопровода определяется радиусом кривизны оси одной трубы, то его значение представим в виде

$$M_u = \frac{EI(l-\rho_T\Psi)}{\rho_T l} = \frac{EI}{\rho_T} - \frac{EI\Psi}{l}. \quad (6)$$

Предложенное выражение (6) описывает работу трубопровода при изгибе линии за счет углов поворота в соединении при различных режимах нагружения.

В интервале $\rho_{т1} < \rho < \rho_{max}$ изменение радиуса кривизны трубопровода ρ происходит при весьма малом изменении радиусов кривизны отдельных труб (от ρ_{max} до ρ_{max1}), но при полном использовании углов поворота в соединениях от 0 до $\Psi_{пр}$ ($\Psi = f(\rho)$). В этом случае, при существенном изменении радиуса кривизны трубопровода ρ, изменение изгибающего момента от M_{umin} до M_{u1} обусловлено лишь влиянием трения в соединениях.

При радиусе кривизны трубопровода $\rho < \rho_{т1}$ значения изгибающего момента резко увеличиваются ($M_u >> M_{u1}$), при этом относительный угол поворота манжеты внутри раструба будет иметь значение не менее $\Psi_{пр}$. Этот участок характеристики изгиба трубопровода будет соответствовать наиболее опасному состоянию нагружения соединений труб, вызывающему их разрушения.

Характеристика изгиба трубопровода позволяет определить радиусы кривизны как для всей линии сборно-разборного трубопровода, так и для отдельно взятой трубы. Например, горизонтальная линия от оси ординат на уровне разрушающего момента M_{umax} на характеристике изгиба дает точки пересечения N_4 и N_5, которым на оси абсцисс соответствуют значения минимальных радиусов кривизны для трубопровода $\rho = \rho_{тmin}$ и для одной трубы $\rho = \rho_{min}$. Та часть характеристики, которая лежит выше значений M_{umax}, нереализуется, так как при достижении разрушающего момента M_{umax} происходят разрывы трубопровода в соединениях, разрушаются сварные швы и трубы (то есть, достигается первичная пластическая деформация на наружной поверхности труб). Эти процессы обусловлены прочностными свойствами материала трубы.

Значение M_{umax} можно определить как

$$M_{umax} = \sigma_u W,$$

где W - осевой момент сопротивления кольцевого сварного шва; σ_u - напряжения от изгибающего момента, $\sigma_u = \sigma_т - \sigma_p$ (здесь $\sigma_p = 4F/\pi(D_н^2 - D_в^2)$).

Осевой момент сопротивления кольцевого шва рассчитывают по формуле

$$W = \frac{\pi(D_н^4 - D_в^4)}{32D_н}.$$

Для определения минимального радиуса кривизны оси трубопровода $\rho_{тmin}$, соответствующего началу развития первичной пластической деформации и началу разрушения труб в местах

концентрации напряжений у сварных швов при нагружении линии трубопровода изгибающим моментом M_{umax} с учетом преобразования модели нагружения (6), предлагаем определить выражением

$$\rho_{\tau min} = EIl/(M_{umax}l + EI\Psi)\ . \qquad (7)$$

Выражение (7) позволяет определить границы устойчивой работы линейной части трубопровода, оснащенного подвижными соединениями труб, так как нагруженный давлением трубопровод, достигнув радиуса кривизны оси $\rho \le \rho_{\tau min}$ при изгибе своей линии, неизбежно будет подвергаться воздействию максимального изгибающего момента M_{umax}, приводящего к разрушению линейной части (труб и соединений).

На основании изложенных подходов обобщенную математическую модель нагружения линейной части сборно-разборного трубопровода с подвижными соединениями труб, представим в виде системы трех уравнений, каждое из которых характеризует изгиб линии трубопровода, вызываемый условиями его нагружения при эксплуатации

$$M_u(\Psi,\rho) = \begin{cases} \dfrac{EI}{\rho} : при \quad \Psi(\rho) = 0; \rho_{\max} \le \rho < \infty; \\ \dfrac{EI\Psi_{(\rho)}}{l} : при \quad 0 < \Psi(\rho) < \Psi_{np}; \rho_{T1} < \rho < \rho_{\max} \\ \dfrac{EI}{\rho} - \dfrac{EI\Psi_{(\rho)}}{l} : при \quad \Psi(\rho) = \Psi_{np} = const; \rho_{T\min} < \rho < \rho_{T1}. \end{cases}$$

Экспериментальные исследования границ устойчивой работы СРТ при изгибных нагрузках. Определение границ устойчивой работы СРТ осуществлялось с учетом подвижности соединения «Раструб» (угол поворота манжеты в раструбе от 0^0 до Ψ_{np}= [$1{,}5^0$...$2{,}0^0$]), веса самой трубы (G_{mp}) и веса продукта (G_{np}) в ней. Порядок проведения эксперимента был следующим:

на тело трубы наклеивались тензодатчики, соединенные с тензометрическим усилителем, позволяющие фиксировать ее изгиб;

в трубопроводе, заполненном водой, при помощи насоса создавалось рабочее давление p_i, варьируемое в пределах от 0 до 6,0 МПа с интервалом варьирования 1,5 МПа (0 МПа, 1,5 МПа, 3,0 МПа, 4,5 МПа, 6,0 МПа);

к свободному (незакрепленному) концу трубы в вертикальном направлении прикладывалась внешняя силовая нагрузка, с началом поворота манжеты в раструбе при *i*-ом нагружении замерялся возникающий в соединении труб изгибающий момент M_{ui};

расчетным путем определялся максимальный радиус кривизны оси трубопровода, характеризующийся изгибающим моментом M_{ui}, при котором наблюдался поворот соединения (манжеты внутри раструба) $\rho_{maxi} = EI / M_{ui}$;

с помощью внешней силовой нагрузки проводился подъем свободного конца трубы в вертикальном направлении до упора буртика манжеты в коническую поверхность приемника раструба, при этом фиксировался момент резкого изменения (возрастания) значений M_{ui}, что говорило о полном использовании соединением труб угла поворота, по градуировочной шкале сектора замерялся угол подъема свободного конца трубы (Ψ), среднее значение которого в опытах составляло Ψ = 0,03 рад;

расчетным путем определялся радиус кривизны оси трубопровода, при котором заканчивался поворот манжеты внутри раструба при *i*-ом нагружении:

$$\rho_{Ti} = \frac{\rho_{\max i} l}{l + \rho_{\max i}\psi}\ .$$

По данным результатов проведенных исследований (при $\overline{\Psi}_{np}$=0,03 рад, E=2,06·10^{11} Па, I=4,14·10^{-6} м^4, l=6 м, G_{mp}= 793,62 Н и G_{np}= 979,52 Н) построена экспериментальная характеристика изгиба линии стального трубопровода ПМТП-150 с соединениями «Раструб» (рисунок 5).

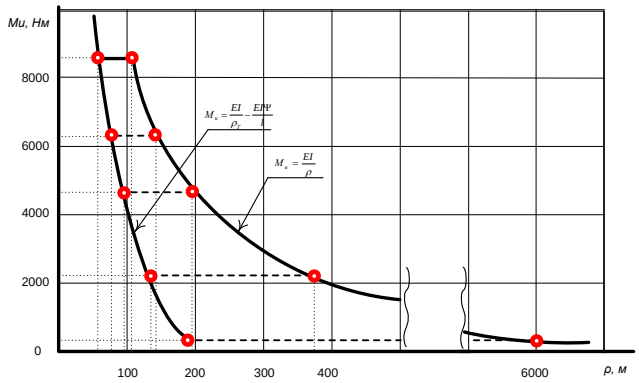


Рисунок 5 - Характеристика изгиба линии стального сборно-разборного трубопровода с соединениями «Раструб» (при $0 \le p_i \le 6{,}0$ МПа)

В ходе проведенных экспериментов подтверждена адекватность теоретических исследований устойчивого функционирования СРТ, испытывающего на себе комплекс внешнего и внутреннего силового воздействия, реальным процессам нагружения.

Выводы. По результатам анализа разработанной математической модели определено, что угол поворота труб в соединении и модуль упругости материала труб являются основными характеристиками, определяющими надёжную работу СРТ.

Среди недостатков соединений используемых в настоящее время сборно-разборных трубопроводов можно отметить малую угловую подвижность (1,3...2,50), что обусловливает значительную жесткость трубопровода. Внедрение новых конструкций соединений, позволяющих безопасно увеличить угловую подвижность труб до 10-15^0 обеспечит снижение жесткости линии сборно-разборного трубопровода не менее чем в три раза, а следовательно – снизить количество аварий и расстыковок при прокладке по пересеченной местности.

Необходимость обеспечения надежности сборно-разборного трубопровода определяет целесообразность исследования других конструкционных материалов для изготовления труб, характеристики которых минимизировали бы вероятность нарушения прочности конструкции вследствие изгибающих нагрузок (в том числе вследствие коррозии). Наиболее эффективными для изготовления коррозионностойких труб являются высокопрочные композиционные материалы (КМ) [4 - 7], применение которых также позволит обеспечить снижение жесткости линии сборно-разборного трубопровода не менее, чем в три раза.

Список литературы

1. Полевой магистральный трубопровод ПМТП-150. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – М.: Воениздат, 1975. – 176 с.

2. Елькин А.В., Середа В.В., Германович П.К. и др. Нагрузки в соединениях сборно-разборных трубопроводов при изгибах линии. — М.: Прогресс. Научный сборник «Транспорт и хранение нефти», № 11, 1999.

3. Михальченков В.М., Данильченко И.Г., Попов Ю.М. и др. Анализ потерь горючего при перекачке по полевым магистральным трубопроводам и причины их возникновения. – В кн.: Научно-технический сборник. – М.: Воениздат, 1990. – 128 с.

4. Косолапов, А. Ф., Елькин А.В., Прохоров А.А. Сборно-разборные трубопроводы из современных композитных материалов // Молодой ученый. — 2014. — № 9 (68). — С. 168-172.

5. Прохоров А. А., Елькин А.В., Прошкин А.Ю. Методологические подходы в исследовании конструктивной надежности сборно-разборных трубопроводов из композиционных материалов // Молодой ученый. — 2015. — № 2 (82). — С. 117-118.

6. Улюкина Е.А., Прохоров А.А. Раструбное соединение сборно-разборного трубопровода из композитного полимерного материала // Сборник научных докладов XXI Междунар. научно-практ. конф. «Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства». – Тамбов: ФГБНУ ВНИИТиН. - 2021 – с. 107-110.

7. Улюкина Е.А., Прохоров А.А. Мобильные оросительные системы с трубопроводами из композитных материалов // Агроинженерия. – 2022. –№ 1 (107). – с. 49-54.

References

1. Polevoj magistral'nyj truboprovod PMTP-150. Technitheskoe opisanie i instructiya po ekspluatacii. - M.: Voenizdat, 1975– - 176 p.

2. Elkin A.V., Sereda V.V., Germanovich P.K., etc. Nagruzki v soedinenii sborno-razbornyh truboprovodov pri izgibah linii. - M.: Progress. Nauchnyj sbornik "Transport i hranenie nephti", No. 11, 1999.

3. Mikhalchenkov V.M., Danilchenko I.G., Popov Yu.M. et al. Analys poter' goruchego pri perekachke po polevem magistralnym truboprovodam I prichiny ih vosniknoveniya. – V knige: Nauchno-technicheskij sbornik. - M.: Voenizdat, 1990. - 128 p.

4. Kosolapov, A. F., Elkin A.V., Prokhorov A.A. Sborno-razbornye truboprovody iz sovremennyh compositnyh materialov // Young scientist. — 2014. — № 9 (68). — Pp. 168-172.

5. Prokhorov A. A., Elkin A.V., Proshkin A.Yu. Methodological approaches in the study of structural reliability of collapsible pipelines made of composite materials // Young Scientist. — 2015. — № 2 (82). — Pp. 117-118.

6. Ulyukina E.A., Prokhorov A.A. Rastrubnoe soedinenie sborno-razbornogo truboprovoda iz kompozitnogo materiala // Sbornik nauchnyh dokladov XXI Mezdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya resursov pri proizvodstve sel'skokhozyastvennoj productcii – novije technologii i technika novogo pokoleniya dlya rastenievodstva i zivotnovodstva". – Tambov: FGBNU VNIITiN. - 2021 - pp. 107-110.

7. Ulyukina E.A., Prokhorov A.A. Mobil'nye orositel'nye systemy s truboprovodamy iz compositnyh materialov / Agroengineriya. – 2022. –№ 1 (107). – pp. 49-54.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Елькин Алексей Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Россия, г. Москва, e-mail: elkin1961@mail.ru.

Улюкина Елена Анатольевна – доктор технических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Россия, г. Москва, e-mail: eulykina@rgau-msha.ru.

Прохоров Александр Анатольевич – главный специалист ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, e-mail: aleks_proh@mail.ru.

Author credentials

Affiliations

El`kin Aleksey – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Federal Autonomous Institution "25th State Research Institute of Chemmotology of the Ministry of Defense of Russia", Russia, Moscow, e-mail: elkin1961@mail.ru.

Ulyukina Elena – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Russia, Moscow, e-mail: eulykina@rgau-msha.ru.

Prokhorov Alexander – Chief Specialist, PJSC Gazprom, St. Petersburg, e-mail: aleks_proh@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 11.02.2022 Принята к публикации (Accepted): 19.02.2022

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 28.02.2022. Заказ № 21.
Формат 84x108/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Гарнитура Times. Объем – 15,23 усл. печ. л. Тираж 100 экз.