



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ

ISSN 0321-4443



ТРАКТОРЫ И СЕЛЬХОЗМАШИНЫ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

№ 04 • 2021



WWW.MOSPOLYTECH.RU



ВЕДУЩИЙ ЖУРНАЛ ОТРАСЛИ ТРАКТОРНОГО
И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ



ТРАКТОРЫ И СЕЛЬХОЗМАШИНЫ

TRACTORS AND AGRICULTURAL MACHINERY

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с февраля 1930 г.

4•2021

Выходит 6 раз в год

ISSN 0321-4443

DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4

Учредитель

- Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»
- ООО «Эко-Вектор»

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 05.10.2021 ПИ № 77-81900

Журнал входит в перечень ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней, а также в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Издатель

ООО «Эко-Вектор»

Адрес издательства:

191186, г. Санкт-Петербург,
Аптекарский переулок, д. 3, литера А,
помещение 1Н

E-mail: info@eco-vector.com

WEB: <https://eco-vector.com>

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу «Пресса России» – индекс 27863, а также в агентствах: «Информнаука», тел. (495) 787-38-73, gladkih@viniti.ru; «Урал-Пресс», тел. (495) 789-86-36, e_timoshenkova@ural-press.ru; «МК-Периодика», тел. (495) 672-70-89, chernous@periodicals.ru

Перепечатка материалов из журнала возможна при обязательном письменном согласии редакции.
При перепечатке ссылка на журнал «Тракторы и сельхозмашины» обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

За приводимые в статьях факты, точность расчетов и экспериментальных данных, а также за точность цитирования и ссылок на источники ответственность несут авторы.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

КАМИНСКИЙ Валерий Наумович – профессор, доктор технических наук; профессор Московского политехнического университета, член Экспертного совета ветеранов (старейшин) отрасли поршневого двигателестроения России; заслуженный работник промышленности Московской области (Москва, Россия)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

ЛЕПЁШКИН Александр Владимирович – профессор, кандидат технических наук; профессор Московского политехнического университета, доцент Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (Москва, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

БАХМУТОВ Сергей Васильевич – профессор, доктор технических наук; заместитель генерального директора по научной работе Государственного научного центра РФ «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт „НАМИ“» (Москва, Россия)

ГОДЖАЕВ Захид Адыгезалович – член-корреспондент РАН, профессор, доктор технических наук; заместитель директора по инновационной и внедренческой деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (Москва, Россия)

ГОРОДЕЦКИЙ Константин Исаакович – профессор, доктор технических наук; профессор Московского политехнического университета; заслуженный машиностроитель РФ (Москва, Россия)

ДЕВЯНИН Сергей Николаевич – профессор, доктор технических наук; профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА (Московская сельскохозяйственная академия) имени К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

ЕРОХИН Михаил Никитьевич – академик РАН, доктор технических наук; профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА (Московская сельскохозяйственная академия) имени К.А. Тимирязева (Москва, Россия)

ЖАЛНИН Эдуард Викторович – профессор, доктор технических наук; заведующий отделом Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; заслуженный деятель науки РФ (Москва, Россия)

ИЗМАЙЛОВ Андрей Юрьевич – академик РАН, доктор технических наук; директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (Москва, Россия)

КОВАЛЁВ Михаил Михайлович – доктор технических наук; научный руководитель Федерального научного центра лубяных культур; заслуженный изобретатель РФ (Тверь, Россия)

КОТИЕВ Георгий Олегович – профессор, доктор технических наук; заведующий кафедрой Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана; заслуженный деятель науки РФ (Москва, Россия)

КУТЬКОВ Геннадий Михайлович – профессор, доктор технических наук; профессор Российского государственного аграрного университета – МСХА (Московская сельскохозяйственная академия) имени К.А. Тимирязева; заслуженный деятель науки и техники РФ (Москва, Россия)

ЛАЧУГА Юрий Фёдорович – академик РАН, доктор технических наук; академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук РАН, председатель Экспертного совета Отделения сельскохозяйственных наук РАН (Москва, Россия)

ЛОБАЧЕВСКИЙ Яков Петрович – академик РАН, доктор технических наук; первый заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (Москва, Россия)

ЛЯШЕНКО Михаил Вольфредович – профессор, доктор технических наук; заведующий кафедрой Волгоградского государственного технического университета (Волгоград, Россия)

МАРЧЕНКО Андрей Петрович – профессор, доктор технических наук; проректор по научной работе НТУ ХПИ (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»), заместитель главы Совета проректоров по научной работе ВУЗов Украины, академик Академии высшей школы Украины, член-корреспондент Инженерной академии Украины (Харьков, Украина)

НАТРИАШВИЛИ Тамаз Мамиевич – академик Национальной академии наук Грузии, профессор, доктор технических наук; директор Института механики машин им. Р. Двали (ИММ); лауреат Национальной премии Грузии в области науки (Тбилиси, Грузия)

ПРЕДИГЕР Виктор – профессор, доктор технических наук; профессор Университета прикладных наук (Оснабрюк, Германия)

СКВОРЦОВ Аркадий Алексеевич – профессор, доктор физико-математических наук; проректор по исследованиям и разработкам Московского политехнического университета (Москва, Россия)

СОЛОВЬЁВ Рудольф Юрьевич – доцент, кандидат технических наук; директор Центра сельскохозяйственного машиностроения Государственного научного центра РФ «Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт „НАМИ“» (Москва, Россия)

СТАСИЛЕВИЧ Андрей Георгиевич – генеральный конструктор ОАО «МТЗ» (Минский тракторный завод) (Минск, Беларусь)

ФОМИН Валерий Михайлович – профессор, доктор технических наук; профессор Московского политехнического университета, член Экспертного совета ветеранов (старейшин) отрасли поршневого двигателестроения России (Москва, Россия)

ФУКС Кристиан – доктор технических наук; менеджер проекта по системам больших двигателей международной инженеринговой компании AVL List (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List – «Институт двигателей внутреннего сгорания „Лист“») (Грац, Австрия)

ШУМАН Олаф – генеральный директор ООО «ФЭВ Рус» международной инженеринговой компании FEV (Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren – «Исследовательская компания по силовым агрегатам и двигателям внутреннего сгорания») (Аахен, Германия)

EDITOR-IN-CHIEF

Valery N. KAMINSKY – Professor, DSc in Engineering; Professor of Moscow Polytechnic University, Member of the Veterans (Elders) Expert Council of the Russian Piston Engine Industry; Honorary Worker of Industry of the Moscow Region (Moscow, Russia)

EXECUTIVE EDITOR

Alexander V. LEPESHKIN – Professor, PhD in Engineering; Professor of Moscow Polytechnic University, Associate Professor of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

EDITORIAL BOARD MEMBERS

Sergey V. BAKHMUTOV – Professor, DSc in Engineering; Professor, Deputy CEO for Research of the State Research Center of the Russian Federation NAMI (Moscow, Russia)

Zakhid A. GODZHAEV – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor, DSc in Engineering; Deputy Director for Innovation and Implementation Activities of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

Konstantin I. GORODETSKIY – Professor, DSc in Engineering; Professor of Moscow Polytechnic University; Honorary Mechanical Engineer of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Sergey N. DEVYANIN – Professor, DSc in Engineering; Professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Mikhail N. YEROKHIN – Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc in Engineering; Professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

Eduard V. ZHALNIN – Professor, DSc in Engineering; Head of the Department of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Honorary Scientist of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Andrey Yu. IZMAYLOV – Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc in Engineering; Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

Mikhail M. KOVALEV – DSc in Engineering; Research Advisor of the Federal Scientific Center for Bast Crops; Honorary Inventor of the Russian Federation (Tver, Russia)

George O. KOTIEV – Professor, DSc in Engineering; Head of the Department of Bauman Moscow State Technical University; Honorary Scientist of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Gennadiy M. KUTKOV – Professor, DSc in Engineering; Professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Honorary Scientist of the Russian Federation (Moscow, Russia)

Yury F. LACHUGA – Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc in Engineering; Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, Chairman of the Expert Council of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Yakov P. LOBACHEVSKIY – Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc in Engineering; First Deputy Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

Mikhail V. LYASHENKO – Professor, DSc in Engineering; Head of the Department of Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)

Andriy P. MARCHENKO – Professor, DSc in Engineering; Vice-Rector for Scientific-and-Research Work of National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute; Deputy Head of the Council of Vice-Rectors for Scientific and Research Work of Universities of Ukraine, Full Member of the Academy of Higher School of Ukraine, Corresponding Member of the Engineering Academy of Ukraine (Kharkiv, Ukraine)

Tamaz M. NATRIASHVILI – Full Member of the Georgian National Academy of Sciences, Professor, DSc in Engineering; Director of Rafiel Dvali Institute of Machine Mechanics (IMM); Laureate of the Georgian National Prize in Science (Tbilisi, Georgia)

Viktor PREDIGER – Professor, DSc in Engineering (Dr.-Ing.); Professor of Osnabrück University of Applied Sciences (Osnabrück, Germany)

Arkadiy A. SKVORTSOV – Professor, DSc in Physics and Mathematics; Vice-President for Research and Development of Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia)

Rudolf Yu. SOLOVYEV – Associate Professor, PhD in Engineering; Director of the Center for Agricultural Engineering at the State Research Center of the Russian Federation NAMI (Moscow, Russia)

Andrey G. STASILEVICH – General Designer of Minsk Tractor Works (Minsk, Belarus)

Valeriy M. FOMIN – Professor, DSc in Engineering; Professor of Moscow Polytechnic University; Member of the Veterans (Elders) Expert Council of the Russian Piston Engine Industry (Moscow, Russia)

Christian FUCHS – DSc in Engineering; Project Manager for Large Engine Systems, International Engineering Company AVL List (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List) (Graz, Austria)

Olaf SCHUMANN – CEO of LLC FEV Rus, International Engineering Company FEV (Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren) (Aachen, Germany)

Колонка главного редактора	Editor-in-Chief's Column	5
НОВЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ	NEW MACHINES AND EQUIPMENT	
Киреев И.М., Коваль З.М., Зимин Ф.А. Обеспечение режимов работы высевающего аппарата специализированным оборудованием	Kireev I.M., Koval' Z.M., Zimin F.A. Ensuring the operating modes of the seeding apparatus specialized equipment	6
ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ	THEORY, DESIGN, TESTING	
Грунин К.Е. Совершенствование диагностики цилиндропоршневой группы методом пневмотестирования	Grunin K.E. Improving diagnostics of the cylinder-piston group by pneumatic testing	13
Годжаев З.А., Шеховцов В.В., Ляшенко М.В., Мерляк В.К., Филиппов Н.В. Формирование динамической системы стенда для испытания трансмиссий на этапе проектирования	Godzhayev Z.A., Shekhovtsov V.V., Lyashenko M.V., Merlyak V.K., Filippov N.V. Formation of the dynamic system of the test bench for transmissions at the design stage	22
Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Алексеев И.С. Результаты проведения экспериментальных исследований трактора, оснащенного упругодемпфирующим механизмом при агрегатировании с сеялкой	Sen'kevich S.E., Il'chenko YE.N., Alekseyev I.S. Results of experimental studies of a tractor equipped with an elastic-damping mechanism when aggregated with a seeder	33
КАЧЕСТВО, НАДЕЖНОСТЬ	QUALITY, RELIABILITY	
Крохта Г.М., Хомченко Е.Н., Усатых Н.А. Методика численного решения задач применительно к электротеплообменникам типа «змеевик» для подогрева топлива	Krokhta G.M., Khomchenko YE.N., Usatykh N.A. Methodology for the numerical solution of problems in relation to the coil-type electric heat exchangers for heating fuel	45
ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА	ECONOMICS, ORGANIZATION AND TECHNOLOGY OF MANUFACTURING	
Искендерзаде Э.Б., Аббасов Б.А., Ахмедли Ш.В., Исламова У.Р. Обоснование формы и параметров новых сортировочных устройств для зернистых материалов	Isgandarzada E.B., Abbasov B.A., Ahmadi SH.V., Islamova U.R. Justification of the form and parameters of the new sorting device for grain materials	55
Кисель Ю.Е., Симохин С.П., Мурачев С.А. Интенсификация восстановления деталей гидроаппаратуры железнением в потоке электролита	Kisel' YU.E., Simokhin S.P., Murachev S.A. Intensification of the recovery of hydraulic equipment parts by iron in the electrolyte flow	63
Солонщиков П.Н. Исследование непрерывного режима смешивания кормовых компонентов в смесительной установке	Solonschchikov P.N. Study of the continuous mode of mixing feed components in a mixing plant	71

Дорогие друзья!

Дорогие друзья!

Четвертым номером за 2021 год мы продолжаем движение в направлении совершенствования журнала «Тракторы и сельхозмашины» в части соответствия требованиям международных наукометрических баз данных с целью индексации в МНБД Scopus и Web of Science. Коллективом издания сделано уже многое. Сейчас разрабатывается новый сайт.

Среди наших сильных сторон – ритмичность и периодичность выпусков. Мы хотим создать хороший издательский портфель журнала. Просим вас продолжать и наращивать публикации в издании, а также вовлекать в этот процесс коллег из ваших сетевых контактов.

На третьей странице обложки номера мы публикуем материал, посвященный юбилею известного российского ученого в области разработки и создания сельскохозяйственных машин Годжаева Захида Адыгезаловича – заместителя директора по инновационной и внедренческой деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, члена редколлегии и одного из самых активных авторов нашего журнала.

Поздравляем юбиляра и желаем ему счастья, здоровья, а также больших успехов в научной, инженерной и педагогической деятельности!

*В.Н. Каминский,
д.т.н., профессор, главный редактор
журнала «Тракторы и сельхозмашины»*

Dear friends!

Dear friends!

The fourth issue of year 2021 continues our movement towards improving Tractors and Agricultural Machinery journal in terms of compliance with the requirements of the international scientometric databases for the purpose of indexing in Scopus and Web of Science. The staff of the journal has already done a lot. A new website is currently being developed.

Among our strengths are the rhythm and frequency of issues publishing. We want to build a good publishing portfolio for the journal. We ask you to continue and increase publications in the journal, as well as to encourage colleagues from your personal network in this process.

The third page of the cover of this issue includes a material dedicated to the anniversary of the famous Russian scientist in the field of development and creation of agricultural machinery Zakhid A. Godzhaev, Deputy Director for Innovation and Implementation Activities of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Editorial Board Member and one of the most active authors of our journal.

We congratulate the anniversary celebrant and wish him happiness, health, as well as great success in scientific, engineering and teaching activities!

*Valery N. Kaminskiy,
DSc in Engineering,
Editor-in-Chief of the Tractors and Agricultural Machinery journal*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫСЕВАЮЩЕГО АППАРАТА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

ENSURING THE OPERATING MODES OF THE SEEDING APPARATUS SPECIALIZED EQUIPMENT

И.М. КИРЕЕВ, д.т.н.
З.М. КОВАЛЬ, к.т.н.
Ф.А. ЗИМИН

Новокубанский филиал ФГБНУ «Росинформагротех»
(КубНИИТИМ), Новокубанск, Россия, zinakoval@mail.ru

I.M. KIREEV, Dsc in Engineering
Z.M. KOVAL', PhD in Engineering
F.A. ZIMIN

Novokubansk Affiliate of Rosinformagrotekh (KubNIITiM),
Novokubansk, Russia, zinakoval@mail.ru

Предметом исследования является процесс высева семян высевающим аппаратом и показатели качества их распределения в рядок. Цель исследований – обоснование рационального технологического процесса распределения семян пропашных культур в рядок пневматическим высевающим аппаратом. Применялось специальное оборудование в системе обеспечения оборотов высевающего диска, присасывания семян к его отверстиям, пневмотранспорта семян после отделения от отверстия высевающего диска для контактного взаимодействия с приемной площадкой датчика числа семян и осадения в сборнике. Новизна исследований заключается в применении акустического датчика единичной регистрации высеваемых высевающим аппаратом семян с малым промежутком времени, позволяющего проводить оценку качества работы высевающего аппарата по среднеквадратическому отклонению семян от заданной нормы их высева в нормальном их распределении в соответствии с законом больших чисел. Режим работы пневматического высевающего аппарата с применением специализированного оборудования в составе испытательного стенда осуществлялся на примере высева семян подсолнечника с нормой высева 3 шт./пог. м для условной скорости движения сеялки 9 км/ч. Полученные данные с различными промежутками времени между регистрируемыми семенами представлялись в формате *.WAV программой «PTC Mathcad Prime» классовыми распределениями семян в графическом виде и в табличной форме. Качественные показатели семян для посева и их классовое распределение в рядок рациональными режимами работы высевающего аппарата, оцениваемые специализированным оборудованием при применении закона больших чисел, являются основой научных исследований по прогнозированию урожайности пропашных культур.

Ключевые слова: высевающий аппарат, специальное оборудование, датчик, единичная регистрация семян, подсолнечник, распределение.

Для цитирования: Киреев И.М., Коваль З.М., Зимин Ф.А. Обеспечение режимов работы высевающего аппарата специализированным оборудованием // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 6–12. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-6-12.

The subjects of the research are the process of sowing seeds with a seeding apparatus and the indicators of quality of their distribution in a row. The goal is to substantiate a rational technological process of distributing row crops seeds in a row with a pneumatic seeding apparatus. Special equipment was used in the system of ensuring the revolutions of the seeding disc, sucking seeds to its holes, pneumatic transport of seeds after separation from the opening of the seeding disc for contact interaction with the receiving platform of the sensor of the number of seeds and its settling in the collector. The novelty of the research lies in the use of an acoustic sensor for a single registration of the sowed seeds with a short time interval, which makes it possible to assess the quality of the operation of the sowing device by the standard deviation of seeds from a given seeding rate in their normal distribution in accordance with the law of numbers. The operating mode of the pneumatic seeding apparatus from specialized equipment as part of the test bench was carried out as an example of sowing sunflower seeds with a seeding rate of 3 seeds/linear meter for the conventional seeder speed of 9 km/h. The data obtained with different time intervals between the registered seeds in WAV format by the PTC Mathcad Prime software was represented by classical distributed seeds in graphical form and data in tabular form. The quality indicators of seeds for sowing and their class distribution in a row by rational operating modes of the seeding apparatus, assessed by specialized equipment when applying the law of large numbers, are the basis of scientific research on predicting the yield of row crops.

Keywords: seeding apparatus. Special equipment, sensor, single seeds registration of, sunflower, the distribution.

Cite as: Kireev I.M., Koval' Z.M., Zimin F.A. Ensuring the operating modes of the seeding apparatus specialized equipment. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 4, pp. 6–12 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-6-12.

Введение

В настоящее время в системах точного земледелия повышаются требования к соблюдению заданной нормы высева, как одного из условий программируемого урожая. Технология точного высева семян имеет особое значение при производстве пропашных культур с применением широкого спектра пневматических сеялок как отечественного, так и иностранного производства (СУПН-8А, СКПП-12, СПК-8, СПКА-1 «Тана», УПС-12, УПС-8, СТВ-107/2 «АиСТ», MaterMass, Gaspardo, Optima и др.) [1–3]. В данных сеялках применяется высевающий аппарат пневматического принципа действия. Совершенствование конструкций высевающих аппаратов сеялок точного высева направлено на дальнейшее повышение точности отбора семян, универсальности (возможности высева семян, различающихся физико-механическими свойствами). Разработка новых машинных технологий для возделывания сельскохозяйственных культур осуществляется по результатам испытаний сеялок и их высевающих аппаратов, приобретающим в настоящее время особую значимость.

Процесс пунктирного высева семян пропашных культур содержит цепь случайных событий, при которых конечный результат распределения семян будет иметь неизбежные отклонения от расчетных значений. Для того чтобы уменьшить эти отклонения и разместить семена вдоль рядка по возможности более точно, необходимо систематизировать факторы, действующие на каждом этапе процесса, и отыскать возможности управления ими, то есть изменить их случайный характер на предсказуемый и полезный для четкости процесса высева [4]. Возможность такого предсказания базируется на качественных показателях выбора семян для посева и их распределения в рядок контролируемые режимами работы высевающего аппарата и системой обеспечения точной регистрации семян.

Семена для посева предлагают различные фирмы, и по причине технологического процесса воздушной сепарации семян на фракции по удельному весу качественный и количественный отбор семян для посева может отличаться [5]. Например, показателями калибровки семян подсолнечника являются масса 1000 г семян, составляющая в исходной фракции 74,3 г; во второй фракции – 77,4 г; в третьей фракции – 71,58 г. Эти фракции повы-

шают всхожесть семян на 5 %. В то же время на урожайность подсолнечника влияет распределение семян в рядок высевающим аппаратом (ВА), которое при скорости движения сеялки 9 км/ч (2,5 м/с) должно обеспечиваться с промежутком времени 0,133 с между дозированием семян в рядок. Незначительное отличие в размерно-массовых характеристиках семян, начальных скоростях отделения от отверстий высевающего диска, скоростях их витания и ориентации учесть практически невозможно, что является их случайным отклонением от нормы распределения в рядок.

Поэтому производителям растениеводческой продукции непросто определить с выбором семян для посева. Каждое исследование случайных явлений, выполненное методами теории вероятностей, прямо или косвенно опирается на экспериментальные данные и систему наблюдений. Известные методы, средства контроля и оценки качества высева семян высевающими аппаратами точного высева не в полной мере соответствуют современным требованиям точного земледелия в части достоверности определения показателей технологического процесса высевающих аппаратов, включают дорогостоящие датчики и аппаратуру с ограниченными возможностями по регистрации семян, имеющих различную массу, неправильную форму (с переменной площадью проекции). До настоящего времени исследования были направлены на совершенствование конструкций высевающих аппаратов при оценке распределения семян в рядок с применением липкой ленты и ячеек для сбора семян [4]. Такие исследования по причине трудоемкости работ ограничены количеством экспериментальных данных; в связи с этим результаты наблюдений и их обработка всегда содержат больший или меньший элемент случайности [6]. Однако, чтобы добиться желаемой надежности и точности измерений, вероятности получения тех же результатов при повторении опыта, необходимо иметь специальное современное измерительное оборудование для точного контроля режимов работы высевающего аппарата.

Цель исследований

Обоснование рационального технологического процесса распределения семян пропашных культур в рядок пневматическим высевающим аппаратом.

Для достижения поставленной цели предусматривалось выполнение следующих задач:

- разработка специализированного стендового оборудования;
- определение показателей качества распределения семян в рядок и рациональных режимов работы высевающего аппарата.

Материалы и методы

Для реализации поставленной цели применялось специализированное оборудование в составе испытательного стенда, позволяющее обеспечивать работу высевающего аппарата пневматического принципа действия, создавать разрежение и контролировать его при удержании семян пропашных культур на отверстиях высевающего диска. Регистрация высеваемых семян датчиком обеспечивалась при их пневмотранспорте в пневматическом устройстве и обязательном условии единичного нахождения в приемной трубке, позволяющем программой на компьютере получать электрические импульсы от датчика числа семян с промежутками времени между ними для обработки и получения информационных сведений о распределении качественных семян в рядок технологическими режимами высевающего аппарата [7].

Специализированное оборудование для определения параметров высевающих аппаратов сеялок точного высева представлено на рис. 1.

На рис. 1 обозначено: 1 – корпус стенда; 2 – электродвигатель 220 В с редуктором для вращения высевающего диска высевающего аппарата и коробом для хранения провода электропитания, закрепленные на кронштейне; 3 – высевающий аппарат сеялки фирмы MaterMass (мод. 3XL); 4 – цепная передача; 5 – пневматическое устройство; 6 – датчик регистрации семян; 7 – тягомер мембранный, показывающий T_m МП–100–М1; 8 – кронштейн для установки высевающего аппарата на специализированном оборудовании; 9 – электрический щит монтажный с панелью; 10 и 11 – колеса (задние и передние соответственно) для передвижения специализированного оборудования; 12 – бункер для засыпки семян; 13 – пневмошланги.

При испытании высевающих аппаратов важным является обеспечение плавного и равномерного вращения высевающего диска для захвата и удержания семян вакуумом на отверстиях высевающего диска. Для обеспечения такого условия был выбран асинхронный трехфазный двигатель с редуктором, общий вид которого приведен на рис. 2.

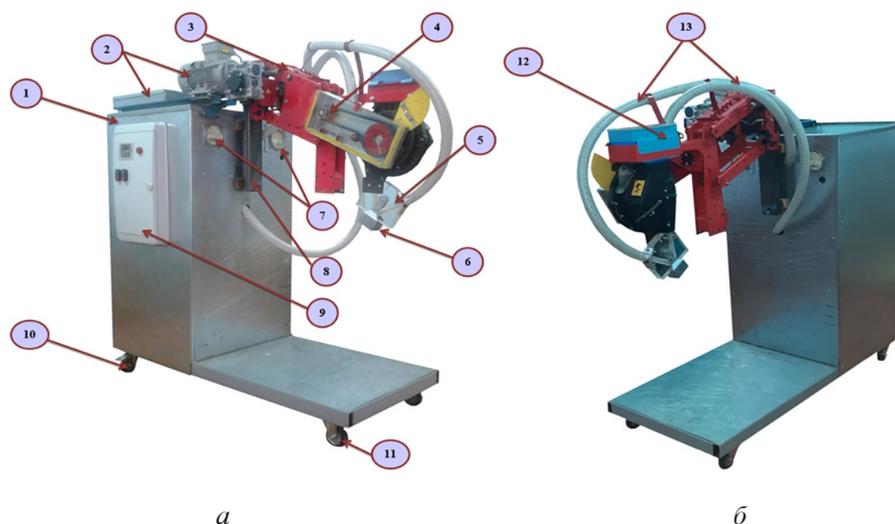


Рис. 1. Общий вид специализированного оборудования для определения характеристик высевающих аппаратов пропашных сеялок точного высева:

а) вид спереди – слева; б) вид спереди – справа

Fig. 1. General view of the specialized equipment for determining the characteristics of the seeding devices of the precision seed drills: а) view from the front to the left; б) view from the front to right



Рис. 2. Общий вид асинхронного трехфазного двигателя с редуктором:
а) вид справа; б) вид слева

Fig. 2. General view of an asynchronous three-phase motor with a gearbox:
a) right side view; b) left side view

Работа асинхронного трехфазного двигателя с редуктором обеспечивается преобразователем частоты (рис. 3).

Характеристика преобразователя частоты: входное напряжение – 220 В, частота – 50/60 Гц; выходное напряжение – 0–220 В; сила тока – 7 А.

Разработанное специализированное оборудование предназначено для обеспечения режимов работы высевающего аппарата, работы пневматических систем для присасывания вакуумом семян к отверстиям высевающего диска, а также пневматического транспорта высеваемых семян для контактного взаимодействия с поверхностью датчика и единичного счета с последующим их сбором в специальный инерционный сборник. Вакуум перед высевающим диском и пневмотранспорт семян обеспечиваются вакуумными насосами с регуляторами разрежения.

Для получения графической зависимости оборотов высевающего диска от заданной ча-

стоты преобразователя напряжения использовался тахометр класса точности 1,0.

График зависимости оборотов высевающего диска от заданной частоты преобразователя напряжения приведен на рис. 4.

В соответствии с «Методикой определения характеристик высевающих аппаратов сеялок точного высева с применением разработанного специализированного оборудования» регистрируемые датчиком семена передавались электрическими импульсами на компьютер и регистрировались специализированной программой «Audacity» для записи аудио, которая способна сохранять полученные данные в формате *.WAV. Для анализа полученных данных была применена программа «PTC Mathcad Prime» по представлению классовых распределений семян в графическом виде.

Теоретическим обоснованием возможности экспериментального определения вероятностных характеристик является закон больших чисел [8]. Нормальное распределение графически выражается в виде кривой колоколообразного типа [9]. Кривая нормального распределения симметрична относительно ординаты точки (среднее арифметическое значение \bar{X} величин x):

$$x_i = \bar{X}, \quad (1)$$

где x_i – переменная случайная величина; \bar{X} – среднее арифметическое значение величин x .

Положение кривой относительно начала координат и ее форма определяются двумя параметрами: \bar{X} и σ (среднее квадратичное отклонение случайной величины x от \bar{X}) [9]. С изменением \bar{X} форма кривой не изменяется, но изменяется ее положение относительно начала координат.



Рис. 3. Преобразователь частоты

Fig. 3. Frequency converter

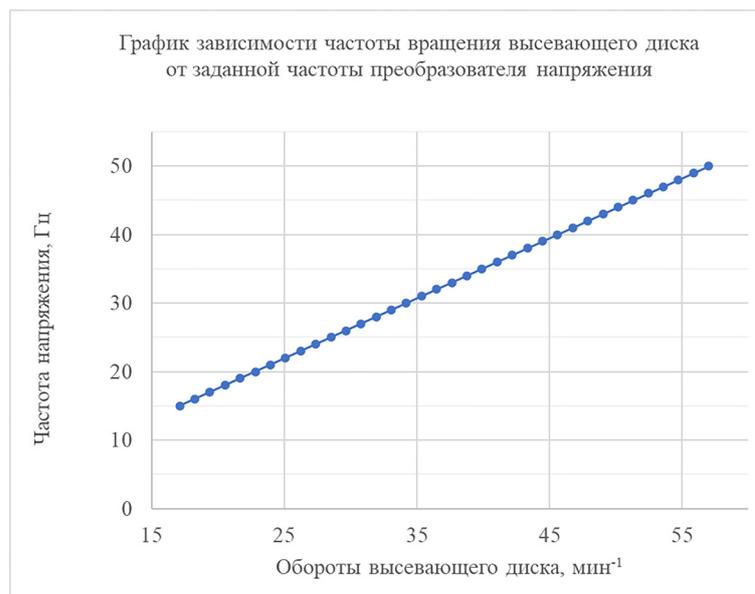


Рис. 4. График зависимости оборотов высевающего диска от частоты преобразователя напряжения

Fig. 4. Graph of the dependence of the seeding disc revolutions on the frequency of the voltage converter

С изменением σ положение кривой не изменяется, но изменяется ее форма. С уменьшением σ кривая становится более вытянутой, а ветви ее сближаются; с увеличением σ , наоборот, кривая становится более плоской формы, а ветви ее раздвигаются шире. Результаты отдельных измерений имеют достаточно большой разброс относительно среднего арифметического, а разброс отдельных средних арифметических значительно меньше. Он уменьшается по мере увеличения числа измерений [9].

Таким образом, при технологических режимах работы высевающего аппарата лучшие показатели семян и их распределение в рядке в опытах характеризуются при сближении ветвей кривой к теоретически заданной норме их высева. Оценку среднего квадратичного отклонения регистрируемых датчиком семян от заданной нормы их высева (принимаемой средним арифметическим значением \bar{X}) при случайном их распределении в рядок высевающим аппаратом возможно определять из выражения [9]:

$$\sigma_{\bar{X}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}, \quad (2)$$

где n – число случайных величин (число регистрируемых семян).

Величина $\sigma_{\bar{X}}$ характеризует разброс отдельных результатов измерения относительно среднего арифметического значения \bar{X} . Ми-

нимальное значение величины $\sigma_{\bar{X}}$ определяет рациональное распределение в рядок качественных семян в технологическом процессе их высева высевающим аппаратом.

Результаты и обсуждение

Полученные данные с различными промежутками времени между регистрируемыми семенами в формате *.WAV программой «PTC Mathcad Prime» представлялись классовыми распределениями семян в графическом виде (рис. 5), например, числом промежутков между двумя, следующими один за другим, семенами подсолнечника в классовых диапазонах при их распределении в рядок при норме высева 3 шт./пог. м для условной скорости движения сеялки 9 км/ч.

Опытные значения расстояний между семенами, количественные и средние значения семян (в шт.), с расстояниями между ними в опытах, а также разброс отдельных результатов измерения относительно среднего арифметического значения приведены в таблице. Точечная оценка среднеквадратичного отклонения расстояний $\sigma_{\bar{X}}$ в опытах (в м) ($\sigma_{\bar{X}} = 20,31$; $\sigma_{\bar{X}} = 19,9$; $\sigma_{\bar{X}} = 20,74$) свидетельствует о перспективности применения метода и специализированного оборудования [10] для получения информационных сведений о рациональных режимах работы ВА в составе сеялок точного высева.

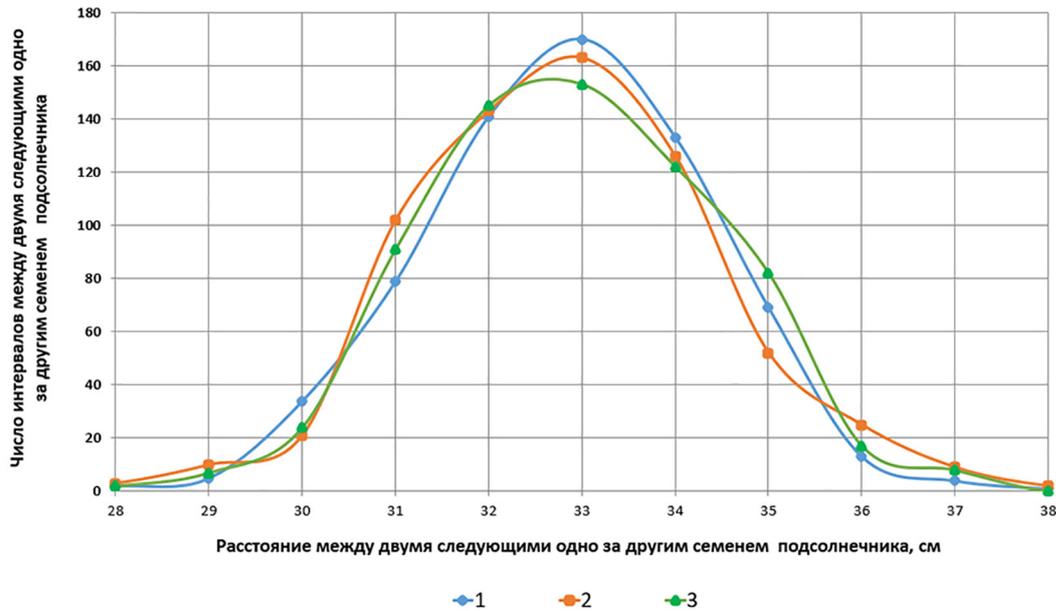


Рис. 5. Число промежутков между двумя, следующими одно за другим, семенами подсолнечника в классовых диапазонах

Fig. 5. Number of gaps between two consecutive sunflower seeds in class ranges

Таблица

Расстояния между семенами, количественные и средние значения семян с расстояниями между ними в опытах, а также разброс результатов измерения относительно среднего арифметического значения
Table. Distances between seeds, quantitative and average values of seeds with distances between them in experiments, as well as the scatter of measurement results relative to the arithmetic mean

№ опыта	Расстояния между семенами, см											Сумма	
	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38		
Число семян, шт., с расстояниями между семенами в опытах													
1	2	10	21	102	145	163	126	52	25	9	2	657	
2	0	7	24	91	143	153	122	82	17	8	0	647	
3	2	7	34	79	141	170	133	69	13	4	0	652	
Средние число семян n_{cp} , шт., с расстояниями между семенами в опытах													
n_{cp}	1,33	8	26,3	90,7	143	162	127	67,7	15	7	0,7	648,8	
Частота p_p , соответствующая данному разряду													
P_1	0,003	0,01522	0,03226	0,1553	0,221	0,2481	0,192	0,0791	0,0381	0,0014	0,003	1	
P_2	0	0,011	0,0371	0,1407	0,221	0,2365	0,1886	0,1267	0,0263	0,0124	0	1	
P_3	0,0031	0,0107	0,0521	0,1212	0,2163	0,2607	0,204	0,1058	0,02	0,0061	0,0031	1	
Суммарные расстояния в классовых промежутках, м											Сумма	$\sigma_{\bar{x}}$	
$1_{оп} l, м$	0,56	2,9	6,3	31,62	46,4	53,79	42,84	18,2	9	3,33	0,76	215,7	20,31
$2_{оп} l, м$	0,28	2,03	7,2	29,14	45,76	50,49	41,48	28,7	6,12	2,96	0,38	214,54	19,9
$3_{оп} l, м$	0,56	2,03	10,2	24,49	45,12	56,1	45,22	24,15	4,68	3,33	0,38	216,26	20,7
$\Sigma l, м$	1,4	7,176	23,7	85,25	137,28	160,38	129,54	71,05	19,8	9,62	1,656	646,852	-
Среднее	0,47	2,392	7,9	28,42	45,76	53,76	43,18	23,683	6,6	3,207	0,552	-	-
$\sigma_{\bar{x}}$	0,465	0,721	2,888	3,62	0,64	4,02	2,68	7,45	3,11	0,368	0,32	-	-

Выводы

1. Проведенными исследованиями установлено, что с применением специализированного оборудования, пневматического транспортирования семян и единичной их регистрации экспериментально показана возможность применения закона больших чисел для исследования перспективной технологии распределения качественных семян в рядок высевающим аппаратом.

2. Качественные показатели семян для посева и их классовое распределение в рядок рациональными режимами работы высевающего аппарата, оцениваемые специализированным оборудованием при применении закона больших чисел, являются основой научных исследований по прогнозированию урожайности пропашных культур.

Литература

1. Астахов В.С. Пневматические сеялки нового поколения // Тракторы и сельхозмашины. 1998. № 10. С. 7–8.
2. Басин В.С. Состояние и тенденции развития конструкций зарубежных сеялок для сахарной свеклы // Обзор ЦНИИТЭИ «Тракторы и сельхозмашины». М., 1978. Вып. 1. 76 с.
3. Бондаренко П.А. Новые технические средства посева сельскохозяйственных культур // Проблемы борьбы с засухой: сб. науч. тр. Ставрополь: Изд-во СтГАУ «АГРУС», 2005. Т. 2. С. 37–42.
4. Лурье А.Б. К оценке эффективности использования автоматических систем и контроля рабочего процесса зерновой сеялки // Научные труды ЛСХИ. 1978. С. 41–45.
5. Зерноочистительная техника сепаратор САД. Результаты исследований. URL: <http://www.aeromeh.com/researches/> (дата обращения 01.02.2021).
6. Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Колос, 1981. 382 с.
7. Киреев И.М., Коваль З.М. Исследование распределения семян пневматическим высевающим аппаратом точного посева // Техника и оборудование для села. 2018. № 6. С. 12–18.
8. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. М.: Изд-во Наука, 1974. 120 с.
9. Схиртладзе А.Г., Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация: учебник. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 540 с.
10. Киреев И.М., Коваль З.М., Зимин Ф.А. Новые метод и средства контроля качества работы пневматических высевающих аппаратов точного посева семян // Техника и оборудование для села. 2020. № 1. С. 24–27.

References

1. Astakhov V.S. New generation pneumatic seed drills. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1998. No 10, pp. 7–8 (in Russ.).
2. Basin V.S. *Sostoyaniye i tendentsii razvitiya konstruktivnykh zarubezhnykh seyalok dlya sakharnoy svekly*. *Obzor TSNIIT-EI traktory i sel'khoz mashiny* [State and development trends of designs of foreign seeders for sugar beet. Overview of Central research institute for information and technical and economic research on tractors and agricultural machinery]. Moscow, 1978. Vyp. 1. 76 p.
3. Bondarenko P.A. New technical means of sowing agricultural crops. *Problemy bor'by s zasukhoi*. Sb. nauch. tr. Stavropol' [Drought management problems. Collection of scientific works. Stavropol]: Izd-vo STGAU «AGRUS», 2005. V. 2, pp. 37–42 (in Russ.).
4. Lur'ye A.B. Evaluation of the effectiveness of the use of automatic systems and control of the working process of the grain seeder. *Nauchnyye trudy LSKHI*. 1978, pp. 41–45 (in Russ.).
5. Zernoochistitel'naya tekhnika separator SAD. *Rezultaty issledovaniy* [Grain cleaning equipment separator SAD. Research results]. URL: <http://www.aeromeh.com/researches/> (accessed: 01.02.2021).
6. Lur'ye A.B. *Statisticheskaya dinamika sel'skhozhozyaystvennykh agregatov* [Statistical dynamics of agricultural aggregates]: izd. 2-e pererab. i dop. Moscow: Kolos Publ., 1981. 382 p.
7. Kireyev I.M., Koval' Z.M. Investigation of the distribution of seeds with a pneumatic precision seeding device. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*. 2018. No 6, pp. 12–18 (in Russ.).
8. Kolmogorov A.N. *Osnovnyye ponyatiya teorii veroyatnostey* [Basic concepts of probability theory]. Moscow: Nauka Publ., 1974. 120 p.
9. Skhirtladze A.G., Radkevich YA.M. *Metrologiya, standartizatsiya i sertifikatsiya* [Metrology, standardization and certification]: *uchebnik*. Staryy Oskol: TNT Publ., 2011. 540 p.
10. Kireyev I.M., Koval' Z.M., Zimin F.A. New methods and means of quality control of pneumatic sowing devices for precise sowing of seeds. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*. 2020. No 1, pp. 24–27 (in Russ.).

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИАГНОСТИКИ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ МЕТОДОМ ПНЕВМОТЕСТИРОВАНИЯ

IMPROVING DIAGNOSTICS OF THE CYLINDER-PISTON GROUP BY PNEUMATIC TESTING

К.Е. ГРУНИН

Нижегородский государственный инженерно-экономический университет, Княгинино, Россия, konst.grunin2010@yandex.ru

K.E. GRUNIN

Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University, Knyaginino, Russia, konst.grunin2010@yandex.ru

Задачей исследования является определение возникающих неплотностей при подаче сжатого воздуха в надпоршневое пространство под давлениями 4, 5 и 6 кгс/см², соответственно.

Для получения более достоверных результатов замеры неплотности надпоршневого пространства путем пневмотестирования должны производиться трехкратно, а оценивать изношенность данного трибосопряжения следует по средним значениям полученных величин. Для того чтобы выявить аналитические зависимости между показаниями пневмотестера и различными видами неисправностей цилиндра необходимо, в процессе проведения эксперимента, смоделировать наиболее часто встречающиеся при рядовой эксплуатации двигателя неисправности, которые влияют на герметичность камеры сгорания.

Запланированные экспериментальные исследования проводились в четком соответствии с поставленными задачами и включали три этапа. Первый этап включал сбор и анализ статистических данных по зависимости показаний пневмотестирования двигателей от различных типов неисправностей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) при рядовой эксплуатации, а также пневмотестирование цилиндров двигателей, идущих в капитальный ремонт, и микрометраж их ЦПГ. На втором этапе проводился эксперимент по моделированию неисправностей на изготовленной экспериментальной установке и на рабочем двигателе, а также определение влияния на показания пневмотестера соотношения неплотностей в сопряжении «поршень – кольцо – гильза». Третий этап включал обработку статистических данных, обработку данных полученных непосредственно во время проведения эксперимента с введенными неисправностями ЦПГ и обработку данных, полученных при определении влияния на показания пневмотестера соотношения неплотностей в сопряжении «поршень – кольцо – гильза».

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, цилиндропоршневая группа, пневмотестер.

Для цитирования: Грунин К.Е. Совершенствование диагностики цилиндропоршневой группы методом пневмотестирования // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 13–21. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-13-21.

The task of author's research was to determine the emerging leaks when compressed air is supplied to the above-piston space under pressure of 4, 5 and 6 kgf / cm², respectively.

To obtain more reliable results, measurements of the leakage of the above-piston space by pneumatic testing should be performed three times. The deterioration of this tribo-coupling should be assessed by the average values of the obtained values. In order to identify the analytical relationships between the readings of the pneumotester and various types of cylinder malfunctions, it is necessary, to simulate during the experiment the malfunctions most often encountered during ordinary engine operation that affect the tightness of the combustion chamber.

The planned experimental studies were carried out in strict accordance with the tasks and included three stages.

The first stage included the collection and analysis of statistical data on the dependence of engine pneumatic testing indications on various types of cylinder-piston group (CPG) malfunctions during ordinary operation, as well as pneumatic testing of engine cylinders undergoing major repairs and their CPG micrometer size. At the second stage, an experiment to simulate malfunctions on an experimental setup and on a working engine, as well as to determine the influence on the readings of the pneumatic tester of the ratio of leaks in the "piston – ring – sleeve" interface was carried out. The third stage included the processing of statistical data, processing of the data obtained directly during the experiment with the introduced CPG malfunctions and the processing of the data obtained when determining the influence of the leakage ratio in the "piston – ring – sleeve" interface on the readings of the pneumatic tester.

Keywords: internal combustion engine, cylinder-piston group, pneumotester.

Cite as: K.E. Grunin Improving diagnostics of the cylinder-piston group by pneumatic testing. Traktory i sel'khoz-mashiny. 2021. No 4, pp. 13–21 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-13-21.

Введение

Главнейшей проблемой АПК Российской Федерации является то, что ежегодно сельскохозяйственными предприятиями страны тратится до 50 млн рублей бюджета на поддержание в работоспособном состоянии изношенной техники со сроком службы более 20 лет, процент износа которой составляет до 70 %. Такие затраты составляют значительную часть всего валового продукта сельского хозяйства.

Актуальность разработки нового метода оценки состояния цилиндропоршневой группы (ЦПГ) обусловлена тем, что по статистике основной причиной постановки двигателя на ремонт является состояние его ЦПГ и ее отказы [9, 10]. В качестве этого метода и предлагается разработка дефференцированной методики оценки состояния гильз методом пневмотестирования.

Метод пневмотестирования был разработан еще в конце XX века, и в последствии на его основе были созданы различные приборы для оценки состояния ЦПГ. В целом с момента разработки данная методика хорошо зарекомендовала себя, и была накоплена большая статистическая база; однако до сих пор не существует методики, по которой можно было бы с точностью судить о величине износа гильзы цилиндра, не используя другие способы диагностики [1, 4, 5].

Пневматические способы в какой-то мере имитируют условия работы двигателя, так как производится уплотнение рабочего надпоршневого пространства. Однако в существующих исследованиях по пневматическому диагностированию ЦПГ видно, что данные методы дают лишь обобщенную оценку состояния узла, не указывая на конкретные неисправности, величину износа, и, зачастую, не дают информации о необходимости капитального ремонта [6–8].

Из пневматических методов диагностирования наибольший интерес представляет метод пневмотестирования. Однако исследования этого метода не раскрывают теоретических закономерностей фиксируемых им параметров. Все это стимулирует поиск путей совершенствования диагностирования ЦПГ ДВС данным методом.

Цель исследований

Нахождение зависимостей между износом гильзы ДВС и показаниями пневмотестатора

для упрощения безразборной диагностики ЦПГ.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования по определению соотношения неплотностей сопряжения «гильза – кольцо – поршень» при пневмотестировании были выбраны комплекты ЦПГ двигателей ЗМЗ-53 и КАМАЗ 720, взятые из рядовой эксплуатации.

Данные комплекты принадлежали двигателям, поступившим в ремонт и по результатам дефектации признанным негодными к эксплуатации.

Для исследования были отобраны несколько комплектов, имеющих различные характер и степень износа.

Исследование по определению соотношения неплотностей сопряжения «гильза – кольцо – поршень» при пневмотестировании проводилось с помощью пневмотестатора, изготовленного на кафедре «Технические и биологические системы» ГОУ ВО НГИЭУ (рис. 1).

Воздух под давлением, создаваемым компрессором, подается под давлением в регулятор, с помощью которого устанавливается заданное рабочее давление $P_{\text{раб}}$; оно поддерживается во время проведения эксперимента. Затем воздух попадает в надпоршневое пространство, где его давление будет зависеть от величины утечек через сопряжение «поршень – цилиндр – гильза». $P_{\text{изм}}$ определяется измерительным манометром; и чем больше величина утечек воздуха, тем оно будет меньше. Для контроля рабочего и измерительного давления применены манометры классов точности 3 и 5 соответственно.

Для продувки выбранных комплектов ЦПГ используется специально изготовленное устройство, представленное на рис. 2.

Устройство состоит из двух крышек, между которыми устанавливается проверяемый комплект ЦПГ. Крышки стягиваются четырьмя шпильками, зажимая гильзу. Для предотвращения утечек воздуха из надпоршневого пространства между гильзой и верхней крышкой устанавливается прокладка. Для проверки неплотностей ЦПГ поршень устанавливается в пяти различных положениях: ВМТ, при повороте коленвала на 45°, 90°, 135° и в НМТ. Фиксация поршня осуществляется специальным фланцем, устанавливаемым в нижнюю головку шатуна.

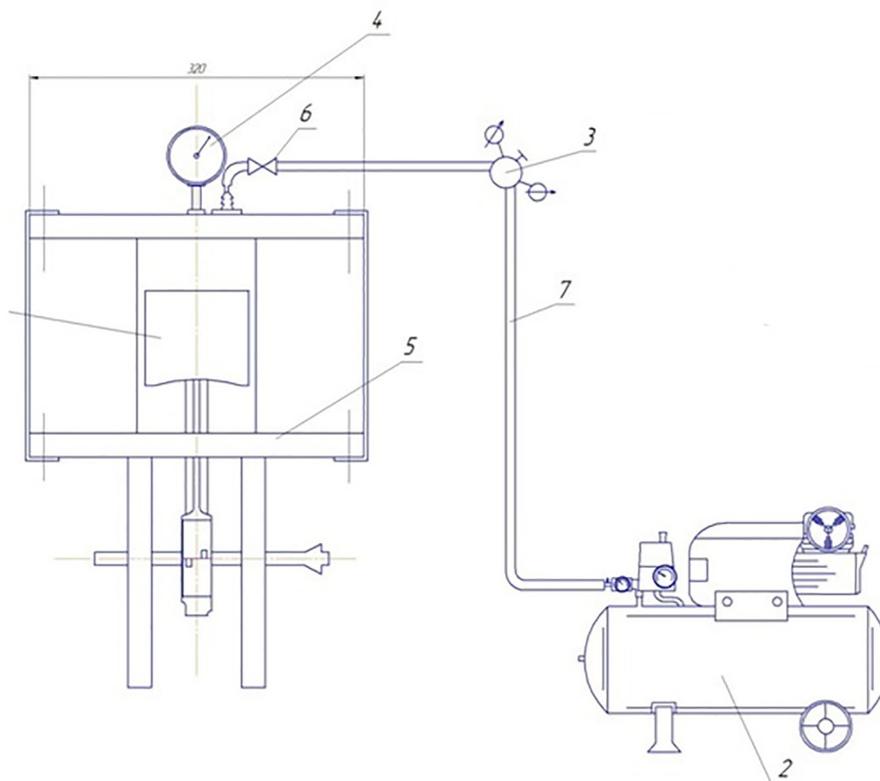


Рис. 1. Схема устройства:

1 – ЦПГ; 2 – компрессор; 3 – редуктор; 4 – манометр; 5 – анализатор герметичности цилиндров;
6 – кран; 7 – шланг

*Fig. 1. Diagram of the device: 1 – CPG; 2 – compressor; 3 – reducer; 4 – pressure gauge;
5 – cylinder tightness analyzer; 6 – tap; 7 – hose*



Рис. 2. Устройство в сборе

Fig. 2. Assembled device

Пневматическая характеристика снимается в пяти точках, соответствующих повороту коленчатого вала ДВС на угол 45° , 90° , 135° , а также в ВМТ и НМТ.

Дополнительно проводятся измерения неплотностей при различных положениях поршневых колец:

1) замки колец разведены на 180° относительно друг друга перпендикулярно оси поршневого пальца;

2) замки колец располагаются по одной оси;

3) замки колец располагаются случайным образом.

По этой же методике фиксируется величина неплотности у всех комплектов ЦПГ.

Для того чтобы выявить аналитические зависимости между показаниями пневмотестора и различными видами неисправностей цилиндра, необходимо в процессе проведения эксперимента смоделировать наиболее часто встречающиеся при рядовой эксплуатации двигателя неисправности, которые влияют на герметичность камеры сгорания.

Общеизвестно, что наиболее часто встречающимися неисправностями такого типа являются:

- сильный износ гильзы цилиндра;
- закоксовывание компрессионных колец;
- заклинивание компрессионных колец;
- поломка компрессионных колец;
- нарушение герметичности клапанного механизма;

– различные неисправности маслосъемных колец.

Перед проведением эксперимента было проведено микрометричное исследование ЦПГ выбранного двигателя и замерены исходные значения компрессии. Микрометрические замеры износа гильз ДВС проводились при различных положениях коленчатого вала, а именно: в ВМТ, НМТ и углах поворота 45°, 90°, 135°. Данные измерения были проведены в четырех плоскостях: пальца, качания шатуна и со смещением на угол 45° от них.

Чтобы определить зависимость между показаниями пневмотестера и параметрами предельно изношенной гильзы, заменили одну из гильз на изношенную.

Чтобы смоделировать отказы, связанные с заклиниванием колец, вручную заклинили компрессионные кольца путем их вклеивания в канавку с одной стороны от замка по схеме, приведенной на рис. 3.

Для моделирования поломки колец, удалили их. Чтобы симитировать неплотности клапанного механизма ГРМ, перемещали регулировочный винт коромысла. Зависимость величины подъема впускного клапана от пло-

щади проходного сечения изменяется по следующему закону [2, 3, 11]:

$$h_{\text{кл}} = \frac{f_{\text{кл}}}{\pi(d_2 \cos \alpha + h_{\text{кл}} \sin \alpha \cos^2 \alpha)},$$

где $h_{\text{кл}}$ – высота подъема клапана, мм; $f_{\text{кл}}$ – площадь проходного сечения клапана, мм²; d_2 – диаметр горловины клапана, мм; α – угол наклона фаски клапана, град.

По результатам расчета был построен график зависимости величины подъема впускного клапана от площади проходного сечения (рис. 4).

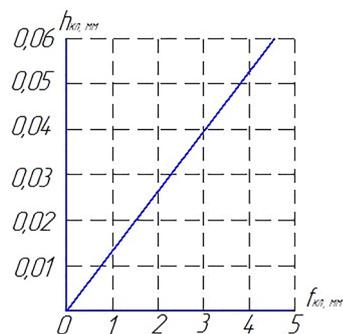


Рис. 4. График зависимости величины подъема впускного клапана от площади проходного сечения

Fig. 4. The graph of the dependence of the amount of lift of the intake valve on the flow area

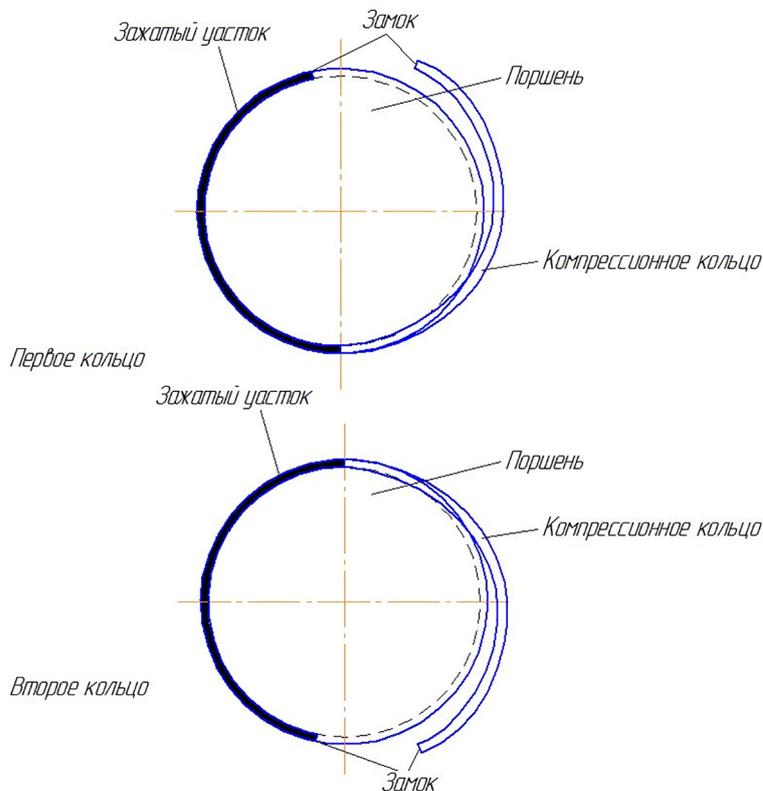


Рис. 3. Схема защемления колец

Fig. 3. Ring pinching scheme

Согласно данному графику подберем величину необходимого перемещения клапана для обеспечения нужной неплотности. Перемещение же клапана обеспечим простым ввертыванием регулировочного винта коромысла механизма газораспределения двигателя.

Результаты и обсуждение

Провели замер показателей пневмотестом. В цилиндры в обоих случаях подавался сжатый воздух под давлением 6 кг/см².

Результаты замеров представлены в таблицах 1 и 2. Под номером 1 в таблицах показаны результаты для изношенной гильзы с работающими компрессионными кольцами, под номером 2 – с введенной неисправностью в виде закоксовки компрессионных колец, под номером 3 – с введенной неисправностью в виде поломки колец, под номером 4 – с введенной неисправностью в виде поломки маслосъемных колец.

Помимо рассмотренных неисправностей, в рядовой эксплуатации двигателей иногда наблюдается так называемый насосный эффект колец, когда масло поступает в надпоршневое пространство ДВС. Также попадание масла может происходить из-за износа направляющих втулок клапанов ГРМ и негерметичности сальников вала турбокомпрессора.

Для имитации и моделирования попадания масла в надпоршневое пространство в гильзу было добавлено моторное масло в размере 25 мг, предварительно подогретое до рабочей температуры.

Соответственно проведя продувку гильзы с данной введенной неисправностью, получили показания прибора.

Эксперимент по введению неисправностей показал, что при увеличении овальности и конусности изношенной гильзы двигателя КАМАЗ 740 показания пневмотестора снижаются с 4,2 до 3,4 кг/см², при закоксовке колец – с 3,5 до 3 кг/см², а при поломке их – с 2 до 1,5 кг/см². Для гильзы двигателя ЗМЗ-53 показания пневмотестора снижаются с 3,7 до 3,4 кг/см², при закоксовке колец – с 3,3 до 3 кг/см², а при их поломке – с 1,8 до 1,35 кг/см².

Так же подтвердилось влияние избыточного количества масла в надпоршневом пространстве на увеличение показаний пневмотестора. Исходя из данных таблиц 3 и 4, видно, что они увеличилась для двигателя КАМАЗ с 4,5 до 4 кг/см², и для двигателя ЗМЗ-53 – с 4,2 до 3,9 кг/см².

Помимо описанных выше неисправностей, также моделировалась величина неплотности клапана ГРМ путем увеличения величины его открытия на $h_{кл.}$

Таблица 1

Результаты замеров показателей гильзы КАМАЗ 740

Table 1. The results of measurements of the indicators of the KAMAZ 740 sleeve

Положение КШМ, град. поворота коленвала	Показания манометра пневмотестора, кг/см ²			
	1	2	3	4
ВМТ 0°	3,4	3	1,5	3,4
45°	3,7	3,1	1,7	3,7
90°	3,8	3,2	1,8	3,8
135°	4	3,3	1,9	4
НМТ 180°	4,2	3,5	2	4,2

Таблица 2

Результаты замеров показателей гильзы ЗМЗ-53

Table 2. The results of measurements of the indicators of the ZMZ-53 sleeve

Положение КШМ, град. поворота коленвала	Показания манометра пневмотестора, кг/см ²			
	1	2	3	4
ВМТ 0°	3,9	3	1,5	3,9
4°	3,8	3,1	1,7	3,8
90°	3,65	3,2	1,8	3,65
135°	3,55	3,3	1,9	3,55
НМТ 180°	3,5	3,5	2	3,5

Таблица 3

Результат эксперимента с попаданием масла в надпоршневое пространство гильзы КАМАЗ 740

Table 3. The result of the experiment with oil getting into the above-piston space of the KAMAZ 740 sleeve

Положение КШМ, град. поворота коленвала	Показания манометра пневмотестора, кг/см ²
ВМТ 0°	4
45°	4,1
90°	4,2
135°	4,3
НМТ 180°	4,5

Таблица 4

Результат эксперимента с попаданием масла в надпоршневое пространство гильзы ЗМЗ-53

Table 4. The result of the experiment with oil getting into the above-piston space of the ZMZ-53 sleeve

Положение КШМ, град. поворота коленвала	Показания манометра пневмотестора, кг/см ²
ВМТ 0°	3,9
45°	4
90°	4
135°	4,1
НМТ 180°	4,2

Для этого исследуемые гильзы устанавливались на двигатели, имеющие рабочие головки блока цилиндров.

Согласно исследованиям величина неплотности клапана в процессе рядовой эксплуатации изменяется от 0 до 4 мм². Но, как известно повреждения и прогар увеличивают эту величину гораздо больше.

Величину перемещения клапана задавали в соответствии с зависимостью, представленной на рис. 4. Полученные данные по неплотностям клапанов указаны в таблицах 5 и 6.

Проведя эксперимент, видим, что при неплотности клапана в размере 3 мм² величина

показаний пневмотестора практически никак не отличается от ее же величины при износе колец, следовательно при таких малых значениях неплотности данным диагностическим методом распознать прогар клапна на данной стадии практически невозможно без применения других способов диагностирования.

Также установлено что при увеличении неплотности клапана с 10 до 20 мм² показания прибора резко снижаются, вплоть до нуля.

В соответствии с методикой исследования продувке с помощью собранной установки были подвергнуты гильзы КАМАЗ 740 и ЗМЗ-53.

Таблица 5

Показания по двигателю КАМАЗ 740

Table 5. Indications for the KAMAZ 740 engine

Величина неплотности клапана, мм ²	Показания пневмотестора, кг/см ²
3	4,2
10	1,9
20	0

Таблица 6

Показания по двигателю ЗМЗ-53

Table 6. Indications for the ZMZ-53 engine

Величина неплотности клапана, мм ²	Показания пневмотестора, кг/см ²
3	3,7
10	1,7
20	0

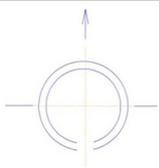
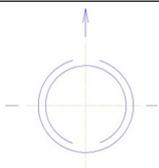
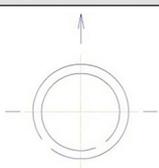
С целью получения более достоверных данных по зависимости показаний пневмотестатора от износа гильзы двигателя эксперимент

проводился на специально изготовленной лабораторной установке. Результаты эксперимента представлены в таблицах 7 и 8.

Показания прибора в гильзе КАМАЗ 720

Таблица 7

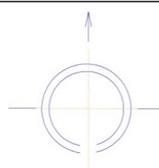
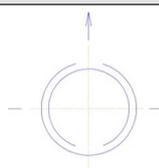
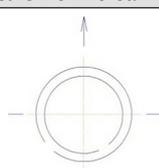
Table 7. Instrument readings in the KAMAZ 720 sleeve

Положение КШМ	Показания прибора			Положение замков
	$6 \cdot 10^5$ МПа	$5 \cdot 10^5$ МПа	$4 \cdot 10^5$ МПа	
0° (ВМТ)	3,1	2	1,7	
45°	3,5	2,1	1,7	
90°	3,6	2,4	2	
135°	3,8	2,6	2,1	
180° (НМТ)	3,9	2,8	2,3	
Положение КШМ	Показания прибора			Положение замков
	$6 \cdot 10^5$ МПа	$5 \cdot 10^5$ МПа	$4 \cdot 10^5$ МПа	
0° (ВМТ)	3,4	2,8	1,9	
45°	3,6	2,9	1,9	
90°	3,7	3	2	
135°	4,1	3,5	2,5	
180° (НМТ)	4,3	3,6	2,7	
Положение КШМ	Показания прибора			Положение замков
	$6 \cdot 10^5$ МПа	$5 \cdot 10^5$ МПа	$4 \cdot 10^5$ МПа	
0° (ВМТ)	3,4	2,7	1,9	
45°	3,7	2,8	2,2	
90°	3,8	3	2,3	
135°	4	3,5	2,6	
180° (НМТ)	4,2	3,6	2,7	

Показания прибора в гильзе ЗМЗ-53

Таблица 8

Table 8. Instrument readings in the ZMZ-53 sleeve

Положение КШМ	Показания прибора			Положение замков
	$6 \cdot 10^5$ МПа	$5 \cdot 10^5$ МПа	$4 \cdot 10^5$ МПа	
0° (ВМТ)	3,8	2,9	2,2	
45°	3,7	2,7	2,1	
90°	3,6	2,6	2	
135°	3,55	2,55	1,8	
180° (НМТ)	3,5	2,5	1,6	
Положение КШМ	Показания прибора			Положение замков
	$6 \cdot 10^5$ МПа	$5 \cdot 10^5$ МПа	$4 \cdot 10^5$ МПа	
0° (ВМТ)	4	3,5	2,7	
45°	3,9	3,1	2,6	
90°	3,7	2,8	2,4	
135°	3,6	2,6	2,2	
180° (НМТ)	3,55	2,55	2,1	
Положение КШМ	Показания прибора			Положение замков
	$6 \cdot 10^5$ МПа	$5 \cdot 10^5$ МПа	$4 \cdot 10^5$ МПа	
0° (ВМТ)	3,9	3,4	2,5	
45°	3,8	3,1	2,4	
90°	3,65	2,7	2,2	
135°	3,55	2,5	2	
180° (НМТ)	3,5	2,5	1,8	

Вывод

Согласно полученным данным, зависимость показаний пневмотестера $P_{ц}$ от величины износа гильзы И аппроксимируется следующими выражениями:

– для плоскости качения шатуна при рабочем давлении 6 кг/см²:

$$И = \frac{12,5 - P_{ц}}{21};$$

– для плоскости качения шатуна при рабочем давлении 5 кг/см²:

$$И = \frac{23 - P_{ц}}{48};$$

– для плоскости качения шатуна при рабочем давлении 4 кг/см²:

$$И = \frac{17,3 - P_{ц}}{36};$$

– для плоскости поршневого пальца при рабочем давлении 6 кг/см²:

$$И = \frac{12,3 - P_{ц}}{21};$$

– для плоскости поршневого пальца при рабочем давлении 5 кг/см²:

$$И = \frac{22,5 - P_{ц}}{48};$$

– для плоскости поршневого пальца при рабочем давлении 4 кг/см²:

$$И = \frac{17 - P_{ц}}{36}.$$

Литература

1. Вельских В.И. Диагностика технического состояния и регулировка тракторов. М.: Колос, 1973. 494 с.
2. Гинцбург Б.Я. Теория и расчет поршневых колец. М.: Mashgiz, 1945. 365 с.
3. Гинцбург Б.Я. Теория поршневого кольца. М.: Машиностроение, 1979. 425 с.
4. Карагодин В.И., Шестопапов С.К. Устройство и техническое обслуживание грузовых автомобилей. М.: Транспорт, 1994. 329 с.
5. Карпов Л.И. Диагностика и техническое обслуживание тракторов и комбайнов. М.: Колос, 1972. 320 с.
6. Раевский М.А., Обметица В.П. Справочник по ремонту и обслуживанию автомобилей ВАЗ.

Оборудование и инструмент. Киев: Вища школа, 1991. 401 с.

7. Сазонов К.А. Пневматический способ диагностики ЦПГ ДВС при малых рабочих давлениях // Вестник ЧГАУ. 1994. Т. 8. С. 54–57.
8. Хитрюк В.А., Баранов Л.Ф. Справочник по ремонту автотракторных двигателей. Минск: Ураджай, 1992. 273 с.
9. Черноиванов В.И., Северный А.Э., Халфин М.А., Халфин С.М., Орлик Л.С., Сидыганов Ю.Н. Ресурсосбережение при технической эксплуатации сельскохозяйственной техники. М.: ГОСНИТИ – ФГНУ «Росинформагротех». Ч. 1, 2. 2002. 780 с.
10. Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учебное пособие. Москва – Челябинск: ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. 992 с.
11. Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента. Л.: Машиностроение, 1990. 377 с.

Reference

1. Vel'skikh V.I. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya i regulirovka traktorov [Diagnostics of the technical condition and adjustment of tractors]. Moscow: Kolos Publ., 1973. 494 p.
2. Gintsburg B.YA. Teoriya i raschet porshnevyykh kolets [Theory and calculation of piston rings]. Moscow: Mashgiz Publ., 1945. 365 p.
3. Gintsburg B.YA. Teoriya porshneвого kol'tsa [Piston ring theory]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1979. 425 p.
4. Karagodin V.I., Shestopalov S.K. Ustroystvo i tekhnicheskoye obsluzhivaniye gruzovykh avtomobiley [Construction and maintenance of trucks]. Moscow: Transport Publ., 1994. 329 p.
5. Karpov L.I. Diagnostika i tekhnicheskoye obsluzhivaniye traktorov i kombaynov [Diagnostics and maintenance of tractors and combines]. Moscow: Kolos Publ., 1972. 320 p.
6. Rayevskiy M.A., Obmetitsa V.P. Spravochnik po remontu i obsluzhivaniyu avtomobiley VAZ. Oborudovaniye i instrument [Reference book on the repair and maintenance of VAZ automobiles. Equipment and tools]. Kiyev: Vishcha shkola Publ., 1991. 401 p.
7. Sazonov K.A. Pneumatic method for diagnosing the internal combustion engine's CPG at low operating pressures. Vestnik CHGAU. 1994. V. 8, pp. 54–57 (in Russ.).

8. Khitryuk V.A., Baranov L.F. Spravochnik po remontu avtotraktornykh dvigateley [Handbook for the repair of automobile and tractor engines]. Minsk: Uradzhay Publ., 1992. 273 p.
9. Chernoi Ivanov V.I., Severnyy A.E., Khalfin M.A., Khalfin S.M., Orsik L.S., Sidyganov YU.N. Resursoberezeniye pri tekhnicheskoy ekspluatatsii sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Resource saving in the operation of agricultural machinery]. Moscow: GOSNITI – FGNU «Rosin-formagroteKH». CH. 1, 2. 2002. 780 p.
10. Chernoi Ivanov V.I., Blednykh V.V., Severnyy A.E. Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont mashin v sel'skom khozyaystve [Maintenance and repair of machinery in agriculture]: Uchebnoye posobiye. Moscow – Chelyabinsk: GOSNITI, CHGAU Publ., 2003. 992 p.
11. Shul'ts V.V. Forma yestestvennogo iznosa detaley mashin i instrumenta [The form of natural wear and tear of machine parts and tools]. Leningrad: Mashinostroyeniye Publ., 1990. 377 p.

ФОРМИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСМИССИЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

FORMATION OF THE DYNAMIC SYSTEM OF THE TEST BENCH FOR TRANSMISSIONS AT THE DESIGN STAGE

З.А. ГОДЖАЕВ¹, член-корр. РАН, д.т.н.
В.В. ШЕХОВЦОВ², д.т.н.
М.В. ЛЯШЕНКО², д.т.н.
В.К. МЕРЛЯК²
Н.В. ФИЛИПОВ²

¹ ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр (ВИМ)», Москва, Россия, fic51@mail.ru

² ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ), Волгоград, Россия, shehovtsov@vstu.ru

Z.A. GODZHAYEV¹, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dsc in Engineering
V.V. SHEKHOVTSOV², Dsc in Engineering
M.V. LYASHENKO², Dsc in Engineering
V.K. MERLYAK²
N.V. FILIPPOV²

¹ Federal Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia, fic51@mail.ru

² Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, shehovtsov@vstu.ru

В материалах статьи анализируется проблема несоответствия динамических свойств трансмиссии испытательного стенда и трансмиссии реальной машины, вследствие чего при воспроизведении на стенде нагрузок динамического характера в ряде случаев после испытаний получаются результаты, не соответствующие результатам эксплуатации. Существенно отличаются обычно состав и схема передачи силового потока, а также упруго-инерционные параметры элементов упомянутых трансмиссий. Так, в состав стендов для испытания трансмиссий обычно не включают ходовую систему машины, подвеску и ряд других узлов и агрегатов; привод испытательного стенда также обычно осуществляется электрической машиной, а не двигателем внутреннего сгорания. В эксплуатации на динамическую нагруженность трансмиссии машины оказывает влияние совместная работа каждого из ее узлов, имеющего прямое или косвенное влияние на прохождение силового потока через трансмиссию. При стендовых же испытаниях в режиме переменных нагрузок на эту нагруженность оказывает влияние совместная работа испытуемой трансмиссии с узлами трансмиссии стенда, имеющими иные динамические характеристики.

Авторами предложена методика, позволяющая на стадии проектирования формировать совокупность динамических параметров элементов стенда таким образом, чтобы динамические свойства трансмиссии стенда соответствовали динамическим свойствам трансмиссии реальной машины. Предложен способ сближения динамической нагруженности трансмиссий на стенде и в составе реальной машины за счет целенаправленного формирования на этапе проектирования собственных частотных характеристик трансмиссии стенда таким образом, чтобы они в максимальной степени соответствовали характеристикам трансмиссии машины. Для этого за счет варьирования величин инерционных масс и упругих связей элементов трансмиссий стендов формируются спектры их собственных частот таким образом, чтобы в их валопроводах на режимах, на которых накапливается основная часть усталостных повреждений, формировалась сходная с наблюдаемой в трансмиссии реальной машины картина крутильных колебаний.

Ключевые слова: стендовые испытания трансмиссий, динамическая система стенда, динамическая система реальной машины, методика приближения условий нагружения на стенде к условиям эксплуатации.

Для цитирования: Годжаев З.А., Шеховцов В.В., Ляшенко М.В., Мерляк В.К., Филиппов Н.В. Формирование динамической системы стенда для испытания трансмиссий на этапе проектирования // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 22–32. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-22-32.

The problem of the discrepancy between the dynamic properties of the transmission on the test bench and the transmission of production vehicle was analyzed. When the loads of a dynamic nature are reproduced on the test bench, in a number of cases, after tests, there are obtained the results that do not correspond to the results of its operation. Usually the composition and scheme of the power flow transmission, as well as the elastic-inertial parameters of the elements of the mentioned transmissions, differ significantly. The test bench for transmissions usually does not include the chassis of vehicle, suspension and a number of other components and assemblies. The test bench is also usually driven by an electric machine rather than an internal combustion engine. During operation the dynamic loading of the vehicle's transmission is influenced by the joint work of each of its units, which has a direct or indirect effect on the passage of the power flow through the transmission. In the mode of variable loads of bench tests, this loading is influenced by the joint operation of the tested transmission with the transmission units of the test bench, which have different dynamic characteristics.

The authors proposed the method, which allows at the design stage to form a set of dynamic parameters of the stand elements in such a way that the dynamic properties of the stand transmission correspond to the dynamic properties of the transmission of a production vehicle. There was offered a method for converging the dynamic loading of transmission on the test bench and as part of a production vehicle due to the purposeful formation at the design stage of the intrinsic frequency characteristics of the test bench transmission so that they correspond to the maximum extent to the characteristics of the vehicle transmission. The varying of the values of the inertial masses and elastic connections of the transmission elements of the test benches, the spectra of their natural frequencies are formed in such a way that in shaft line on modes, when the main part of fatigue damage accumulates, a picture of torsional vibrations is similar to those observed in the transmission of a production vehicle.

Keywords: bench tests of transmissions, dynamic system of the bench, dynamic system of a production vehicle, technique for approximating loading conditions on the bench to operating conditions.

Cite as: Godzhayev Z.A., Shekhovtsov V.V., Lyashenko M.V., Merlyak V.K., Filippov N.V. Formation of the dynamic system of the test bench for transmissions at the design stage. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2021. No 4, pp. 22–32 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-22-32.

Введение

С каждым годом увеличивается количество и разнообразие создаваемых во всем мире новых технических объектов, в том числе наземных тяговых и транспортных средств. Конкуренция на рынке вынуждает производителей постоянно сокращать сроки разработки и подготовки производства машин, поэтому качество части принимаемых в сжатые сроки конструктивных решений может оказаться неудовлетворительным. Работоспособность и качественные показатели новых машин проверяют на основе испытаний после сборки опытных образцов или выпуска опытной партии машин или узлов. При этом испытания могут быть эксплуатационными или стендовыми [1–4].

Наиболее достоверную информацию по этим вопросам можно получить на основе эксплуатационных испытаний, когда машина или узел подвергается нагрузкам, характерным для условий ее работы в эксплуатации. Однако такие испытания обладают рядом недостатков. Во-первых, они длительные, а создателям новой техники информация о качестве нового узла нужна как можно быстрее. Во-вторых, испытания дорогие, так как для их проведения нужны средства на оплату труда коллектива испытательной бригады, на топливо, на износ самого транспортного средства, на аренду полигона и т.д. В-третьих, возможность проведения таких испытаний может зависеть от погодных условий – осадки, мороз, жара, сильный ветер могут помешать их проведению. В-четвертых, в полевых условиях для анализа работы узлов используется переносная аппаратура, которая обычно обладает меньшими точностью и другими характеристиками по сравнению со стационарной. Поэтому в большинстве случаев качество новых узлов и агрегатов проверяется в результате испытаний на стендах.

Стенды для испытаний узлов и агрегатов транспортных средств подразделяются на исследовательские, на которых проводятся кратковременные испытания с целью определения некоторых интересующих конструкторов параметров узлов или анализа их работоспособности, и ресурсные, на которых проводят длительные испытания для определения ресурсных показателей узла или машины в целом.

Стенды для ресурсных испытаний, в свою очередь, подразделяются на стенды, в которых узел испытывается в режиме постоянного нагружения, и на стенды, воспроизводящие на испытуемом объекте динамические нагрузочные режимы. В зависимости от этого используются разные нагружающие устройства.

Стенды для ресурсных испытаний могут работать по принципу открытого либо замкнутого силового контура. При работе с открытым контуром вся энергия приводного двигателя поглощается нагружающим устройством, в качестве которого обычно используется тот или иной тормоз. При работе с замкнутым контуром приводной двигатель компенсирует только энергию, затрачиваемую на трение в силовой цепи стенда, а испытуемый объект нагружается крутящим моментом, циркулирующим в замкнутом силовом контуре. Таким образом, этот способ испытаний является гораздо более экономичным.

В большинстве случаев ресурсные показатели транспортного средства в определяющей степени зависят от ресурсных показателей трансмиссий, в которые входят нагруженные узлы, участвующие в передаче силового потока от двигателя к ходовой системе. Чтобы результаты испытаний были достоверными, режимы испытаний должны соответствовать режимам эксплуатационной нагруженности трансмис-

сий. Однако в общем случае динамические характеристики трансмиссий тягово-транспортных средств и стендов существенно различны [5]. Существенно разными обычно бывают их состав и схема передачи силового потока, а также упруго-инерционные параметры входящих в их состав элементов. Так, в состав стендов для испытания трансмиссий обычно не включают ходовую систему машины, подвеску и ряд других узлов и агрегатов; привод испытательного стенда также обычно осуществляется электрической машиной, а не двигателем внутреннего сгорания [6]. В эксплуатации на динамическую нагруженность трансмиссии машины оказывает влияние совместная работа каждого из ее узлов, имеющего прямое или косвенное влияние на прохождение силового потока через трансмиссию [7]. При стендовых же испытаниях в режиме переменных нагрузок на эту нагруженность оказывает влияние совместная работа испытываемой трансмиссии с узлами стенда, имеющими иные динамические характеристики [5]. Вследствие этого результаты испытаний в ряде случаев оказываются не отвечающими результатам эксплуатации.

На динамическую нагруженность трансмиссии в эксплуатации и при стендовых испытаниях существенное влияние оказывают крутильные колебания в валопроводе, приводящие в эксплуатации к постоянному нарушению законов движения деталей [7], а при испытаниях – к искажению режима испытаний. Характер крутильных колебаний [8] в трансмиссиях машины и стенда обычно бывает значительно разным вследствие отмеченной разности динамических характеристик их составных элементов. Эта разность особенно велика, когда частота изменения воспроизводимой на стенде нагрузки близка к одной из собственных частот трансмиссии стенда [9].

Стенды с замкнутым силовым контуром используются чаще всего для ресурсных испытаний трансмиссий. При этом чем чаще и резче изменяется во время испытаний нагрузка отдельных элементов валопровода, тем большее влияние на результаты испытаний имеет упомянутое различие динамических характеристик трансмиссий стенда и реальной машины [10].

В связи с этим необходимо на стадии проектирования формировать совокупность динамических параметров элементов трансмиссии стенда таким образом, чтобы ее динамические

свойства соответствовали динамическим свойствам трансмиссии реальной машины.

Цель исследований

Разработка методики формирования на этапе проектирования совокупности динамических параметров элементов испытательного стенда с целью сближения динамических свойств его силовой передачи со свойствами динамической системы силовой передачи реальной машины и повышения за счет этого достоверности результатов стендовых испытаний.

Материалы и методы

Одним из способов сближения динамической нагруженности трансмиссий на стенде и в составе реальной машины является целенаправленное формирование на этапе проектирования собственных частотных характеристик трансмиссии стенда таким образом, чтобы они в максимальной степени соответствовали характеристикам трансмиссии машины.

Амплитуды крутильных колебаний масс трансмиссии вдали от резонанса обычно незначительны и не оказывают заметного влияния на нагруженность деталей [8, 9]. Наибольшая нагруженность имеет место на резонансных и окolorезонансных режимах, на которых накапливается основная часть усталостных повреждений деталей [10]. Следовательно, для сближения условий динамической нагруженности деталей трансмиссии в машине и на стенде необходимо, чтобы частоты резонансных колебаний масс трансмиссий стендов и реальных машин совпадали или были близки, то есть чтобы собственные частотные спектры трансмиссий стендов включали в себя основные частоты из спектров трансмиссий машин [11]. Для этого за счет варьирования величин инерционных масс и упругих связей элементов трансмиссий стендов необходимо сформировать спектры их собственных частот таким образом, чтобы в их валопроводах на режимах, на которых накапливается основная часть усталостных повреждений, формировалась сходная с наблюдаемой в трансмиссии реальной машины картина крутильных колебаний.

Предложенная авторами методика формирования собственных частотных характеристик трансмиссии стенда, позволяющая сближать собственные частотные свойства трансмиссий испытательного стенда и реальной машины, предусматривает следующие этапы [11].

1. Определение возможностей получения собственных частот трансмиссии машины в спектре собственных частот стенда за счет изменения упруго-инерционных параметров его элементов и их сочетаний.

2. Исследование влияния параметров каждого из элементов трансмиссии стенда на изменение собственных частот.

3. Выбор элементов силовой передачи стенда, изменение упруго-инерционных параметров которых конструктивно наименее сложно.

4. Выполнение расчетных исследований и определение на их основе значений упруго-инерционных параметров изменяемых элементов стенда, при которых возможно получение в его спектре заданных собственных частот силовой передачи машины.

Результаты и обсуждение

В соответствии с методикой выполнено сближение собственных частотных свойств трансмиссий трактора ДТ-175С «Волгарь» и разработанного в ВолГТУ стенда с замыканием силового контура гидрообъемными трансмиссиями [6]. Общий вид стенда показан на рис. 1, гидрокинематическая схема – на рис. 2.

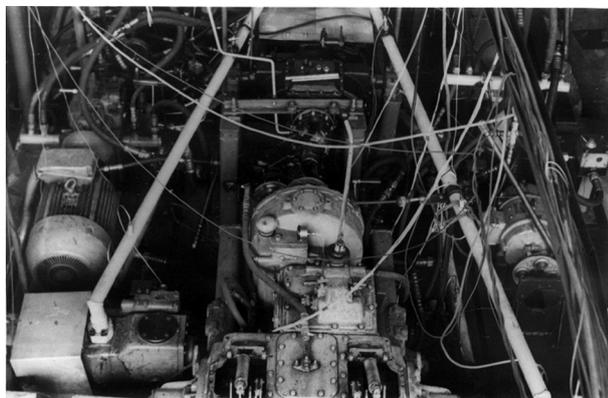


Рис. 1. Общий вид стенда с гидрозамкнутым силовым контуром

Fig. 1. General view of the test bench with a hydro-closed power circuit

Силовой поток по каждому борту стенда замыкается регулируемыми гидрообъемными передачами, включающими в себя соединенные с конечными передачами через согласующие редукторы гидронасосы, напорные и сливные магистрали которых сообщены с гидромоторами, связанными с входным валом испытуемой трансмиссии через раздаточную коробку. Привод стенда осуществляется ба-

лансирной электрической машиной через вал отбора мощности. Режим переменного нагружения в стенде реализуется за счет подъема и сброса давления в напорных магистралях гидropередач при помощи специальных гидropульсаторов. За счет малой инерционности рабочих органов пульсаторов возможна реализация процессов нагружения с высокими частотами.

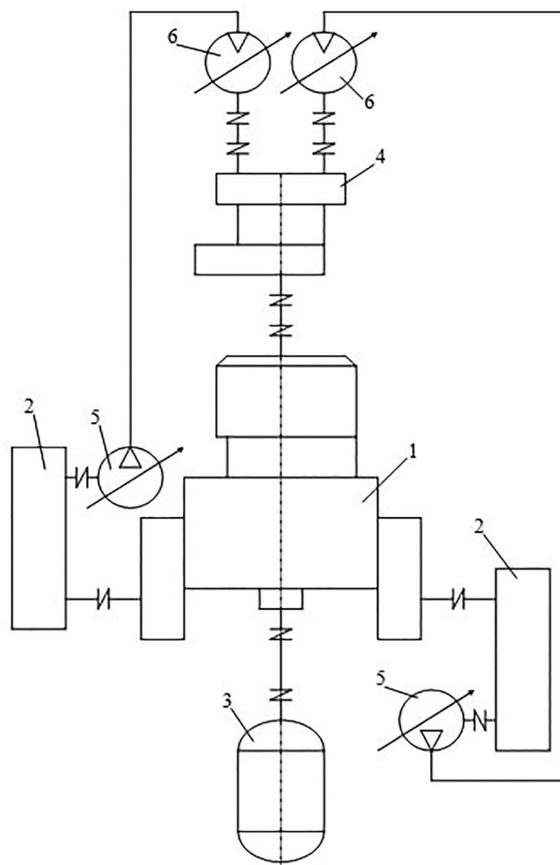


Рис. 2. Гидрокинематическая схема стенда:

1 – испытуемая трансмиссия с гидротрансформатором; 2 – согласующий редуктор; 3 – приводная балансирующая машина; 4 – раздаточная коробка; 5 – гидронасос системы нагружения; 6 – гидромотор системы нагружения

Fig. 2. Hydrokinematic scheme of the test bench: 1 – tested transmission with a torque converter; 2 – gear reducer; 3 – driven balancing device; 4 – transfer case; 5 – loading system hydraulic pump; 6 – loading system hydraulic motor

Начальная и редуцированная динамические модели трансмиссии стенда приведены на рис. 3, трактора ДТ-175С – на рис. 4. Полная модель трансмиссии трактора включает в себя 33 сосредоточенные массы, редуцированная – 11, соответственно модели стенда –

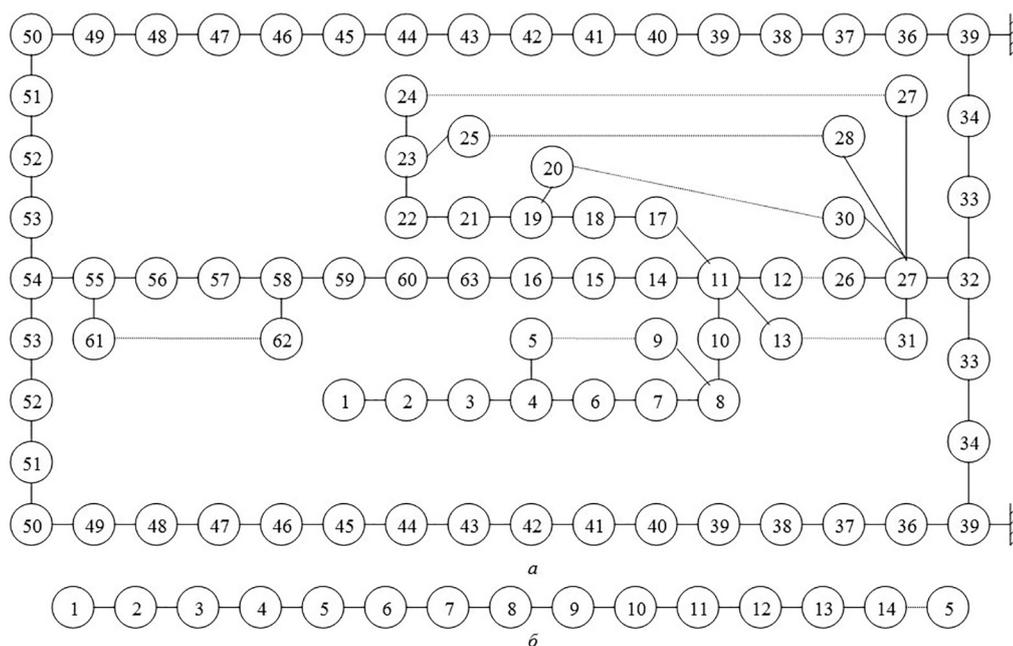


Рис. 3. Динамические модели силовой передачи стенда:
a – начальная; *б* – редуцированная

Fig. 3. Dynamic models of the power transmission of the test bench: a – initial; б – reduced

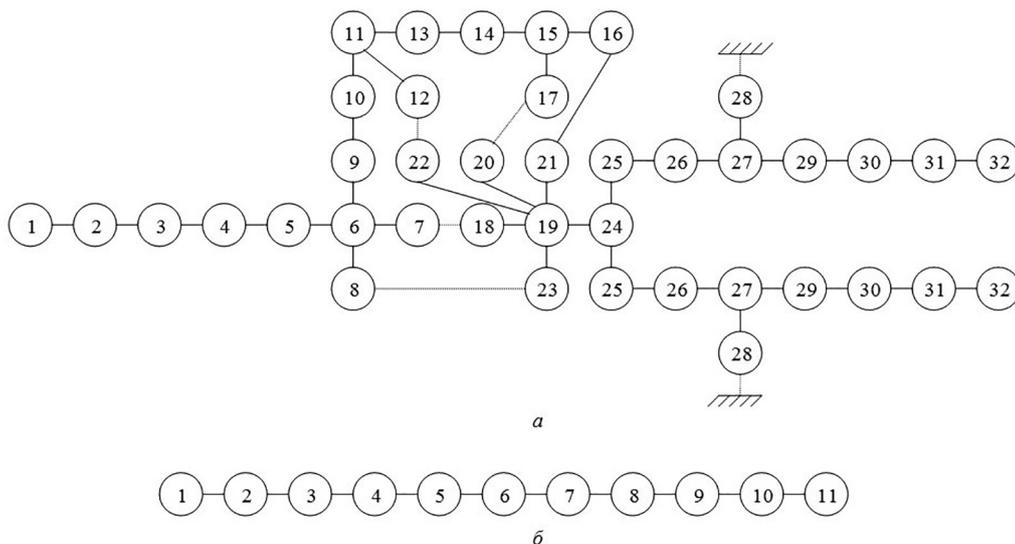


Рис. 4. Динамические модели силовой передачи трактора:
a – начальная; *б* – редуцированная

Fig. 4. Dynamic models of tractor power transmission: a – initial; б – reduced

63 и 14 масс. В таблице 1 приведены значения моментов инерции и жесткости связей масс полной и редуцированной моделей трансмиссии стенда, в таблице 2 – полной и редуцированной моделей трансмиссии трактора [7].

На рис. 5 представлен полученный расчетным путем при помощи созданного в ВолГТУ программного комплекса DASP [11] спектр собственных частот трансмиссии трактора

на первой передаче (ширина околорезонансной зоны для каждой собственной частоты принята равной 5 % от ее значения) и спектр собственных частот трансмиссии стенда с первоначальными и с измененными значениями параметров. Цифрой 1 обозначен спектр трансмиссии стенда до изменения параметров, цифрой 2 – спектр трансмиссии трактора, цифрой 3 – спектр трансмиссии стенда после изменения.

Таблица 1

Моменты инерции и жесткость связей масс стенда

Table 1. Moments of inertia and stiffness of the test bench masses

Номер массы редуцируемой модели	Узел стенда с ГЗСК	Номер массы начальной модели
1	Электродвигатель привода стенда	1
2	Карданный вал привода стенда	2
3	Вал отбора мощности	3–10
4	Первичный вал коробки передач	11–13
5	Турбинное колесо ГТКМ	14–16
6	Вал заднего хода коробки передач	17–21
7	Дополнительный вал коробки передач	22–25
8	Вторичный вал коробки передач	26–31
9	Планетарный механизм поворота	32–34
10	Конечная передача	35–39
11	Согласующий редуктор	40–45
12	Гидросистема замыкания контура	46–49
13	Карданный вал, раздаточная коробка	50–62
14	Насосное колесо ГТКМ	63

Таблица 2

Моменты инерции и жесткость связей масс трактора

Table 2. Moments of inertia and stiffness of tractor mass couplings

Номер массы редуцируемой модели	Узел трактора ДТ-175С	Номер массы начальной модели
1	Коленвал двигателя	1
2	Маховик с муфтой сцепления	2
3	Насосное колесо ГТКМ	3
4	Турбинное колесо ГТКМ	4–6
5	Первичный вал коробки передач	7–10
6	Вал заднего хода коробки передач	11–14
7	Дополнительный вал коробки передач	15–18
8	Вторичный вал коробки передач	19–24
9	Планетарный механизм поворота	25–27
10	Конечная передача	28–32
11	Вращающиеся массы ходовой системы и половина поступательно движущейся массы трактора	33

Как видно из рис. 5, пять собственных частот трансмиссий стенда и трактора соответствуют друг другу, пять – не соответствуют. В собственном частотном спектре трансмиссии стенда необходимо получить частоты 11,6, 13,7, 205,1 и 302,5 Гц, присутствующие в спектре частот трансмиссии трактора.

Частоты собственного спектра трансмиссии определяются совокупностью величин моментов инерции масс и жесткости связей, а также порядком соединения масс. Трансмиссия тягово-транспортной машины включает в себя обычно набор участвующих в передаче крутящего момента стандартных деталей – зубчатых колес, подшипников, валов, фрикционных элементов. Значительно уменьшать массу отдельных деталей (если это требуется для изменения собственной частоты) обычно невозможно из соображений прочности, зна-

чительно увеличивать – затруднительно и неэкономично. Большую возможность влияния на собственные частоты проектировщик имеет за счет оперирования жесткостью связей.

Часто в трансмиссии имеется всего несколько элементов, динамическими параметрами которых можно оперировать, и то в ограниченных пределах, а параметры остальных элементов изменить невозможно.

В соответствии с описанной методикой и при помощи программ пакета DASP [11] выполнено исследование возможностей получения в спектре трансмиссии стенда необходимых значений собственных частот. Как показали результаты исследования, далеко не каждое изменение моментов инерции масс и жесткости связей (или их сочетаний) может привести к получению в спектре трансмиссии стенда заданной собственной частоты.

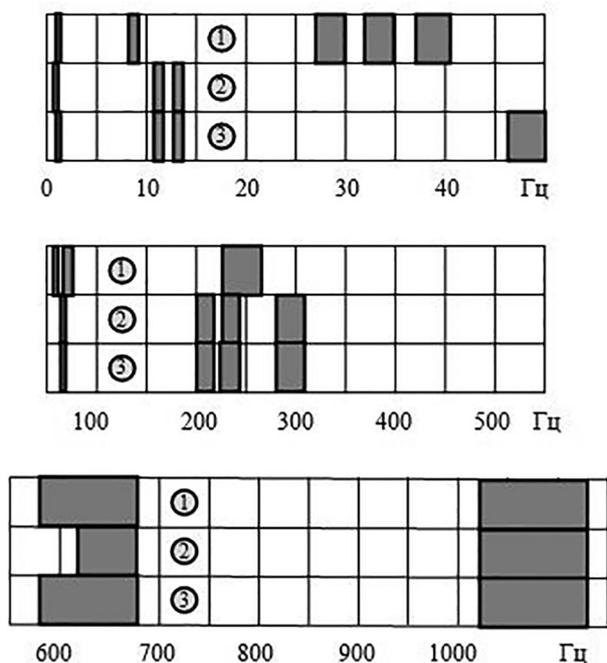


Рис. 5. Собственные частотные спектры трансмиссий стенда и трактора

Fig. 5. Natural frequency spectra of the test bench and tractor transmissions

Но при получении в спектре одной из заданных собственных частот изменяются упруго-инерционные параметры элементов, что влечет за собой изменение других собственных частот. Поэтому во время сближения собственных частотных свойств трансмиссий стенда и машины необходимо определить влияние на собственные частоты параметров тех элементов, которые конструктивно возможно изменить и, целенаправленно изменяя их значения, методом итераций добиться получения в спектре всех заданных значений собственных частот.

В результате расчета получается, что для большинства сочетаний параметров изменяемые момент инерции массы или жесткость связи для получения заданной собственной частоты должны принять отрицательное значение, и, следовательно, таким изменением параметров данная собственная частота не может быть получена [11]. Для примера в таблице 3 приведены различные варианты сочетания моментов инерции масс и жесткости связей, за счет изменения которых определялась возможность получения в собственном частотном спектре трансмиссии стенда частоты 11,6 Гц.

Но в пределах одного варианта сочетания параметров возможно также несколько их вза-

имосвязанных изменений (например, уменьшение момента инерции массы с одновременным уменьшением жесткости связи) при условии сохранения заданной собственной частоты. Так, например, при рассмотрении варианта 23 (табл. 3) в таблице 4 показана возможность получения собственной частоты 14,2 Гц одновременным изменением момента инерции массы I_2 и жесткости связи C_1 ; при этом получение такой частоты возможно в 13 случаях сочетания различных величин этих параметров [7].

Таблицы, подобные таблицам 3 и 4, после выполнения расчетов составляются для каждой собственной частоты, которую следует иметь в собственном спектре трансмиссии стенда. При этом возможно рассмотрение всех вариантов сочетаний изменяемых параметров и выбор оптимального с конструктивной точки зрения.

Для облегчения этой задачи комплекс DASP [11] и созданные для этой цели графические комплексы [12] обеспечивают возможность выполнить исследование влияния каждого из изменяемых параметров на собственные частоты модели. На рис. 6 для примера показано изменение собственных частот при изменении момента инерции первой массы I_1 и жесткости ее связи C_1 . Как видно из графиков, изменение величины момента инерции масс данной трансмиссии оказывает заметное влияние на собственные частоты в диапазоне от 0 до 20 кг·м², дальнейшее увеличение инерционной массы практически не сказывается на собственных частотах. Изменение жесткости упругих связей оказывает заметное влияние на собственные частоты в диапазоне от 0 до 10⁷ Н·м/рад, дальнейшее увеличение жесткости практически мало влияет на собственные частоты.

В соответствии с методикой выполнено исследование влияния параметров каждого из элементов трансмиссии стенда на изменение частот спектра и построены графики, характеризующие влияние изменения моментов инерции масс $I_1, I_2, I_3, I_{12}, I_{13}, I_{14}$ и жесткости связей $C_1, C_2, C_{10}, C_{11}, C_{12}, C_{13}$ на собственные частоты.

Руководствуясь данными графических комплексов [12] и таблиц, подобных таблицам 3 и 4, и сопоставляя их с характером изменения собственных частот в зависимости от каждого варьируемого параметра по графикам, подобным изображенным на рис. 6, подбирали оптимальные значения изменяемых парамет-

Таблица 3

Определение возможности получения в спектре трансмиссии стенда частоты 11,6 Гц
Table 3. Determination of the possibility of obtaining a frequency of 11,6 Hz in the transmission spectrum of the test bench

Номер варианта	Изменяемые динамические параметры													Результат		
	I_1	I_2	I_3	I_{12}	I_{13}	I_{14}	C_1	C_2	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	Отриц. момент инерции	Отриц. жесткость	Получ. возможно	
1	+												+			
2		+											+			
3			+										+			
4				+									+			
5					+								+			
6						+							+			
7							+	+							+	
8									+						+	
9										+					+	
10															+	
11											+				+	
12												+		+		
13	+	+											+			
14	+		+										+			
15	+			+									+			
16	+				+								+			
17	+					+							+			
18	+						+	+						+		
19	+								+					+		
20	+									+				+		
21	+													+		
22	+										+				+	
23	+											+			+	
24		+	+										+			
25		+		+									+			
26		+			+								+			
27		+				+							+			

Таблица 4

Варианты значений C_1 и I_2 для получения собственной частоты 14,2 Гц
Table 4. Options for C_1 and I_2 values for a natural frequency of 14,2 Hz

Номер варианта	Величины изменяемых динамических параметров		Изменяющиеся собственные частоты, Гц			
	I_2 , кг·м ²	C_1 , Н·м/рад	1	2	3	4
23	12,3800	30 966	9,0	14,2	40,5	413,9
	3,7086	18 319	8,9	14,1	41,8	416,4
	2,1199	13 007	8,8	14,1	43,2	419,1
	1,4525	10 083	8,6	14,1	44,5	422,1
	1,0852	8 232	8,5	14,1	45,9	425,3
	1,0533	8 062	8,4	14,1	46,1	425,7
	0,8528	6 956	8,3	14,3	47,5	429,5
	0,6924	6 022	8,2	14,1	48,7	432,5
	0,5635	5 238	8,0	14,2	50,3	437,3
	0,4334	4 413	7,8	14,1	52,6	444,8
	0,3545	3 895	7,7	14,1	54,6	452,0
	0,2196	2 980	7,2	14,1	60,0	475,7
	0,1490	2 485	6,9	14,2	64,9	504,3

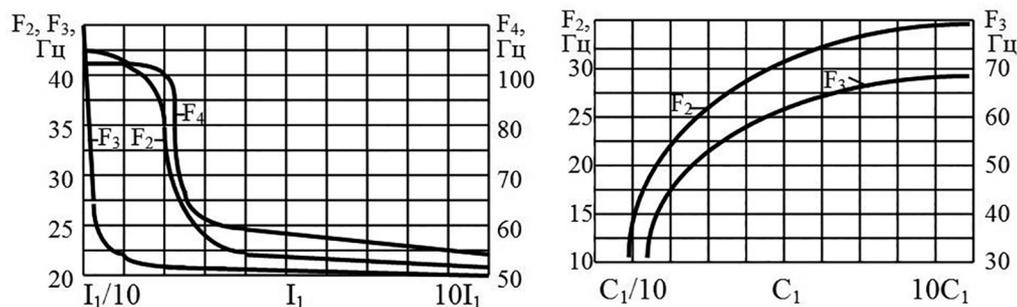


Рис. 6. Изменение собственных частот при изменении момента инерции первой массы I_1 и жесткости ее связи C_1

Fig. 6. Change in natural frequencies with a change in the moment of inertia of the first mass I_1 and the stiffness of its connection C

тров остальных элементов трансмиссии стенда для максимального сближения частотных спектров трансмиссий трактора и стенда.

Найденные таким образом значения изменяемых параметров приведены в таблице 5.

В таблице 6 приведены значения собственных частот трансмиссий трактора и стенда

до и после изменения параметров, когда частотный спектр трансмиссии стенда уже включает в себя все искомые собственные частоты трансмиссии трактора.

Присутствие в спектре трансмиссии стенда собственных частот, отсутствующих в спектре трактора, обусловлено различием дина-

Таблица 5

Значения изменяемых параметров элементов стенда
 Table 5. The values of the variable parameters of the test bench elements

Динамические параметры элементов стенда	До изменения	После изменения
Жесткость связей, Н·м/рад		
C_1	100000	276000
C_2	523773	1000000
C_{11}	4220	700000
C_{12}	3784	860000
C_{13}	17242	3600
Моменты инерции масс, кг·м ²		
I_{12}	0,158	3,6

Таблица 6

Собственные частоты трансмиссий до и после изменения параметров
 Table 6. Natural frequencies of transmissions before and after changing parameters

Номер собственной частоты	Собственные частоты, Гц		
	Трактор ДТ-175С	Испытательный стенд с ГЗСК	
		До изменения параметров	После изменения параметров
1	1,0	1,1	0,8
2	11,6	8,7	11,5
3	13,7	28,4	13,8
4	–	33,3	48,2
5	71,8	38,7	71,8
6	205,1	56,6	205,0
7	–	72,9	211,8
8	236,3	236,2	236,3
9	302,5	247,3	302,5
10	–	258,2	608,2
11	649,1	611,0	649,1
12	–	649,1	791,0
13	1080,8	1080,8	1080,8
14	3060,5	–	–

мических моделей. Избежать этого различия практически невозможно. Сравнение спектров всегда может подсказать испытателю, на каких скоростных режимах (соответствующих резонансному режиму на одной из несвойственных трансмиссии трактора собственных частот) не следует производить испытаний или обеспечить в рабочем диапазоне частот вращения прохождение этой частоты с максимальной скоростью при разгоне или торможении [5].

Достоинством метода является то, что он позволяет добиваться изменения собственного спектра частот трансмиссии за счет изменения не одного параметра, а нескольких, при этом часто возможно получение частоты за счет незначительных изменений параметров, что удобно с конструкторской точки зрения. Это позволяет рассмотреть множество вариантов сочетания изменяемых параметров и выбрать среди них наиболее удобный для реализации на практике [11].

Выводы

Предложен метод повышения степени идентичности динамической нагруженности трансмиссий тягово-транспортного средства и испытательного стенда при воспроизведении на нем переменных нагрузок. Метод позволяет на стадии проектирования стенда целенаправленно сформировать спектр собственных частот его трансмиссии таким образом, чтобы включить в его состав основные собственные частоты трансмиссии тягово-транспортного средства. При этом наиболее опасные с точки зрения прочности и долговечности деталей резонансные режимы в трансмиссиях стенда и тягово-транспортного средства имеют место на тех же самых частотах, что повышает достоверность испытаний. Для примера при помощи метода определено необходимое изменение упруго-инерционных параметров элементов трансмиссии стенда с гидрозамкнутым силовым контуром, при котором в частотный спектр его трансмиссии входят основные собственные частоты трансмиссии трактора ДТ-175С.

Литература

1. Шеховцов В.В., Ходес И.В., Шевчук В.П., Соколов-Добрев Н.С., Шеховцов К.В., Клементьев Е.В. Стендовое оборудование для испытаний силовых передач тракторов // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 1. С. 36–40.

2. Годжаев З.А., Победин А.В., Ляшенко М.В., Шеховцов К.В. Стендовое оборудование для испытаний виброизоляторов кабины трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 3. С. 43–48.
3. Победин А.В., Шеховцов В.В., Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С., Шеховцов К.В., Годжаев З.А. Перспективы использования динамических гасителей колебаний в подвесках тракторных кабин // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 11. С. 16–21.
4. Калмыков А.В., Шеховцов В.В., Ляшенко М.В., Соколов-Добрев Н.С., Годжаев З.А. Перспективы использования упругого реактивного звена в силовой передаче трактора // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 12. С. 20–24.
5. Шеховцов В.В. Управление динамическими свойствами силовых передач стендов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1997. № 11. С. 32–35.
6. Ходес И.В., Шеховцов В.В., Шевчук В.П. Стендовое оборудование для испытания трансмиссий тракторов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1988. № 7. С. 10–13.
7. Шеховцов В.В., Ляшенко М.В. Оптимизация динамической нагруженности силовой передачи гусеничного трактора // Техника машиностроения. 2005. № 1. С. 65–73.
8. Шеховцов В.В., Шевчук В.П., Зленко С.В., Долгов И.А., Косенко В.В., Куликов А.О. Распространение крутильных колебаний в валопроводе силовой передачи трактора ВТ-100 // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. № 8. С. 10–12.
9. Шеховцов В.В., Шевчук В.П., Зленко С.В., Долгов И.А., Косенко В.В., Куликов А.О. Исследование резонансных режимов силовой передачи трактора ВТ-100 // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. № 7. С. 11–13.
10. Тескер Е.И., Шеховцов В.В., Зленко С.В., Кумсков Д.И. Исследование динамических процессов в силовой передаче гусеничной машины // *Dynamika strojovych agregatov = Dynamics of Machine Aggregates: proc. of 4th Int. Conf. (September 21-23, 1998) / Slovak Univ. of Technology. Gabčíkovo (Slovak Republic), 1998. S. 151–154.*
11. Шеховцов В.В. Анализ и синтез динамических характеристик автотракторных силовых передач и средств для их испытания: монография / ВолгГТУ. Волгоград: РПК «Политехник», 2004. 224 с.
12. Шеховцов В.В. Справочные графические комплексы для формирования спектра собственных частот силовой передачи: справочник // Инженерный журнал. 1998. № 11. С. 59–64.

Reference

1. Shekhovtsov V.V., Khodes I.V., Shevchuk V.P., Sokolov-Dobrev N.S., Shekhovtsov K.V., Klement'yev YE.V. Bench equipment for testing tractor power transmissions. *Sovremennyye naukoemye tekhnologii*. 2013. No 1, pp. 36–40 (in Russ.).
2. Godzhayev Z.A., Pobedin A.V., Lyashenko M.V., Shekhovtsov K.V. Bench equipment for testing vibration isolators of a tractor cabin. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2012. No 3, pp. 43–48 (in Russ.).
3. Pobedin A.V., Shekhovtsov V.V., Lyashenko M.V., Sokolov-Dobrev N.S., Shekhovtsov K.V., Godzhayev Z.A. Prospects for the use of dynamic vibration dampers in the suspensions of tractor cabins. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2014. No 11, pp. 16–21 (in Russ.).
4. Kalmykov A.V., Shekhovtsov V.V., Lyashenko M.V., Sokolov-Dobrev N.S., Godzhayev Z.A. Prospects for the use of an elastic reactive link in the power transmission of a tractor. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2014. No 12, pp. 20–24 (in Russ.).
5. Shekhovtsov V.V. Control of dynamic properties of power transmission test benches. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1997. No 11, pp. 32–35 (in Russ.).
6. Khodes I.V., Shekhovtsov V.V., Shevchuk V.P. Bench equipment for testing tractor transmissions. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1988. No 7, pp. 10–13 (in Russ.).
7. Shekhovtsov V.V., Lyashenko M.V. Optimizing the dynamic loading of the power train of a crawler tractor. *Tekhnika mashinostroyeniya*. 2005. No 1, pp. 65–73 (in Russ.).
8. Shekhovtsov V.V., Shevchuk V.P., Zlenko S.V., Dolgov I.A., Kosenko V.V., Kulikov A.O. Propagation of torsional vibrations in the shaft line of the power transmission of the tractor VT-100. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2002. No 8, pp. 10–12 (in Russ.).
9. Shekhovtsov V.V., Shevchuk V.P., Zlenko S.V., Dolgov I.A., Kosenko V.V., Kulikov A.O. Investigation of resonant modes of the power transmission of the VT-100 tractor. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2002. No 7, pp. 11–13 (in Russ.).
10. Tesker YE.I., Shekhovtsov V.V., Zlenko S.V., Kumskov D.I. Investigation of dynamic processes in the power transmission of a tracked vehicle // *Dynamika strojovych agregatov [Dynamics of Machine Aggregates: proc. of 4th int. conf. (September 21–23, 1998)] / Slovak Univ. of Technology. – Gabčíkovo (Slovak Republic), 1998. pp. 151–154 (in Russ.)*.
11. Shekhovtsov V.V. *Analiz i sintez dinamicheskikh kharakteristik avtotraktornykh silovykh peredach i sredstv dlya ikh ispytaniya [Analysis and synthesis of dynamic characteristics of automotive power transmissions and means for their testing]: monografiya. VolGGTU. Volgograd: RPK «Politekhnika», 2004. 224 p.*
12. Shekhovtsov V.V. Reference graphic complexes for the formation of the natural frequency spectrum of a power transmission. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*. 1998. No 11, pp. 59–64 (in Russ.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРАКТОРА, ОСНАЩЕННОГО УПРУГОДЕМПФИРУЮЩИМ МЕХАНИЗМОМ ПРИ АГРЕГАТИРОВАНИИ С СЕЯЛКОЙ

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF A TRACTOR EQUIPPED WITH AN ELASTIC-DAMPING MECHANISM WHEN AGGREGATED WITH A SEEDER

С.Е. СЕНЬКЕВИЧ, К.Т.Н.
Е.Н. ИЛЬЧЕНКО
И.С. АЛЕКСЕЕВ

ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва, Россия,
sergej_senkevich@mail.ru

S.E. SEN'KEVICH, PhD in Engineering
YE.N. IL'CHENKO
I.S. ALEKSEYEV

Federal Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia,
sergej_senkevich@mail.ru

Одним из существенных факторов, оказывающих влияние на работу трактора, является неустановившаяся нагрузка, возникающая при трогании, в начальный период разгона и торможения. Для уменьшения негативных последствий от таких нагрузок применяются упругодемпфирующие механизмы. Разработкой и изучением их применения ученые занимаются и сегодня.

В настоящей статье проведен анализ взаимной корреляционной функции и анализ взаимной спектральной плотности двух процессов: частоты вращения коленчатого вала двигателя и частоты вращения ведущего колеса. Этот анализ показывает изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу силовой передачи колесного трактора тягового класса 1,4, в силовую передачу которого установлен упругодемпфирующий механизм. Исследования были проведены для условий работы трактора с сеялкой. Цель исследования заключалась в определении влияния упругодемпфирующего механизма, установленного в силовую передачу трактора, на его работу с прицепной сеялкой.

В общем случае объектом исследования является процесс функционирования трактора тягового класса 1,4, который находится в агрегате с сеялкой. Анализ взаимной корреляционной функции двух процессов показал изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу. Отношение времени прохождения сигнала возмущений в опытном тракторе по отношению к серийному варианту по валопроводу при агрегатировании трактора с сеялкой уменьшается на 40,1 %. Анализ взаимной спектральной плотности показывает смещение частоты возмущающих воздействий по отношению к серийному варианту и уменьшение их величины при агрегатировании трактора с сеялкой на 33,3 %. Величина взаимной спектральной плотности меньше в опытном варианте трактора, что может означать то, что упругодемпфирующий механизм, как элемент силовой передачи, поглощает часть колебаний нагрузки и снижает их скорость распространения по валопроводу.

Ключевые слова: динамические процессы, упругодемпфирующий механизм, силовая передача трактора, взаимная корреляционная функция, взаимная спектральная плотность.

Для цитирования: Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Алексеев И.С. Результаты проведения экспериментальных исследований трактора, оснащенного упругодемпфирующим механизмом при агрегатировании с сеялкой // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 33–44. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-33-44.

One of the significant factors influencing the operation of the tractor is the unsteady load that occurs when starting off, during the initial period of acceleration and deceleration. The elastic-damping mechanisms are used to reduce the negative consequences of such loads. Scientists still develop and study their application.

In this article, the analysis of the cross correlation function and the analysis of the mutual spectral density of two processes were carried out. The analyzed processes were the engine crankshaft speed and the drive wheel speed. This analysis shows the change in the speed of the passing load frequencies along the shaft line of the traction class 1,4 wheeled tractor power transmission, where an elastic-damping mechanism is installed. The studies were carried out for the operating conditions of a tractor with a seeder. The purpose of the study was to determine the effect of the elastic-damping mechanism installed in the power transmission of a tractor on its operation with a trailed seeder.

In the general case, the object of research is the functioning of a tractor of traction class 1,4 process, which is located in a unit with a seeder. Analysis of the mutual correlation function of the two processes showed a change in the speed of the passing load frequencies along the shaft line. The ratio of the propagation time of the disturbance signal in the experimental tractor in relation to the production version along the shaft line when aggregating the tractor with the seeder decreases by 40,1 %. The analysis of the mutual spectral density shows a shift in the frequency of disturbing influences in relation to the serial version and a decrease in their value when the tractor is aggregated with a seeder by 33,3 %. The value of the mutual spectral density is lower in the experimental version of the tractor, which may mean that the elastic-damping mechanism, as an element of the power transmission, absorbs part of the load fluctuations and reduces their propagation speed along the shaft line.

Keywords: dynamic processes, elastic-damping mechanism, tractor power transmission, cross correlation function, mutual spectral density.

Cite as: S.E. Sen'kevich, YE.N. Il'chenko, I.S. Alekseyev Results of experimental studies of a tractor equipped with an elastic-damping mechanism when aggregated with a seeder. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 4, pp. 33–44 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-33-44.

Введение

Повышение производительности технологических процессов и продление срока службы рабочих органов машин всегда было основными целями улучшения любого производства. Сельское хозяйство не является исключением. Так, например, на трактор действует ряд факторов, которые сокращают срок его службы и требуют больших расходов на содержание. Одним из существенных факторов, оказывающих влияние на работу, является неустановившаяся нагрузка, возникающая при трогании, в начальный период разгона и при торможении агрегата. Для уменьшения негативных последствий от таких нагрузок применяются упругодемпфирующие механизмы (УДМ). Разработкой и изучением их применения ученые занимаются и в настоящее время.

Например, в работе [1] доказывается эффективность введения упругих элементов в ведомый диск. При проведении эксплуатационных испытаний было доказано что дополнительное демпфирование обеспечивает снижение резонансных колебаний со стороны дизельного двигателя в 1,5–2 раза, а в начальный период разгона помогают сделать включение сцепления более плавным и снижают пробуксовку ведомого диска на 12–20 %. При этом износ фрикционных накладок ведомых дисков снижается в среднем на 29,5 % по сравнению с серийными.

Увеличение производительности трактора в составе различных агрегатов возможно за счет увеличения рабочих скоростей, но это приводит к появлению повышенных динамических нагрузок. Для эффективного снижения динамических нагрузок на силовую передачу, авторы статьи [2] предлагают вводить упругие демпфирующие элементы (УДЭ) ближе к источникам колебаний, а именно к ведущим колесам. При проведении тяговых испытаний было выявлено, что при движении по стерне с использованием УДЭ максимальная тяговая мощность увеличивается с 25 до 26 кВт, буксование движителя снижается на 28 %, а удельный расход топлива – на 12,5 %.

В других работах [3, 4] также говорится, что применение упругого элемента уменьшает амплитуды колебаний коэффициента буксования, теоретическую и действительную скорости машинно-тракторного агрегата, что снижает крюковую нагрузку трактора и его колебания. Более равномерное распределение

нагрузки в трансмиссии позволяет стабилизировать нагрузочный режим двигателя, обеспечить снижение удельного расхода топлива и повысить долговечность деталей.

Для проверки эффективности установки УДЭ проводятся эксперименты на реальных тракторах и создаются математические модели. Создание моделей позволяет рассчитать силы, влияющие на отдельные узлы системы. Так, статья [5] рассматривает моделирование физических динамических процессов в силовых передачах транспортной техники, основное внимание уделяя применению этой методики расчета для процессов в коробке передач при переключениях передач под нагрузкой при прямом и реверсном включении. В то же время в работе [6] модель силовой передачи, созданная в среде визуального моделирования Matlab/Simulink, помогла определить оптимальные места установки УДЭ и их параметры для снижения динамической нагруженности.

Для более полных и достоверных результатов обычно применяются два вида исследований: экспериментальные и теоретические. В статье [7] представлены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования для сравнения характеристик серийного трактора и трактора с упругодемпфирующим механизмом. Адекватность модели была проверена и доказана ее возможность использования для получения рабочих характеристик. В результате было установлено, что угловая скорость коленчатого вала двигателя трактора с УДМ сразу выходит на значения 210–250 рад/с, в то время как в серийном агрегате эти значения достигаются через 8 с со снижением оборотов до 100 рад/с. На графиках характеристик опытного трактора резких скачков не наблюдается, а абсолютная величина линейной скорости выше.

Авторы статьи [8] доказывали эффективность применения газогидравлического упругодемпфирующего привода (УДП) на ведущих колесах трактора тягового класса 1,4. По результатам исследования, применение УДП эффективно, так как благодаря ему уменьшаются амплитуды колебаний остова в среднем до 60 % и амплитудные максимумы смещаются в более низкие диапазоны частот (0,2–1,8 Гц), снижается буксование в среднем на 10–12 %, повышается топливная экономичность трактора на 8–14 % и производительность – на 6–15 %.

Применение УДМ улучшает работу и составных сельскохозяйственных транспортно-технологических средств. Это было проверено авторами статьи [9], где при помощи методов математического моделирования и анализа доказывалось облегчение трогания составного транспортного средства при наличии упругодеформируемых сцепок. Этот эффект обуславливается заменой одновременного трогания секций на поочередное. Эффективное взаимодействие ходовой части машины с поверхностью земли также помогают увеличить производительность и снизить потребление топлива [10].

Проведенный обзор показывает актуальность исследований в области применения упругих элементов для снижения вибронагруженности тракторов и мобильных машин и элементов их силовых передач. Эти вопросы, исследуемые по всему миру, позволяют значительно улучшать параметры силовой передачи трактора.

Настоящая статья является продолжением исследования влияния упругодемпфирующего механизма в силовой передаче трактора малого класса тяги (14 кН) на различные его показатели. Устройство, работа и преимущества упругодемпфирующего механизма были подробно представлены в работах [11–13]. Продолжение исследований по изучению влияния механизма на работу силовой передачи представлено в работах [14–16]. В работах [17, 18] доказано, что использование упругодемпфирующего механизма позволило повысить производительность трактора более чем на 10 %; это снизило колебания внешней нагрузки на двигатель на 15–20 % и расход топлива – на 9 %. В работах [19, 20] обосновано, что упругодемпфирующий механизм в силовой передаче трактора устраняет резонансные режимы работы в зоне реальных колебаний внешней нагрузки.

В настоящей статье (опираясь на результаты экспериментальных измерений) проведен анализ взаимной корреляционной функции и анализ взаимной спектральной плотности двух процессов (частоты вращения коленчатого вала двигателя и ведущего колеса). Он показывает изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу силовой передачи колесного трактора тягового класса 1,4, в силовую передачу которого установлен упругодемпфирующий механизм. Исследования были проведены для условий работы трактора с сеялкой. Экспериментальные данные, кото-

рые использовались при проведении расчетно-теоретические исследования по определению спектральных характеристик элементов УДМ в силовой передаче, были получены авторами и описаны в работах [12, 14, 17, 20]. Устройство и подробное описание упругодемпфирующего механизма приведено в работе [21] и защищено патентом на изобретение.

Цель исследований

Определение влияния упругодемпфирующего механизма, установленного в силовую передачу трактора, на его работу с прицепной сеялкой.

Материалы и методы

В общем случае объектом исследования является технологический процесс функционирования трактора тягового класса 1,4, который находится в агрегате с сеялкой как технологической машиной.

Для проведения натурных измерений в рамках эксперимента по исследованию процесса функционирования трактора тягового класса 1,4 был выбран универсально-пропашной трактор Минского тракторного завода. Для создания экспериментального образца трактора-макета в силовой привод серийного трактора был установлен УДМ. Механизм выполнен с возможностью отключения (блокировки) для проведения сравнительных измерений. В собранном виде на тракторе элементы УДМ представлены на рис. 1. На рисунке видно расположение пневмогидроаккумулятора, дросселя, предохранительного клапана и масляного насоса на раме трактора.

При подготовке трактора были проведены техническое обслуживание и регулировка основных его узлов и агрегатов. Перечень операций соответствовал техническому уходу № 2.

Измерительная аппаратура и комплект первичных преобразователей

Для проведения измерений работы трактора, который находился в составе с сеялкой, применялась система автоматического накопления и обработки метрологической информации (САНиОМИ) мобильного исполнения. Все записывающее оборудование было установлено в кабине передвижной лаборатории на базе полноприводного автомобиля ГАЗ-66. САНиОМИ включает в себя комплексы аппаратных и программных средств (рис. 2).



Рис. 1. Общий вид компоновки элементов УДМ на тракторе:

- 1 – пневмогидроаккумулятор; 2 – дроссель;
- 3 – блок предохранительных клапанов;
- 4 – масляный насос; 5 – манометр

Fig. 1. General view of the layout of the elements of the elastic-damping mechanism on the tractor:

- 1 – pneumatic hydroaccumulator; 2 – throttle;*
- 3 – block of safety valves; 4 – oil pump;*
- 5 – manometer*

САНиОМИ состоит из бортового компьютера, платы аналого-цифрового преобразования (АЦП), платы сопряжений, блока усилителя сигнала. Все элементы САНиОМИ смонтированы внутри передвижной лаборатории. Комплект первичных преобразователей (датчиков) установлен на исследуемом тракторе. Применяемая САНиОМИ с комплек-

том датчиков, установленных на исследуемый трактор, обеспечивает получение изменяющихся по времени опыта массивов мгновенных значений следующих параметров в цифровом виде: $P_{кр}$ – тяговое сопротивление на крюке трактора; $M_{кр}$ – крутящий момент на оси ведущего колеса трактора; $n_{ген}$ – частота вращения вала генератора трактора; $n_{шпмн}$ – частота вращения шестерни привода масляного насоса упругодемпфирующего механизма; $P_{масл}$ – давление масла в масляной магистрали (до дросселя) УДМ; $n_{кол}$ – импульсы оборотов путеизмерительного колеса трактора; $N_{кол}$ – импульсы оборотов ведущего колеса трактора; G_T – расход топлива.

Методика проведения полевых измерений трактора в составе с сеялкой

Изучить влияние параметров УДМ на показатели работы трактора при работе с прицепной сеялкой позволила методика проведения полевых исследований [22, 23]. Для проведения полевых экспериментальных исследований был подготовлен трактор-макет с УДМ в силовой передаче на базе трактора МТЗ-80 в составе с прицепной сеялкой СЗ-5,4А. Общий вид испытываемого трактора-макета в агрегате с прицепной сеялкой СЗ-5,4А и измерительным комплексом лаборатории ТЛ-2 на базе автомобиля ГАЗ-66 представлен на рис. 3.

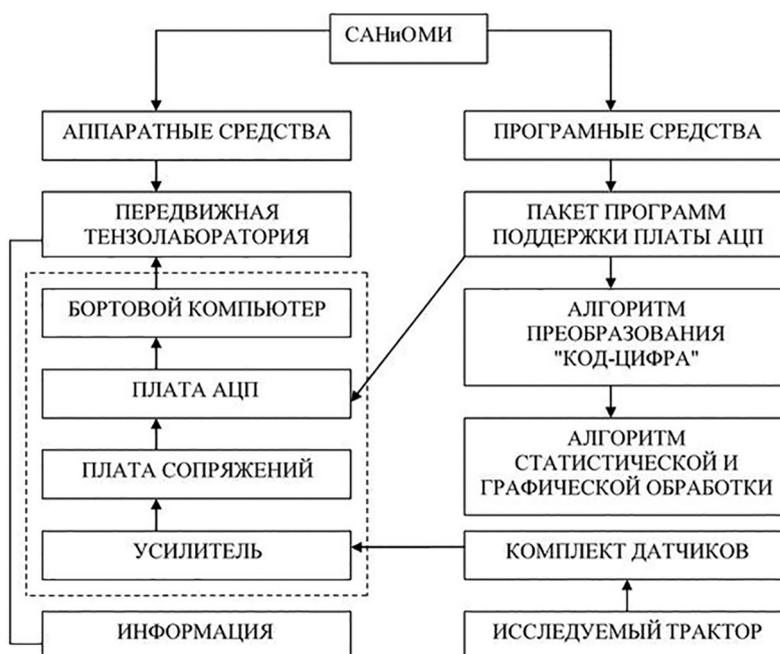


Рис. 2. Система автоматического накопления и обработки информации (САНиОМИ)

Fig. 2. System of automatic accumulation and processing of information (SAAPI)



Рис. 3. Общий вид испытываемого трактора-макета в агрегате с прицепной сеялкой СЗ-5,4А и измерительным комплексом лаборатории ТЛ-2 на базе автомобиля ГАЗ-66

Fig. 3. General view of the tested tractor in a unit with a trailed seeder SZ-5.4A and a measuring complex of the TL-2 laboratory based on the GAZ-66 vehicle

Обеспечение электрической энергией измерительного оборудования в полевых условиях было осуществлено бензогенератором, расположенным в тензометрической лаборатории ТЛ-2. При выполнении измерений тензометрическая лаборатория передвигалась вместе с исследуемым трактором. За одну секунду до начала трогания трактора производилось включение регистрирующего оборудования САНиОМИ, которая регистрировала основные параметры, а также время опыта и пройденный путь. Обработка результатов эксперимента осуществлялась на персональном компьютере с использованием пакета программ [25].

В качестве эталонного трактора при проведении сравнительных измерений использовался тот же самый трактор, но с заблокированным УДМ. Управление трактором в обеих вариантах осуществлялось одним и тем же трактористом первого класса. Положение рычага управления подачей топлива соответствовало максимальному значению. Испытания проводились на следующих режимах: разгон и установившейся процесс движения, сопровождаются значительными колебаниями тяговой нагрузки. Записав параметры движения, удалось получить достоверные данные вероятностных характеристик процесса функционирования трактора при работе с сеялкой. Опираясь на методику проведения полевых исследований, были получены результаты, позволяющие оценить влияние параметров

УДМ на показатели работы трактора в агрегате с сеялкой. Измерительное оборудование позволило получить числовые временные ряды, на основе которых получены вероятностные характеристики процесса работы [25, 26].

Применяя классические методы анализа временных рядов, был проведен корреляционно-спектральный анализ, методика которого описана во многих работах [26–30]. Это позволяет оценить частотные составляющие при применении УДМ в силовой передаче трактора тягового класса 1,4 [31–34].

Для оценки сходства и различия двух процессов используют функцию взаимной корреляции (ВКФ). С помощью ВКФ можно измерить запаздывание во времени двух процессов. В нашем случае необходимо измерить скорость прохождения сигнала от датчика частоты вращения коленчатого вала двигателя (ДЧВКВД) до датчика оборотов ведущего колеса трактора (ДОВКТ). Изменения сигнала являются случайными, однако неверно считать, что они не связаны между собой. Колебания нагрузки, проходящие по валопроводу, будут проходить через оба датчика. Таким образом, на одном из датчиков должен появиться сигнал, очень похожий на сигнал наблюдаемый на другом датчике (либо на ДЧВКВД, либо на ДОВКТ). Иначе говоря, имеется связь между двумя сигналами. Если вычислить ВКФ этих двух сигналов, то можно узнать величину временного запаздывания между сигналами. После этого легко определить скорость прохождения колебаний нагрузки по валопроводу. Корреляция между сигналами от датчиков при запаздывании на время τ_0 принимает максимальное значение. Отношение расстояния между датчиками к временному запаздыванию определяет скорость прохождения колебаний:

$$V(\omega) = \frac{D_{1-2}}{\tau_0}, \quad (1)$$

где $V(\omega)$ – скорость распространения колебаний (сигнала) по валопроводу, м/с; D_{1-2} – расстояние между датчиками-преобразователями сигнала, м; τ_0 – временное запаздывание сигнала, с.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 представлены совмещенные графики изменения ВКФ частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса (далее используется название «угловых

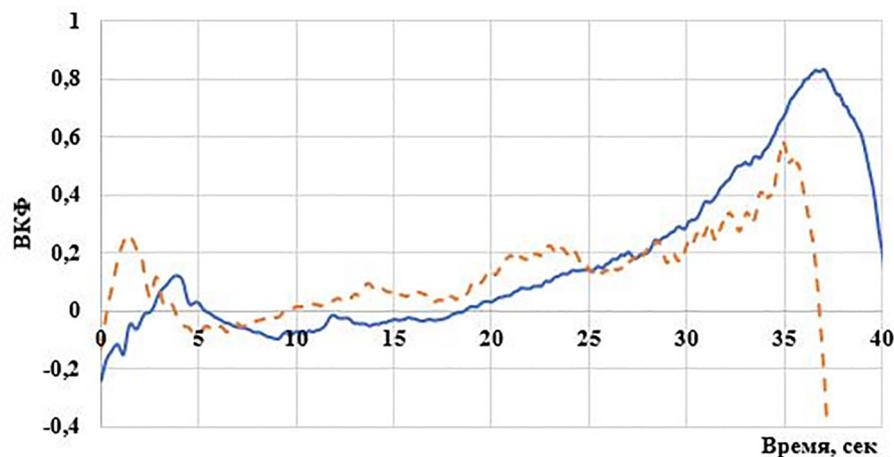


Рис. 4. Совмещенные графики изменения взаимной корреляционной функции угловых скоростей опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой (анализ сигнала от ведущего колеса к двигателю)

Fig. 4. Combined graphs of changes in the cross-correlation function of angular velocities of an experimental and production tractor when aggregated with a seeder (signal analysis from the drive wheel to the engine)

скоростей») в опытном и серийном варианте для трактора во время работы в составе посевного агрегата, с учетом анализа сигнала от ведущего колеса к двигателю. Взаимная корреляционная функция угловых скоростей на рис. 4 и 5 обозначена для двух вариантов так: опытный вариант – сплошная линия; серийный вариант – прерывистая линия.

На рис. 5 представлены совмещенные графики изменения ВКФ частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса в опытном и серийном варианте для трактора

во время работы с сеялкой, с учетом анализа сигнала от двигателя к ведущему колесу.

Графики на рис. 4 и 5 показывают, что корреляция между частотой вращения коленвала двигателя и ведущим колесом (в прямом и обратном направлении) в опытном и серийном вариантах стремится к нулю или уходит из отрицательных значений в положительные значения. При работе трактора с сеялкой зависимости очень идентичны, однако имеются различия, которые характеризуют работу УДМ. Наблюдается отрицательная корреля-

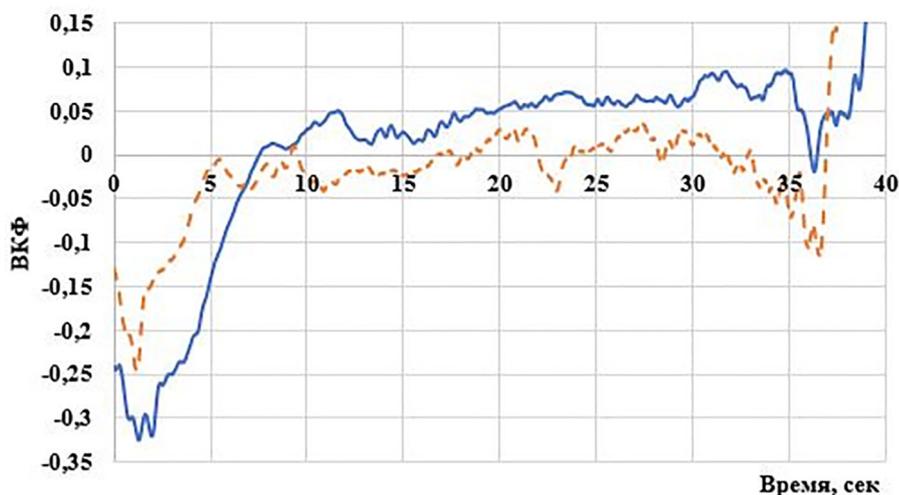


Рис. 5. Совмещенные графики изменения взаимной корреляционной функции угловых скоростей опытного и серийного тракторов при агрегатировании с сеялкой (анализа сигнала от двигателя к ведущему колесу)

Fig. 5. Combined graphs of changes in the cross-correlation function of angular velocities of an experimental and production tractors when aggregated with a seeder (analysis of the signal from the engine to the drive wheel)

ция в период трогания у опытного варианта в направлении от колеса к двигателю. Кривые ВКФ показывают, что механизм, работая как фильтр, реализует минимум своих возможностей при агрегатировании с сеялкой.

На рис. 6–8 представлены совмещенные графики изменения функции взаимной спектральной плотности (ВСП) частоты вращения коленчатого вала и частоты вращения ведущего колеса (далее используется название «угловых скоростей») опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой. Функция

ВСП угловых скоростей на рис. 6–8 обозначена для двух вариантов так: опытный вариант – сплошная линия; серийный вариант – прерывистая линия.

Графики на рис. 6–8 показывают смещение частот возмущающих воздействий и уменьшение их величины (действительной и мнимой части) в серийном варианте. При сравнении модуля взаимной спектральной плотности видны вершины на низкой и высокой частоте ($\omega = 0,5 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 4,0 \text{ с}^{-1}$). Для серийного варианта это свидетельствует о том, что частоты

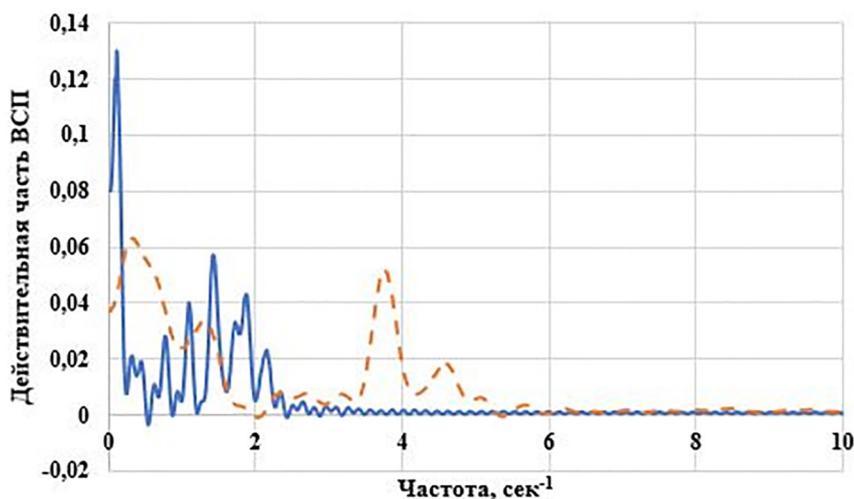


Рис. 6. Совмещенные графики изменения действительной части функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой

Fig. 6. Combined graphs of changes in the real part of the function of the mutual spectral density of angular velocities of an experimental and production tractor when aggregated with a seeder

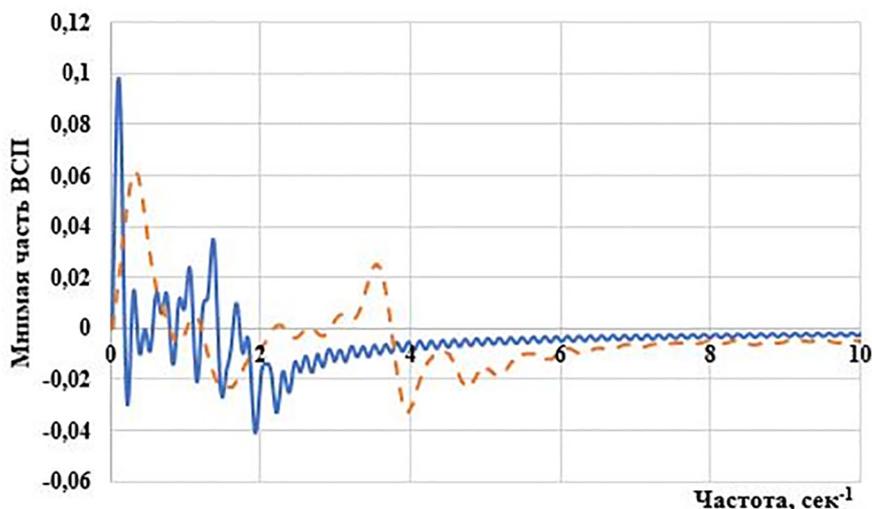


Рис. 7. Совмещенные графики изменения мнимой части функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой

Fig. 7. Combined graphs of changes in the imaginary part of the function of the mutual spectral density of angular velocities of an experimental and production tractor when aggregated with a seeder

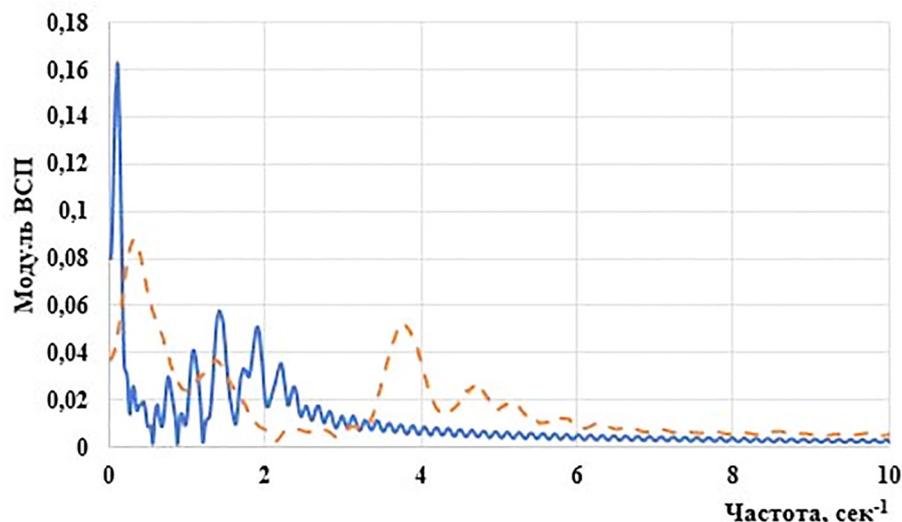


Рис. 8. Совмещенные графики зависимости модуля функции взаимной спектральной плотности угловых скоростей опытного и серийного трактора при агрегатировании с сеялкой

Fig. 8. Combined graphs of the dependence of the modulus of the function of the mutual spectral density of angular velocities of an experimental and production tractor when aggregated with a seeder

(проходят) формируются не только в двигателе, но и в силовой передаче. В опытном варианте все вершины спектральной плотности находятся в диапазоне частоты до $\omega = 2,0 \text{ с}^{-1}$.

Выводы

Анализ ВКФ двух процессов (частоты вращения коленчатого вала двигателя и ведущего колеса) показывает изменение скорости проходящих частот нагрузки по валопроводу (определяемых по формуле (1)). Отношение времени прохождения (прохождение сигнала в опытном тракторе по отношению к серийному варианту) возмущений по валопроводу при агрегатировании трактора с сеялкой уменьшается на 40,1 %. Это доказывает, что упругодемпфирующий механизм поглощает частоты нагрузки и снижает скорость их распространения по валопроводу.

Анализ взаимной спектральной плотности (частоты вращения коленчатого вала двигателя и ведущего колеса), показывает смещение (по отношению к серийному варианту) частоты возмущающих воздействий и уменьшение их величины при агрегатировании трактора с сеялкой на 33,3 %. Величина взаимной спектральной плотности меньше в опытном варианте трактора, что может означать то, что упругодемпфирующий механизм, как элемент силовой передачи, поглощает часть колебаний нагрузки по распространяющимся по валопроводу.

Литература

1. Поливаев, О.И., Ведринский О.С., Дерканосова Н.М. Повышение долговечности сцепления тракторов за счет упругофрикционного демпфера // Наука и образование в современных условиях: материалы международной научной конференции: Воронеж, 2016. С. 226–230.
2. Polivaev O.I., Gorban L.K., Vorokhobin A.V., Vedrinsky O.S. Decrease of dynamic loads in mobile energy means // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. P. 042083. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042083.
3. Нехорошев Д.Д., Коновалов П.В., Попов А.Ю., Нехорошев Д.А. Особенности улучшения работы машинно-тракторного агрегата за счет снижения колебания нагрузки // Известия НВ АУК. 2019. № 1 (53). С. 345–351. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-01-45.
4. Нехорошев Д.Д., Нехорошев Д.А. Совершенствование конструкции механической трансмиссии колесного трактора // Развитие АПК на основе принципов рационального природопользования и применения конвергентных технологий: материалы Международной научно-практической конференции, проведенной в рамках Международного научно-практического форума, посвященного 75-летию образования Волгоградского государственного аграрного университета, Волгоград, 30 января 2019 г. Волгоград: Волго-

- градский государственный аграрный университет, 2019. С. 164–168.
5. Худорожков С.И., Красильников А.А. Численное моделирование динамических процессов в трансмиссии транспортных средств // Известия МГТУ МАМИ. 2021. № 1 (47). С. 38–45. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-38-45.
 6. Бондаренко, Д.Б., Краснокутский В.Ю. Оптимизация упруго-инерционных параметров трансмиссии ТТС тягового класса 0,4 для снижения общей вибранагруженности // XXIV Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области: сборник материалов конференции. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. С. 72–73.
 7. Кравченко В.А., Дурягина В.В., Гамolina И.Э. Анализ результатов аналитических исследований пахотного агрегата на базе трактора класса 1,4 с УДМ в трансмиссии // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 37. С. 36–42.
 8. Бабанин Н.В., Поливаев О.И. Экспериментальные исследования на плавность хода, производительность и топливную экономичность машинно-тракторного агрегата на базе трактора класса 1,4, оборудованного газогидравлическим упруго-демпфирующим приводом // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 3. С. 112–118.
 9. Попов И.П. Упругие сцепки составного сельскохозяйственного транспортно-технологического средства // Вестник НГИЭИ. 2021. № 4 (119). С. 21–30. DOI: 10.24412/2227-9407-2021-4-21-30.
 10. Melikov I. et al. Traction and energy efficiency tests of oligomeric tires for category 3 tractors // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 403. P. 012126. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012126.
 11. Сенькевич С.Е., Васильев Е.К., Сенькевич А.А. Результаты применения гидропневматического демпфирующего устройства в силовой передаче трактора малого класса тяги для улучшения показателей работы // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 4 (21). С. 128–139.
 12. Senkevich S., Kravchenko V., Duriagina V., Senkevich A., Vasilev E. Optimization of the Parameters of the Elastic Damping Mechanism in Class 1,4 Tractor Transmission for Work in the Main Agricultural Operations // In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) Intelligent Computing & Optimization. ICO 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2018. V. 866. P. 168–177. DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_17.
 13. Senkevich S.E., Sergeev N.V., Vasilev E.K., Godzhaev Z.A., Babayev V. Use of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN): Theoretical and Experimental Substantiation // (Chapter 6) Handbook of Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2019. P. 149–179. DOI: 10.4018/978-1-5225-7573-3.ch006.
 14. Сенькевич С.Е. Анализ результатов экспериментальных исследований трактора класса 1,4 модернизированного гидропневматическим демпферным устройством в силовой передаче // Агротехника и энергообеспечение. 2019. № 3 (24). С. 8–16.
 15. Senkevich S., Duriagina V., Kravchenko V., Gamolina I., Pavkin D. Improvement of the Numerical Simulation of the Machine-Tractor Unit Functioning with an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN) // In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) Intelligent Computing and Optimization. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. V. 1072. P. 204–213. DOI: 10.1007/978-3-030-33585-4_20.
 16. Senkevich S., Bolshev V., Ilchenko E., Chakrabarti P., Jasiński M., Leonowicz Z., Chaplygin M. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers // IEEE Access, vol. 9, pp. 71784–71804, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3078609.
 17. Senkevich, S.E, Lavrukhin P.V., Senkevich A.A., Ivanov P.A., Sergeev N.V. Improvement of Traction and Coupling Properties of the Small Class Tractor for Grain Crop Sowing by Means of the Hydropneumatic Damping Device // In V. Kharchenko, & P. Vasant (Eds.), Handbook of Research on Energy-Saving Technologies for Environmentally-Friendly Agricultural Development. Hershey, PA: IGI Global, 2020. P. 1–27. DOI:10.4018/978-1-5225-9420-8.ch001.
 18. Senkevich S., Kravchenko V., Lavrukhin P., Ivanov P., Senkevich A. Theoretical Study of the Effect of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission on a Machine-Tractor Unit Performance While Sowing // (Chapter 17) Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2020. P. 423–463. DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch017
 19. Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Годжаев З.А., Дурягина В.В. Результаты проведения полевых исследований трактора класса тяги 1,4 с упруго-демпфирующим механизмом в силовом приводе //

- Известия МГТУ МАМИ. 2020. № 4 (46). С. 76–87. DOI: 10.31992/2074-0530-2020-46-4-76-87.
20. Сенькевич С.Е., Крюковская Н.С. Анализ экспериментальных исследований трактора, оснащенного упругодемпфирующим механизмом в трансмиссии, при движении в составе транспортного тракторного агрегата // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 59–66. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-6-59-66.
21. Сенькевич С.Е., Ильченко Е.Н., Кравченко В.А., Дурагина В.В., Годжаев З.А., Алексеев И.С. Автоматическое устройство для снижения жесткости трансмиссии транспортного средства: патент на изобретение № 2739100 Российская Федерация; опубл. 21.12.2020, Бюл. № 36.
22. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных. М.: Колос, 1973. 199 с.
23. Кравченко В.А., Сенькевич А.А., Сенькевич С.Е., Максименко В.А. Модернизация посевного машинно-тракторного агрегата на базе трактора класса 1,4 // Международный научный журнал. 2008. № 1. С. 57–62.
24. Маркина М.В., Судакова А.В. Практикум по решению задач оптимизации в пакете MATLAB: учебно-методическое пособие. 2017. 49 с. URL: http://www.unn.ru/books/met_files/optim_MANTLAB.pdf (дата обращения 01.06.2021).
25. Liljedahl J.B., Turnquist P.K., Smith D.W., Hoki M. Tractors and their power units // Van Nostrand Reinhold. New York. 1996. P. 364.
26. Бойко Б.П., Тюрин В.А. Спектр сигнала: учебно-методическое пособие. Казань: Казанский федеральный университет, 2014. 38 с.
27. Мясникова Н.В., Берестень М.П. Экспресс-анализ сигналов в технических системах. Пенза: ПГУ, 2012. 151 с.
28. Мясникова Н.В., Строганов М.П., Берестень М.П. Спектральный анализ на основе исследования экстремальных значений процесса // Датчики систем измерения, контроля и управления: межвуз. сб. науч. тр. Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1995. Вып. 15. С. 80–82.
29. Хованова Н. А., Хованов И. А. Методы анализа временных рядов: учеб. пособие. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2001. 120 с.
30. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to time series and forecasting. Springer. 2016. P. 425.
31. Cryer J.D., Chan K.S. Time Series Analysis with Applications in R. Second Edition Springer Science & Business Media. 2008. P. 492.
32. Klenke A. Probability theory: a comprehensive course. Springer Science & Business Media, 2014. P. 638.
33. Schmetterer L. Introduction to mathematical statistics. Springer Science & Business Media. 2012. Vol. 202.
34. Turner J.C. Modern applied mathematics: probability, statistics, operational research. English University Press. 1970. P. 502.

References

1. Polivayev, O.I., Vedrinskiy O.S., Derkanosova N.M. Increasing the durability of the tractors clutch due to the elastic-friction damper. Nauka i obrazovaniye v sovremennykh usloviyakh: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Science and education in modern conditions: materials of the international scientific conference], Voronezh, 2016, pp. 226–230 (in Russ.).
2. Polivaev O.I., Gorban L.K., Vorokhobin A.V., Vedrinsky O.S. Decrease of dynamic loads in mobile energy means // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment. Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. pp. 042083. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042083.
3. Nekhoroshev D.D., Konovalov P.V., Popov A.YU., Nekhoroshev D.A. Features of improving the operation of the machine-tractor unit by reducing load fluctuations. Izvestiya NV AUK. 2019. No 1 (53), pp. 345–351 (in Russ.). DOI: 10.32786/2071-9485-2019-01-45.
4. Nekhoroshev, D.D. Improvement of the design of the mechanical transmission of a wheeled tractor / D.D. Nekhoroshev, D.A. Nekhoroshev // Razvitiye APK na osnove printsipov ratsional'nogo prirodopol'zovaniya i primeneniya konvergentnykh tekhnologiy: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, provedennoy v ramkakh Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma, posvyashchennogo 75-letiyu obrazovaniya Volgogradskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [The development of the agro-industrial complex based on the principles of rational environmental management and the use of convergent technologies: materials of the International Scientific and Practical Conference held within the framework of the International Scientific and Practical Forum dedicated to the 75th anniversary of the foundation of the Volgograd State Agrarian University], Volgograd, 30 yanvarya 2019 g. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2019, pp. 164–168 (in Russ.).
5. Khudorozhkov S.I., Krasil'nikov A.A. Numerical modeling of dynamic processes in the trans-

- mission of vehicles. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2021. No 1 (47), pp. 38–45 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-38-45.
6. Bondarenko, D.B., Krasnokutskiy V.YU. Optimization of the elastic-inertial parameters of the traction class 0.4 vehicle transmission in order to reduce the overall vibration load. XXIV Regional'naya konferentsiya molodykh uchenykh i issledovateley Volgogradskoy oblasti: sbornik materialov konferentsii [XXIV Regional Conference of Young Scientists and Researchers of the Volgograd Region: Collection of Conference Papers]. Volgograd: Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2020, pp. 72–73 (in Russ.).
 7. Kravchenko V.A., Duryagina V.V., Gamolina I.E. Analysis of the results of analytical studies of a plowing unit based on a 1.4 traction class tractor with an elastic-damping mechanism in the transmission. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2017. No 37, pp. 36–42 (in Russ.).
 8. Babanin N.V., Polivayev O.I. Experimental studies on the smoothness, performance and fuel efficiency of a machine-tractor unit based on a 1.4 class tractor equipped with a gas-hydraulic elastic damping drive. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. No. 3, pp. 112–118 (in Russ.).
 9. Popov I.P. Elastic couplings of a composite agricultural vehicle. *Vestnik NGIEI*. 2021. No 4 (119), pp. 21–30 (in Russ.). DOI: 10.24412/2227-9407-2021-4-21-30.
 10. Melikov I. et al. Traction and energy efficiency tests of oligomeric tires for category 3 tractors // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 403. P. 012126. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012126.
 11. Sen'kevich S.E., Vasil'yev YE.K., Sen'kevich A.A. The results of the use of a hydropneumatic damping device in the power transmission of a tractor of a small traction class to improve performance. *Agrotekhnika i energoobespecheniye*. 2018. No 4 (21), pp. 128–139 (in Russ.).
 12. Senkevich S., Kravchenko V., Duriagina V., Senkevich A., Vasilev E. Optimization of the Parameters of the Elastic Damping Mechanism in Class 1,4 Tractor Transmission for Work in the Main Agricultural Operations // In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) *Intelligent Computing & Optimization*. ICO 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2018. V. 866. P. 168–177. DOI: 10.1007/978-3-030-00979-3_17.
 13. Senkevich S.E., Sergeev N.V., Vasilev E.K., Godzhaev Z.A., Babayev V. Use of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN): Theoretical and Experimental Substantiation // (Chapter 6) *Handbook of Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development*. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2019. P. 149–179. DOI: 10.4018/978-1-5225-7573-3.ch006
 14. Sen'kevich S.E. Analysis of the results of experimental studies of a tractor of class 1.4 upgraded with a hydropneumatic damper device in a power transmission. *Agrotekhnika i energoobespecheniye*. 2019. No 3 (24), pp. 8–16 (in Russ.).
 15. Senkevich S., Duriagina V., Kravchenko V., Gamolina I., Pavkin D. Improvement of the Numerical Simulation of the Machine-Tractor Unit Functioning with an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission of a Small Class of Traction (14 kN) // In: Vasant P., Zelinka I., Weber GW. (eds) *Intelligent Computing and Optimization*. ICO 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. Springer, Cham. 2020. V. 1072. P. 204–213. DOI: 10.1007/978-3-030-33585-4_20.
 16. Senkevich S., Bolshov V., Ilchenko E., Chakrabarti P., Jasiński M., Leonowicz Z., Chaplygin M. Elastic Damping Mechanism Optimization by Indefinite Lagrange Multipliers // *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71784–71804, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3078609.
 17. Senkevich, S.E, Lavrukhin P.V., Senkevich A.A., Ivanov P.A., Sergeev N.V. Improvement of Traction and Cou-pling Properties of the Small Class Tractor for Grain Crop Sowing by Means of the Hydropneumatic Damping De-vice // In V. Kharchenko, & P. Vasant (Eds.), *Handbook of Research on Energy-Saving Technologies for Environmentally-Friendly Agricultural Development*. Hershey, PA: IGI Global, 2020. P. 1–27. DOI:10.4018/978-1-5225-9420-8.ch001.
 18. Senkevich S., Kravchenko V., Lavrukhin P., Ivanov P., Senkevich A. Theoretical Study of the Effect of an Elastic-Damping Mechanism in the Tractor Transmission on a Machine-Tractor Unit Performance While Sowing // (Chapter 17) *Handbook of Research on Smart Computing for Renewable Energy and Agro-Engineering*. Hershey, Pennsylvania (USA): IGI Global, 2020. P. 423–463. DOI: 10.4018/978-1-7998-1216-6.ch017.
 19. Sen'kevich S.E., Il'chenko YE.N., Godzhayev Z.A., Duryagina V.V. Results of field studies of a tractor of traction class 1.4 with an elastic-damping mechanism in a power drive. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2020. No 4(46), pp. 76–87 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2020-46-4-76-87.

20. Sen'kevich S.E., Kryukovskaya N.S. Analysis of experimental studies of a tractor equipped with an elastic-damping mechanism in the transmission, when driving as part of a transport tractor unit. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2020. No 6, pp. 59–66 (in Russ.). DOI; 10.31992/0321-4443-2020-6-59-66.
21. Sen'kevich S.E., Il'chenko YE.N., Kravchenko V.A., Duryagina V.V., Godzhayev Z.A., Alekseyev I.S. Avtomaticheskoye ustroystvo dlya snizheniya zhestkosti transmissii transportnogo sredstva [Automatic device for reducing the rigidity of the vehicle transmission]: patent na izobreteniyе No 2739100 Rossiyskaya Federatsiya; opubl. 21.12.2020, Byul. No 36.
22. Vedenyapin G.V. Obshchaya metodika eksperimental'nogo issledovaniya i obrabotki opytnykh dannykh [General method of experimental research and processing of experimental data]. Moscow: Kolos Publ., 1973. 199 p.
23. Kravchenko V.A., Sen'kevich A.A., Sen'kevich S.E., Maksimenko V.A. Modernization of a sowing machine-tractor unit based on a 1.4 traction class tractor. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal*. 2008. No 1, pp. 57–62 (in Russ.).
24. Markina M.B., Sudakova A.V. Praktikum po resheniyu zadach optimizatsii v pakete MATLAB. [Laboratory manual on solving optimization problems in the MATLAB package] Uchebno-metodicheskoye posobiye. 2017. 49 p. URL: http://www.unn.ru/books/met_files/optim_MATLAB.pdf (accessed: 01.06.2021).
25. Liljedahl J.B., Turnquist P.K., Smith D.W., Hoki M. Tractors and their power units // Van Nostrand Reinhold, New York. 1996. P. 364.
26. Boyko B.P., Tyurin V.A. Spektr signala: uchebno-metodicheskoye posobiye [Signal spectrum: training manual]. Kazan': Kazanskiy federal'nyy universitet Publ., 2014. 38 p.
27. Myasnikova N.V., Beresten' M.P. Ekspress-analiz signalov v tekhnicheskikh sistemakh [Express analysis of signals in technical systems]. Penza: PGU Publ., 2012. 151 p.
28. Myasnikova N.V., Stroganov M.P., Beresten' M.P. Spectral analysis based on the study of process extreme values. *Datchiki sistem izmereniya, kontrolya i upravleniya: Mezhevuz. sb. nauch. tr.* Penza: Izd-vo Penz. gos. tekhn. un-ta Publ., 1995. Vyp. 15, pp. 80–82 (in Russ.).
29. Khovanova N. A., Khovanov I. A. Metody analiza vremennykh ryadov [Time series analysis techniques]. Ucheb. posobiye. Saratov: Izd-vo GosUNTS" Kolledzh" Publ., 2001. 120 p.
30. Brockwell P.J., Davis R.A. Introduction to time series and forecasting. Springer. 2016. P. 425.
31. Cryer J.D., Chan K.S. Time Series Analysis with Applications in R. Second Edition Springer Science & Business Media. 2008. P. 492.
32. Klenke A. Probability theory: a comprehensive course. Springer Science & Business Media, 2014. P. 638.
33. Schmetterer L. Introduction to mathematical statistics. Springer Science & Business Media, 2012. Vol. 202.
34. Turner J.C. Modern applied mathematics: probability, statistics, operational research. English University Press, 1970. P. 502.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭЛЕКТРОТЕПЛООБМЕННИКАМ ТИПА «ЗМЕЕВИК» ДЛЯ ПОДОГРЕВА ТОПЛИВА

METHODOLOGY FOR THE NUMERICAL SOLUTION OF PROBLEMS IN RELATION TO THE COIL-TYPE ELECTRIC HEAT EXCHANGERS FOR HEATING FUEL

Г.М. КРОХТА, д.т.н.
Е.Н. ХОМЧЕНКО, к.т.н.
Н.А. УСАТЫХ

Новосибирский государственный аграрный университет,
Новосибирск, Россия, mshipo@mail.ru

G.M. KROKHTA, Dsc in Engineering
YE.N. KHOMCHENKO, PhD in Engineering
N.A. USATYKH

Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia,
mshipo@mail.ru

Специфика условий эксплуатации сельскохозяйственных тракторов в условиях АПК требует обеспечения надежного пуска двигателей при низких температурах окружающего воздуха. Улучшения пусковых качеств дизеля и снижения неполноты сгорания в послепусковой период можно достичь путем повышения эксергии воздушного заряда в конце такта сжатия или увеличения эксергии топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания. Цель исследования – снижение затрат эксергии на предпусковую подготовку дизельного двигателя, повышение пусковых качеств и снижение неполноты сгорания в послепусковой период.

Для достижения поставленной цели была разработана конструкция электротеплообменника в виде змеевика из топливпровода высокого давления, в который вставлен нагревательный элемент, и разработана методика расчета его основных параметров. Расчеты показали, что для обеспечения надежного пуска дизельного двигателя в зимний период необходимо в режиме термофорсирования нагреть топливо в форсунке до температуры 240 °С. Для достижения такой температуры в течение 270 с предпусковой подготовки требуется нагреватель мощностью около 98 Вт. Однако для поддержания такой температуры топлива в процессе пуска необходимо внести изменения в конструкцию форсунки с целью максимального снижения потерь тепла в стенки топливного канала путем нанесения теплоизоляционного покрытия. При дальнейшей работе двигателя в режиме послепускового прогрева температуру топлива в форсунке снижают до 85–95 °С.

Ключевые слова: дизельный двигатель, пуск, послепусковой прогрев, температура окружающей среды, электротеплообменник.

Для цитирования: Крохта Г.М., Хомченко Е.Н., Усатых Н.А. Методика численного решения задач применительно к электротеплообменникам типа «змеевик» для подогрева топлива // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 45–54. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-45-54.

The specificity of the operating conditions of agricultural tractors in the agro-industrial complex requires the provision of reliable engine start at low ambient temperatures. Improving the starting qualities of a diesel engine and reducing incomplete combustion in the post-start period can be achieved by increasing the exergy of the air charge at the end of the compression stroke or increasing the exergy of the fuel injected into the combustion chamber. The purpose of the study is to reduce the expenditure of exergy for prestarting a diesel engine, improve starting qualities and reduce incomplete combustion in the post-start period.

To achieve this goal, the design of an electric heat exchanger was developed in the form of a coil from a high-pressure fuel line, into which a heating element is inserted. A method for calculating its main parameters was developed. Calculations showed that in order to ensure reliable start-up of a diesel engine in winter, it is necessary to heat the fuel in the nozzle to a temperature of 240 °C in the thermal boost mode. A heater of about 98 Watts is required to reach this temperature within 270 seconds of priming. However, in order to maintain such a fuel temperature during the start-up process, it is necessary to make changes in the nozzle design in order to minimize heat losses into the walls of the fuel channel by applying a heat-insulating coating. With further engine operation in the post-start heating mode, the fuel temperature in the injector is reduced to 85–95 °C.

Keywords: diesel engine, start-up, post-start heating, ambient temperature, electric heat exchanger.

Cite as: Krokhta G.M., Khomchenko YE.N., Usatykh N.A. Methodology for the numerical solution of problems in relation to the coil-type electric heat exchangers for heating fuel. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 4, pp. 45–54 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-45-54.

Введение

В период холодного пуска дизеля топливо, подаваемое в камеру сгорания форсункой, нагревается, испаряется и перегревается за счет теплоты слоев воздушного заряда, прилегающих к топливному факелу [1, 2], в результате чего происходит существенное снижение температуры воздуха на границе раздела топливных факелов примерно до 150–200 °С [3].

Тепловые расчеты показывают, что если бы в теплообмене участвовал весь заряд воздуха, то снижение его температуры в результате суммарных потерь теплоты на испарение топлива должно составлять не более 20–30 °С [3, 4]. Очевидно, что улучшение пусковых качеств дизеля и снижение неполноты сгорания в послепусковой период можно осуществить путем повышения эксергии воздушного заряда в конце такта сжатия или увеличения эксергии топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания [5, 6]. Исследования, выполненные ранее, и приведенные расчеты показывают, что в первом случае затраты эксергии будут почти в 6 раз больше, чем во втором [4].

Управляемый предварительный подогрев топлива в форсунке (термическая составляющая эксергии) позволяет одновременно увеличить общее теплосодержание топливовоздушной смеси в конце такта сжатия, повысить дисперсность топливных факелов и уменьшить период задержки самовоспламенения [7].

Таким образом, возможность регулирования термической составляющей эксергии топлива, подаваемого в камеру сгорания форсункой, способствует повышению тепловой активности горючей смеси. В результате этого следует ожидать улучшения пусковых качеств двигателя, снижения неполноты сгорания топлива и количества вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу в период пуска и послепускового прогрева [4, 8].

В настоящей статье предложена методика численного решения задач применительно к электротеплообменникам типа «змеевик» и представлены результаты расчетов.

Считается, что при достаточно точной постановке задач и использовании соответствующих уравнений метод численного решения равноценен экспериментальному исследованию. Результаты численного решения настолько точны, насколько точны исходные данные и уравнения [9].

По способу передачи теплоты различают контактные и поверхностные теплообменные

аппараты. В контактных теплота передается путем непосредственного смешения двух теплоносителей. Поверхностные теплообменники, в свою очередь, делятся на рекуперативные и регенеративные. В первых теплота передается от одного теплоносителя к другому через твердую стенку, разделяющую их. Во-вторых – стенка попеременно находится в контакте то с горячим, то с холодным теплоносителем, передавая теплоту от первого ко второму.

Цель исследований

Снижение затрат эксергии на предпусковую подготовку дизельного двигателя, повышение пусковых качеств и снижение неполноты сгорания в послепусковой период.

Материалы и методы

Объектом исследования являются процессы тепловой подготовки топлива в предпусковой, пусковой и послепусковой период с помощью рекуперативных электротеплообменников, которые устанавливаются на топливопроводах высокого давления; например, патент № 2731505 [10].

Методика исследования базируется на методах эмпирического уровня: описание, сравнение, счет и эксперимент. Кроме того, применялись основные положения технической термодинамики, теплотехники и теплопередачи. Исследования выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ–18509–88 «Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний».

Для достижения поставленной цели была разработана методика численного решения задач применительно к электротеплообменникам типа «змеевик» и на основании выполненных расчетов – конструкция теплообменника, и обоснованы основные его параметры (рис. 1) [10].

Устройство представляет собой часть трубки высокого давления от топливного насоса к форсунке, свернутой в змеевик 3. С торцов змеевик закрывается крышками 2 и 3. К наружным поверхностям крышек приварен цилиндрический кожух 4. В крышке 2 закреплен разъем 5 датчика температуры топлива 6. Сам датчик температуры топлива 6 размещен около трубок, находящихся у выхода из теплообменника 1. В центре крышки 3 просверлено отверстие, в которое вставлена и приварена резьбовая втулка 7.

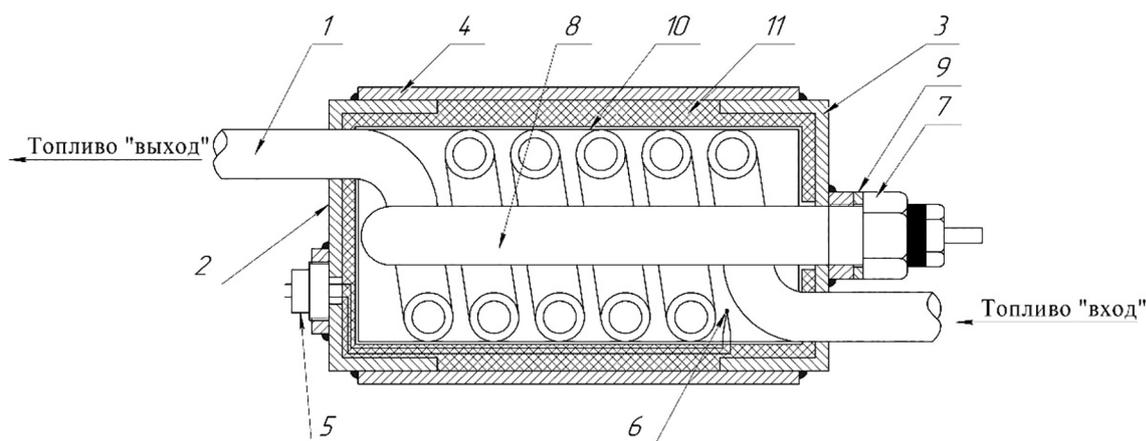


Рис. 1. Устройство электротеплообменника для подогрева топлива в топливопроводе высокого давления дизельного двигателя в предпусковой, пусковой и послепусковой периоды:

- 1 – трубка высокого давления («змеевик»); 2, 3 – крышки: левая, правая; 4 – металлический кожух;
5 – разъем термодатчика; 6 – датчик температуры; 7 – втулка резьбовая; 8 – электронагреватель;
9 – шайба уплотнительная; 10 – фольга алюминиевая; 11 – теплоизоляция

Fig. 1. The device of an electric heat exchanger for heating fuel in the high-pressure fuel line of a diesel engine in the pre-start, start-up and post-start periods: 1 – high pressure pipe (coil); 2, 3 – cover left, right; 4 – metal casing; 5 – thermal sensor connector; 6 – temperature sensor; 7 – threaded bushing; 8 – electric heater; 9 – sealing washer; 10 – aluminum foil; 11 – thermal insulation

Во втулку ввернут штифтовый нагреватель 8. Между нагревателем и резьбовой втулкой установлена уплотнительная шайба 9. Поверхность теплообменника закрывается алюминиевой фольгой 10. Внутренние и наружные поверхности нагревателя и топливопроводов покрываются краской с низкой теплопроводностью, внутренние полости между поверхностями крышек и кожухом заполняются теплоизоляцией 11. Выводы топливопроводов через крышки запаиваются.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. Перед пуском ключ устанавливается в положение «предпусковая подготовка». В этом случае напряжение подается на нагревательный элемент 8. Нагревательный элемент развивает максимальную мощность. Топливо, находящееся в теплообменнике 1, нагревается до 240 °С (режим термофорсирования). О завершении предпусковой подготовки системы подачи топлива к пуску свидетельствует световой или другой сигнал. Далее осуществляется пуск двигателя. Если пуск удачен, то двигатель переходит на режим послепускового прогрева.

При прогреве температура топлива на выходе из теплообменника должна быть понижена до значения, соответствующего оптимальной температуре охлаждающей жидкости в головке блока. Для большинства дизельных двигателей оптимальной температурой ох-

лаждающей жидкости считается температура от 85 до 95 °С. Поскольку теплота передается от наиболее нагретых деталей головки блока, корпуса форсунки и торца распылителя, выходящего в камеру сгорания, то вполне естественно, что температура топлива в кармане распылителя должна быть выше охлаждающей жидкости в головке блока. Экспериментальные исследования показали, что температура топлива в топливном канале, например, для двигателя Д-440 всегда на 2–3 °С выше по сравнению с охлаждающей жидкостью [11]. Поэтому температуру, которая превышает оптимальную температуру охлаждающей жидкости на 2–3 °С, считают оптимальной для топлива, находящегося в топливном канале форсунки.

Следовательно, начиная с предпусковой подготовки до окончания работы трактора, температура топлива в форсунке должна автоматически поддерживаться на уровне (85–95⁺² °С). При увеличении температуры топлива в форсунке до 95⁺² °С и выше нагревательный элемент отключается. Следующее включение нагревателя происходит при снижении температуры топлива до 85 °С и ниже ($\Delta t = 10$ °С). Далее все повторяется.

Считывание информации с датчиков, их обработка и формирование управляющего сигнала осуществляется с помощью блока управления или бортового компьютера.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлена расчетная схема электротеплообменника.

Исходные данные для численных исследований:

C_p – теплоемкость топлива при 240 °С – 2,87 кДж/кг·К;

C_M – теплоемкостью металла – 469 Дж/кг·К;

ρ_T^{240} – плотность дизельного топлива марки «З» при 240 °С – 650 кг/м³;

ρ_T^{-20} – плотность дизельного топлива марки «З» при минус 20 °С – 870 кг/м³;

$g_{ц}$ – цикловая подача при пуске – 140 мм³/цикл; насос – 4ТНМ. 12.88;

n_c – частота вращения коленчатого вала на холостом ходу – 1750 мин⁻¹;

n_n – пусковая частота вращения коленчатого вала – 200 мин⁻¹;

$m_{то}$ – масса деталей теплообменника – 0,212 кг;

d_c – внутренний диаметр трубки теплообменника – 2 мм;

d_b – наружный диаметр трубки теплообменника – 6 мм;

d_c – средний диаметр теплообменника (змеевика) – 20 мм;

U – напряжение питания нагревателя – 12 В;

G_T – часовой расход топлива двигателем без трансмиссии на холостом ходу (1750 мин⁻¹) – 4,9 кг/ч;

t_n – время предпусковой подготовки – (120 с; 270 с);

t_M – минимальная температура «холодного пуска» – минус 20 °С.

Предпусковая тепловая подготовка топлива

По результатам предварительных расчетов принималось число витков змеевика теплообменника $N = 8$. После корректировки число витков было снижено до 6 и сделан еще один

перерасчет, результаты которого представлены в данной статье.

Длина витка:

$$L_b = \pi \cdot d_c, \text{ мм}, \quad (1)$$

$$L_b = 3,14 \cdot 20 = 62,8 \text{ мм}.$$

Длина трубки под теплообменник:

$$L_T = L_b \cdot N, \text{ мм}. \quad (2)$$

$$L_T = 62,8 \cdot 6 = 376,8 \text{ мм}.$$

Объем топлива (V) в змеевике:

$$V = \frac{\pi \cdot d_b^2 \cdot L_T}{4}, \text{ мм}^3. \quad (3)$$

$$V = 3,14 \cdot 376,84 = 1183,2 \text{ мм}^3.$$

Определим количество циклов (Z) с нагретым топливом в змеевике в период предпусковой подготовки с помощью электронагревателя. Один цикл соответствует двум оборотам коленчатого вала:

$$Z = \frac{V}{g_{ц}}, \quad (4)$$

$$Z = \frac{1183,2}{140} = 8,0 \text{ циклов}.$$

Эксергию, которая необходима для нагрева цикловой подачи топлива в топливопроводе до 240 °С с целью повышения надежности пуска двигателя при температуре минус 20 °С, можно определить с помощью уравнения:

$$Q_{ц} = C_{cp} \cdot m_T (T_k - T_n), \text{ Дж}, \quad (5)$$

$$Q_{ц} = C_{cp} \cdot \rho_{cp} \cdot g_{ц} (T_k - T_n), \text{ Дж}, \quad (6)$$

где C_{cp} – средняя теплоемкость топлива, 2,26 кДж/кг·К; m_T – цикловая масса топлива, кг; T_k – конечная температура топлива, К; T_n – начальная температура топлива, К.

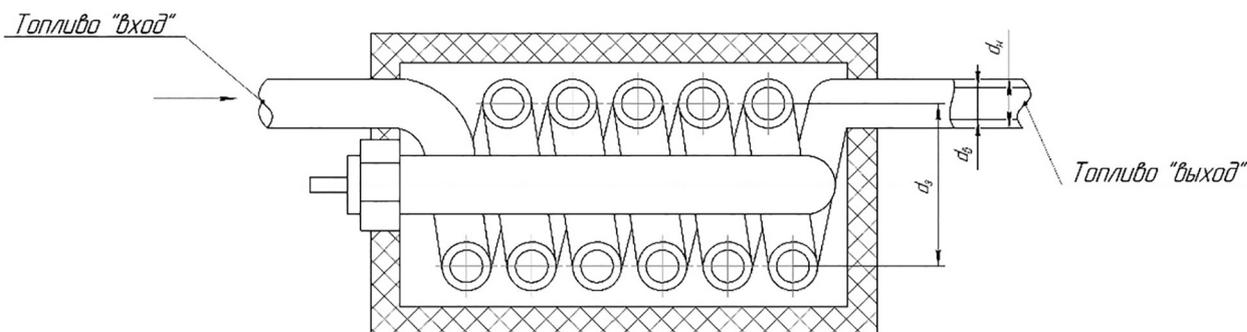


Рис. 2. Расчетная схема электротеплообменника

Fig. 2. Calculation diagram of the electric heat exchanger

Массу цикловой подачи топлива можно определить из уравнения:

$$m_T = \rho_{cp} g^H, \quad (7)$$

где ρ_{cp} – средняя плотность топлива, кг/м³.

$$\rho_{cp} = \frac{\rho_T^{240} + \rho_T^{-20}}{2} = \frac{650 + 870}{2} = 760 \text{ кг/м}^3. \quad (8)$$

Тогда $Q_{ц} = 2,26 \cdot 10^3 \cdot 0,140 \cdot 0,760 \cdot 10^{-3} \cdot 260 = 376,8 \text{ мм}$.

Количество эксергии, необходимое для нагрева этого объема топлива в «змеевике», можно определить как:

$$Q_{3M}^{mm} = Q_{ц} \cdot Z = 62,5 \cdot 8,0 = 0,5 \text{ мм}. \quad (9)$$

Эксергия, аккумулированная корпусом форсунки (частью) и другими деталями, участвующими в теплопередаче:

$$Q_M^{mm} = C_M \cdot m_M \cdot \Delta t = 0,469 \cdot 0,212 \cdot 260 = 25,9 \text{ кДж}. \quad (10)$$

Анализируя полученные результаты – (9) и (10) – можно сказать, что основная часть термической эксергии топлива (до 98 %) в предпусковой период аккумулируется в конструкционных материалах деталей, с поверхностью которых соприкасается нагретое в электротеплообменнике топливо. Подогреватель топлива проточный, коленчатый вал двигателя не вращается, поэтому в предпусковой период в подогревателе нагревается только топливо, находящееся в змеевике. Недостающее количество топлива, которое должно быть подано в камеру сгорания во время пуска (20 с), может нагреваться как за счет эксергии, аккумулированной ранее конструкционными материалами, так и эксергии, поступающей от работающего электронагревателя.

Суммарные затраты эксергии на нагрев топлива и деталей теплообменника в период предпусковой подготовки составляют:

$$\sum_{i=1}^n Q_{TM}^{mm} = Q_{3M}^{mm} + Q_T^{mm} = 0,5 + 25,9 = 26,4 \text{ кДж}. \quad (11)$$

Мощность электротеплообменника при предпусковой подготовке в течение 120 с определится как (12):

$$N_{эн}^n = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{TM}^{mm}}{t^{mm}} = 26,4 \cdot \frac{10^3}{120} = 220,0 \text{ Вт}. \quad (12)$$

Если время предпусковой подготовки увеличить до 270 с, то мощность нагревательного

элемента можно снизить до приемлемого уровня, при котором обеспечена стабильная работа аккумуляторной батареи:

$$N_{эн}^{mm} = \frac{Q_{TM}^{mm}}{t^{mm}} = \frac{26,4}{270} = 98,0 \text{ Вт}. \quad (13)$$

Известно, что бортовая сеть самоходных машин может иметь напряжение 12, 24 и реже – 48 В. На тяжелых машинах с двигателями большой мощности бортовая сеть может быть 24 В или комбинированной – 12/24 В. Пока что наибольшее распространение на автомобилях, тракторах и других самоходных машин получила сеть 12 В и в меньшей степени – комбинированная 12/24 В. Поэтому в дальнейших расчетах принимаем, что электронагреватели питаются от сети напряжением 12 В.

Далее воспользуемся известными уравнениями, чтобы установить количественную зависимость тока электронагревателя от времени его работы в предпусковой период (время 120 с и 270 с).

Определяем ток в цепи (время работы 120 с):

$$J_1 = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{MT}^{mm}}{U \cdot t} = \frac{26,4 \cdot 10^3}{12 \cdot 120} = 18,3 \text{ А}. \quad (14)$$

Определяем ток в цепи (время работы 270 с):

$$J_2 = \frac{\sum_{j=1}^n Q_{MT}^{mm}}{U \cdot t} = \frac{26,4 \cdot 10^3}{12 \cdot 270} = 8,1 \text{ А}.$$

Выбираем нагревательные элементы из числа тех, которые выпускаются серийно, по геометрическим размерам, напряжению, мощности и допустимому времени работы на режиме максимальной мощности. В нашем случае максимальная мощность необходима в период предпусковой подготовки и пуска.

Исследованиями установлено, что только около 2 % эксергии вносится топливом в камеру сгорания, а основная часть идет на разогрев форсунки и головки блока. Незначительная часть эксергии рассеивается в окружающую среду.

Исключить охлаждение подогретого топлива при попадании в канал форсунки можно двумя способами. Есть радикальный вариант: по максимуму исключить соприкосновение нагретого в топливопроводе высокого давления топлива с холодной поверхностью форсунки. Нужна другая конструкция форсунки, которая исключала бы потери термической эксер-

гии топлива, полученной от нагревательного элемента. Форсунка могла бы без потерь эксергии работать в режиме «термофорсирования» при пуске и поддерживать оптимальную температуру топлива в форсунке при прогреве и последующей работе двигателя, независимо от его теплового состояния, с минимальными затратами эксергии.

Второй вариант менее эффективный, но также заслуживает внимания: нагревать не весь двигатель, а только головку блока, что значительно сократит время прогрева и энергозатраты на подготовку двигателя к работе.

Поскольку в головке расположены основные коммуникации двух наиболее важных систем, таких как подачи воздуха и подачи топлива, то быстрый нагрев головки до оптимальной температуры и ее поддержание во время работы гарантирует надежность последующего пуска, сокращение времени послепускового прогрева с максимальной полнотой сгорания топлива и снижение вредных выбросов.

Тепловая подготовка топлива в период пуска

В соответствии с ГОСТ 18509–88 пуск может осуществляться в течение трех попыток длительностью не более 20 с. В дальнейших расчетах принимается во внимание только одна попытка 20 с. Поскольку в период пуска подогрев топлива продолжается, то в теплообменнике аккумулируется достаточное количество эксергии, которое может быть использовано на нагрев топлива при последующих попытках.

Допускаем, что нагрев металлических деталей теплообменника и других деталей, поверхности которых контактируют с нагретым топливом, происходит только во время предпусковой подготовки, и потери теплоты в окружающую среду отсутствуют.

В период пуска подогрев топлива продолжается. Температурный режим остается неизменным.

Время, затраченное на совершение одного цикла при частоте вращения коленчатого вала $n_{\pi} = 200 \text{ мин}^{-1}$, можно определить как:

$$t_{\pi} = \frac{60 \cdot 2}{n_{\pi}} = \frac{60 \cdot 2}{200} = 0,6 \text{ с.} \quad (15)$$

Несложные расчеты показывают, что в течение 20 с времени пуска должно совершиться 34 цикла.

Ранее отмечалось, что топлива, нагретого в змеевике в течение предпусковой подготовки, хватает только на 8 циклов. Недостающая – большая – часть пусковой подачи топлива (26 циклов) подогревается во время пуска, а оставшаяся часть (8 циклов) будет перенесена на последующий после пуска прогрев.

Количество эксергии, которое должно быть использовано в течение 26 пусковых циклов, определится как:

$$Q_{\Gamma}^{26} = Q_{\pi} \cdot Z_{\pi} = 62,5 \cdot 26 = 1,6 \text{ кДж.} \quad (16)$$

Количество эксергии топлива, которое остается в теплообменнике после пуска:

$$Q_{\Gamma}^8 = Q_{\pi} \cdot Z_{\text{ин}} = 62,5 \cdot 8 = 0,5 \text{ кДж.} \quad (17)$$

Допускаем, что в период предпусковой тепловой подготовки топлива в форсунке тратится относительно большое количество эксергии на разогрев деталей топливной аппаратуры и головки блока. Кроме того, принимаем, что при пуске и последующем прогреве затраты на нагрев металлических деталей отсутствуют. Отсутствуют также потери теплоты в окружающую среду.

Определяем суммарные затраты эксергии на нагрев топлива, израсходованного в течение времени пуска:

$$\sum_{i=1}^n Q_{\Gamma}^n = Q_{\text{зм}}^{\text{ин}} + Q_{\Gamma}^{26} = 0,5 + 1,6 = 2,1 \text{ кДж.} \quad (18)$$

откуда $N_{\text{эн}}^n = \frac{Q_{\Gamma}^{26}}{t_{\pi}} = 2,1/20 = 105 \text{ Вт.}$

Далее, применяя основные положения и уравнения, касающиеся теории технической термодинамики и теплопередачи, определим площадь поверхности нагрева, уточним размеры змеевика, а также выберем материал и рассчитаем толщину слоя изоляции [6].

Условия и последовательность решения подобных задач

К теплоизоляционным материалам относятся материалы с малой теплопроводностью. Они состоят из волокнистой, порошковой или пористой основы, заполненной воздухом. Воздух создает термическое сопротивление, а основа материала препятствует появлению естественной конвекции воздуха и переносу теплоты с поверхности теплообменника излучением. Увеличение толщины теплоизоляции повышает суммарное термическое сопротивление, тем самым уменьшает потери теплоты в ОС.

По змеевику (рис. 1), сформированному из части трубки высокого давления, расположенному в неподвижном воздухе (греющая среда с температурой $t = 300$ °С) движется нагреваемая жидкость – дизельное топливо, расход которого $M_1 = 0,638$ кг/ч (пусковой расход топлива). Температура топлива на входе в змеевик $t_1^* = -20$ °С, на выходе – $t_1^{**} = 240$ °С. Внутренний диаметр трубки $d_b = 2$ мм, наружный – $d_n = 6$ мм, материал – сталь.

Средняя по длине теплообменника температура топлива:

$$t_1 = \frac{t_1^* + t_1^{**}}{2} = \frac{-20 + 240}{2} = 110 \text{ °С.} \quad (19)$$

По t_1 находим физические константы дизельного топлива: $\mu_1 = 0,86 \cdot 10^{-3}$ кг/(м·с), $\rho_1 = 767$ кг/м³, $\lambda_1 = 0,1047$ Вт/(м·К), $C_{p1} = 2,26$ кДж/(кг·К), $\nu_1 = 0,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с. $Pr_1 = \mu_1 \cdot C_{p1} / \lambda_1 = 18,25$.

Отношение (Pr_1 / Pr_{w1}) учитывает влияние направления теплового потока.

Количество теплоты, затрачиваемой на нагрев топлива в теплообменнике в секунду:

$$Q_T = M_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1^{**} - t_1^*) = \frac{0,638}{3600} \cdot 2,26 \cdot 10^3 \times (240 - (-20)) = 104,1 \text{ Вт.} \quad (21)$$

Считаем, что скорость движения топлива по змеевику постоянная и определяется по формуле:

$$W_1 = \frac{4M_1}{\pi \cdot d_b^2 \cdot \rho_1 \cdot 3600} = \frac{4 \cdot 0,638}{3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 760 \cdot 3600} = 0,074 \text{ м/с.} \quad (20)$$

Число Рейнольдса для топлива:

$$Re_1 = \frac{W_1 \cdot d_b}{\nu} = \frac{0,074 \cdot 0,002}{0,6 \cdot 10^{-6}} = 247,5. \quad (22)$$

Режим ламинарный, так как $Re_1 < 2300$.

Число Нуссельта для топлива по М.А. Михееву [9]:

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (Pr_1 / Pr_{w1})^{0,25} = 0,021 \cdot 247,5^{0,8} \cdot 18,25^{0,43} \cdot 1,6^{0,250} = 12. \quad (23)$$

Задаемся температурой внутренней стенки, которая омывается топливом: $t_{w1} = 240$ °С, при этом $Pr_{w1} = 11,44$.

Коэффициент теплоотдачи для топлива:

$$\alpha_1 = Nu_{f1} \cdot \frac{\lambda_1}{d_b} = 12 \cdot \frac{0,1047}{0,002} = 628,2 \text{ Вт/м} \cdot \text{К.} \quad (24)$$

Плотность теплового потока:

$$q_1 = \alpha_1 \cdot (t_{w1} - t_1) = 628,2(240 - 110) = 81666 \text{ Вт/м}^2. \quad (25)$$

Тепловой поток на 1 м длины трубы:

$$q_0 = \frac{Q_T}{l} = \frac{104,1}{0,376} = 276,9 \text{ Вт/м.} \quad (26)$$

Температура наружной стенки змеевика теплообменника:

$$t_{w2} = t_{w1} + \frac{q_1 \cdot \delta}{\lambda} = 240 + \frac{81666 \cdot 0,002}{46,9} = 243,5 \text{ °С.}$$

Материал и теплопроводность трубки змеевика: Ст. 20х, ГОСТ 4543–61, $\lambda = 46,9$ Вт/м·К.

Температура внешней поверхности тепловой изоляции при теплопроводности минеральной ваты $\lambda_3 = 0,1$ Вт/м·К:

$$t_{wн} = t_{w1} - \frac{q_0}{\pi 2 \lambda_3} \ln \frac{d_n}{d_b} = 240 - \frac{276,9}{3,14 \cdot 2 \cdot 0,1} \ln \frac{30}{20} = 240 - 179,0 = 61,0 \text{ °С.}$$

Средняя температура наружной стенки змеевика и воздуха внутри теплообменника:

$$t_{m2} = \frac{t_{w2} + t_{н}}{2} = \frac{242 + 300}{2} = 271 \text{ °С.} \quad (27)$$

По t_{m2} находим физические константы (греющей среды) воздуха: $\mu_2 = 30,6 \cdot 10^{-6}$ Н·с/м², $\rho_2 = 0,85$ кг/м³, $C_{p2} = 1,047$ кДж/кг·К, $\lambda_2 = 4,59 \times 10^{-2}$ Вт/м·К, $\nu_2 = 37,14 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $Pr_{w2} = 0,675$, $\beta_2 = 2,9 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

Число Нуссельта для воздуха:

$$Nu_2 = c \cdot (Gr_2 \cdot Pr_2)^n = 0,54(37597)^{0,25} = 7,52. \quad (28)$$

Число Грасгофа для воздуха:

$$Gr_{m2} = \frac{g \cdot d_n^3}{\nu_2^2} \cdot \beta_2 \cdot \Delta T = \frac{9,81 \cdot 0,03^3}{(37,14 \cdot 10^{-6})^2} \times \frac{1}{273 + 70} \cdot (300 - 242) = 5,57 \cdot 10^4.$$

Произведение $(Gr_{m2} \cdot Pr_{m2}) = (5,57 \cdot 10^4 \cdot 0,675) = 37597$. По величине $(Gr_{m2} \cdot Pr_{m2})$ находим $c = 0,54$, $n = 1/4$.

Коэффициент теплоотдачи для воздуха:

$$\alpha_2 = Nu_2 \cdot \frac{\lambda_2}{d_b} = 7,52 \cdot \frac{4,59 \cdot 10^{-2}}{0,002} = 172,6 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}, \quad (29)$$

Коэффициент теплопередачи от воздуха к топливу:

$$h = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} = \frac{1}{1/349,2 + 0,002/46,9 + 1/172,6} = 114,63 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}. \quad (30)$$

Средний логарифмический температурный напор:

$$\begin{aligned} \Delta t_6 &= 300 - (-20) = 320 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \Delta t_m &= 300 - 240 = 60 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \Delta t_{cp} &= \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln(\Delta t_6 / \Delta t_m)} = \frac{260}{\ln(320 / 60)} = 153 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Плотность теплового потока:

$$q_0 = h \cdot \Delta t_{cp} = 114,63 \cdot 153 = 17538,4 \text{ Вт/м}^2. \quad (31)$$

Площадь поверхности нагрева:

$$S = \frac{Q_T}{q_0} = \frac{104,1}{17538,4} = 0,005936 \text{ м}^2. \quad (32)$$

Длина трубки, из которой изготовлен змеевик:

$$l = s / 2\pi \cdot r = 5935,5 / 2 \cdot 3,14 \cdot 3 = 315,9 \text{ мм}. \quad (33)$$

В результате предварительных технических расчетов был выбран средний диаметр витка (20 мм), количество витков (8) и определена длина трубки, из которой изготовлен змеевик. Длина трубки составила 502,4 мм, что на 36 % оказалось больше величины, полученной в ходе окончательного теплового расчета (315,9 мм), или более 5 витков. Округляем количество витков до 6. Таким образом, окончательно длина трубки под змеевик составит 376,8 мм.

Тепловая подготовка топлива при прогреве двигателя на холостом ходу

После пуска и достижения коленчатым валом частоты холостого хода (1750 мин⁻¹) блок управления ограничивает максимальную температуру нагрева топлива в форсунке до 95⁺² °С и поддерживает эту температуру в течение всего прогрева двигателя до нормального теплового состояния.

Эксергия, которая необходима для поддержания температуры топлива в топливопроводе высокого давления на уровне 95⁺² °С, может быть определена с помощью уравнения (5).

Экспериментальными исследованиями установлено, что часовой расход топлива (G_T)

у нормально прогретого двигателя Д-440 на холостом ходу (1750 мин⁻¹) равен 4,9 кг/ч.

Определим секундный расход топлива и цикловую подачу:

$$m_c = \frac{G_T \cdot 10^6}{3600 \cdot i}, \quad (34)$$

где i – число цилиндров; m_c – секундный расход топлива одним цилиндром, мг/с; G_T – часовой расход топлива, кг/ч.

$$m_c = \frac{4,9 \cdot 10^6}{3600 \cdot 4} = 340 \text{ мг/с}.$$

$$\text{Время цикла: } t_{ц} = \frac{2 \cdot 60}{1750} = 0,069 \text{ с/цикл}.$$

Цикловая подача топлива на холостом ходу (1750 мин⁻¹) будет равна:

$$m_{ц} = 340 \cdot 0,069 = 23,4 \text{ мг/цикл}.$$

Максимальная величина эксергии, которую нужно затратить в течение одного цикла (холостой ход) на нагрев топлива в топливопроводе до 95⁺² °С:

$$\begin{aligned} Q_n^{1750} &= 2,26 \cdot 10^3 \cdot 0,0234 \cdot 10^{-3} \cdot 117 = \\ &= 6,2 \text{ Дж/цикл}. \end{aligned}$$

Мощность нагревательного элемента на холостом ходу можно определить из уравнения (13):

$$N^{xx} = \frac{Q_n^{1750}}{t_{ц}} = \frac{6,2}{0,069} = 89,9 \text{ Вт}.$$

Таким образом, расчеты показывают, что подогрев топлива в системе питания на линии высокого давления с целью повышения пусковых качеств двигателя и полноты сгорания в послепусковой период технически возможен. В то же время, стало очевидно, что мощность нагревательного элемента значительно больше в период предпусковой подготовки, чем требуется при пуске и прогреве, при сопоставимых временных отрезках. Это объясняется тем, что в предпусковой период много эксергии тратится, как акцентировалось ранее, на нагрев «железа», с которым соприкасается нагретое топливо. Например, для подогрева и поддержания оптимальной температуры топлива в форсунке при пуске требуется 2,1 кДж, а при предпусковой подготовке – 26,4 кДж. Из равенств (5, 6) следует, что величина суммарных затрат эксергии на нагрев «железа» теплообменника и топлива, находящегося в змеевике, определяются

теплоемкостью, массой, плотностью и температурой (начальной и конечной) деталей теплообменника и топлива, находящегося в нем. Суммарные затраты ($\sum Q_{MT}^{ин} = 26,4$ кДж) непосредственно не зависят от мощности нагревательного элемента. От мощности будет зависеть только время достижения конечной температуры нагреваемых материалов. Чтобы сохранить суммарные затраты до и после корректировки расчетов на одном и то же уровне необходимо увеличить время предпусковой подготовки топлива с 40 до 270 с, в результате чего пропорционально снижается необходимая мощность нагревательного элемента (до 98,0 Вт). Одновременно уменьшается ток в цепи электронагревателя до 8,1 А.

После подбора на рынке подходящих нагревательных элементов, а также с учетом полученных результатов, расчеты могут быть еще раз уточнены.

Одновременно возникает ряд вопросов к конструкции форсунки. Вполне очевидно, что рабочая температура топлива в форсунке должна быть постоянной и независимой от теплового состояния двигателя, степени его загрузки и температуры окружающей среды. Например, для двигателя Д-440 температура топлива в форсунках на 2–3 °С больше оптимального режима двигателя. Это означает то, что даже в летний период эксплуатации топливо в форсунке перед пуском желательно нагревать до оптимальной величины (90–95⁺² °С) от бортовой сети или постороннего источника теплоты, а затем поддерживать ее на постоянном уровне независимо от теплового состояния двигателя. На современных автотракторных дизельных двигателях подогрев топлива в форсунках, как правило, не предусмотрен, что негативно сказывается на пусковых качествах двигателя и полноте сгорания топлива во время его прогрева.

В качестве примера рассмотрим наиболее простой вариант модернизации форсунки: установку форсунки в головку блока двигателя ЯМЗ-238НД трактора К-744. Форсунка имеет сравнительно большую массу (более 0,6 кг), устанавливается в латунный стакан головки и уплотняется медной шайбой, которая способствует хорошей теплопередаче от нагретого топлива в корпус форсунки, далее – в головку. Вполне вероятно, что большая часть эксергии горячего топлива будет аккумулироваться корпусом форсунки и головкой блока, снижая

эффективность работы электронагревателя топлива.

Частично решение этой проблемы возможно путем теплоизоляции нагретого топлива, проходящего через топливный канал, от корпуса форсунки, установкой в каналы теплоизолирующих втулок, нанесением теплоизолирующих покрытий на внешние поверхности трубок высокого давления и корпуса форсунок. Электронагреватели топлива необходимо размещать на топливопроводах как можно ближе к форсункам.

В то же время, модернизация не должна вызывать перегрев форсунок, что может привести к их отказу.

Заключение

1. Разработана методика численного решения задач применительно к расчету электроподогревателя топлива типа «змеевик». Предлагаемая методика позволяет выполнить необходимые расчеты электротеплообменника и определить его технические параметры на трех эксплуатационных режимах: предпусковой, пусковой и послепусковой прогрев на холостом ходу (при 1750 мин⁻¹).

2. Предложена, рассчитана и запатентована конструкция электроподогревателя топлива, размещенного непосредственно на топливопроводе высокого давления.

3. После корректировки расчетов были уточнены технические параметры электронагревателей, которые можно устанавливать, например, на двигателях Д-440:

- мощность – не менее 100 Вт;
- ток – не более 8 А;
- напряжение 12 В;
- режим «термофорсирования» – не более 240 °С;
- время работы на предпусковом режиме 270 с;
- время работы на режиме пуска 20 с;
- температура топлива при послепусковом прогреве и последующей работе – не более 95⁺² °С.

4. Эффективность работы предлагаемого электротеплообменника можно значительно повысить с помощью новой конструкции форсунки с теплоизоляцией топливного канала от ее корпуса.

5. Исследованиями установлено, что одним из промежуточных вариантов может быть отдельный подогрев головки блока, в результате чего сокращаются время разогрева и энергоза-

траты на подготовку машины к работе. Улучшается полнота сгорания топлива в послепусковой период прогрева.

Литература

1. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. McGraw-Hill. 2019. 1056 с.
2. Балабин В.И., Васильев В.Н. Особенности применения термофорсирования топлива на локомотивных дизелях // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 4. С. 107–113.
3. Крохта Г.М. Особенности холодного пуска двигателя 6ЧН 13,0/11,5 и послепускового прогрева моторно-трансмиссионной установки трактора Т-150К // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 1. С. 31–35.
4. Крохта Г.М. Управление качеством процесса смесеобразования в период пуска и послепускового прогрева дизельного двигателя // Тракторы и сельхозмашины. 2019. № 4. С. 3–12.
5. Celik A., Yilmaz M., Yildiz O.F. Improvement of diesel engine startability under low temperatures by vortex tubes // Energy reports. 2020. № 6. С. 17–27.
6. Ramadhas A.S., Xu H. Intake air heating strategy to reduce cold-start emissions from diesel engines // Biofuels. 2018. Vol 9. Iss 3. С. 405–414.
7. Mekonen M.W., Sahoo N. Effect of fuel preheating with blended fuels and exhaust gas recirculation on diesel engine operating parameters // Renewable Energy Focus. 2018. Vol 26. С. 58–70.
8. Крохта Г.М. Эксергетический метод и критерии оценки готовности дизельного двигателя к пуску // Вестник НГАУ. 2012. № 1 (22). Часть 2. С. 132–135.
9. Юдаев Б.Н. Теплопередача: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1981. 310 с.
10. Крохта Г.М., Вагайцев П.С., Усатых Н.А., Хомченко Е.Н. Устройство для подогрева топлива в системе высокого давления дизельного двигателя в предпусковой и пусковой периоды: патент № 2731505 (РФ). 2020.
11. Крохта Г.М. Особенности эксплуатации тракторов в условиях низких температур: монография / Новосиб. гос. аграр. ун-т, Инженер. Ин-т. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2017. 376 с.

References

1. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals [Tekst] / John B. Heywood. McGraw-Hill. 2019. 1056 p.
2. Balabin V.I., Vasil'yev V.N. Features of the use of thermal boosting of fuel on locomotive diesel engines. *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii*. 2015. No 4, pp. 107–113 (in Russ.).
3. Krokhta G.M. Cold start of the 6ChN 13,0/11,5 engine and post-start warming up of the engine-transmission unit of the T-150K tractor. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. No 1, pp. 31–35 (in Russ.).
4. Krokhta G.M. Quality control of the mixture formation process during start-up and post-start heating of a diesel engine. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2019. No 4, pp. 3–12 (in Russ.).
5. Celik A., Yilmaz M., Yildiz O.F. Improvement of diesel engine startability under low temperatures by vortex tubes // *Energy reports*. 2020. № 6. С. 17–27.
6. Ramadhas A.S., Xu H. Intake air heating strategy to reduce cold-start emissions from diesel engines // *Biofuels*. 2018. Vol 9. Iss 3. С. 405–414.
7. Mekonen M.W., Sahoo N. Effect of fuel preheating with blended fuels and exhaust gas recirculation on diesel engine operating parameters // *Renewable Energy Focus*. 2018. Vol 26. С. 58–70.
8. Krokhta G.M. The exergy method and criteria for assessing the readiness of a diesel engine for start-up. *Vestnik NGAU*. 2012. No 1 (22). Chast' 2, pp. 132–135 (in Russ.).
9. Yudayev B.N. *Teplotperedacha* [Heat transfer]: Uchebnik dlya vuzov. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Vyssh. Shkola Publ., 1981. 310 p.
10. Krokhta G.M., Vagaytsev P.S., Usatykh N.A., Khomchenko YE.N. *Ustroystvo dlya podogreva topliva v sisteme vysokogo davleniya dizel'nogo dvigatelya v predpuskovoy i puskovoy periody* [Device for heating fuel in the high pressure system of a diesel engine during pre-start and start-up periods]: patent No 2731505 (RF). 2020.
11. Krokhta G.M. *Osobennosti ekspluatatsii traktorov v usloviyakh nizkikh temperature* [Operation of tractors at low temperatures]: monografiya. Novosib. gos. agrar. un-t, Inzhener. In-t. Novosibirsk: ITS NGAU «Zolotoy koloS» Publ., 2017. 376 p.

ОБОСНОВАНИЕ ФОРМЫ И ПАРАМЕТРОВ НОВЫХ СОРТИРОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

JUSTIFICATION OF THE FORM AND PARAMETERS OF THE NEW SORTING DEVICE FOR GRAIN MATERIALS

Э.Б. ИСКЕНДЕРЗАДЕ, д.т.н.
Б.А. АББАСОВ
Ш.В. АХМЕДЛИ
У.Р. ИСЛАМОВА

Азербайджанский технический университет, Баку,
Республика Азербайджан, isgenderzadeh@rambler.ru

E.B. ISGANDARZADA, DSc in Engineering
B.A. ABBASOV
SH.V. AHMADLI
U.R. ISLAMOVA

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan,
isgenderzadeh@rambler.ru

Статья посвящена обоснованию формы и параметров нового сортировочного устройства для зернистых материалов. Обоснована актуальность предлагаемого нового устройства, имеющего большое значение для машиностроительного и сельскохозяйственного производства. Предложена математическая модель сортировки зернистых материалов.

Принимая во внимание актуальность устройства, были обоснованы форма, параметры конструкции и режимы работы различных элементов сортировки и разными показателями эффективности. Для этой цели было разработано новое шнековое устройство сортировки, оснащенное различными средствами автоматизации для повышения производительности, и получены удовлетворительные результаты. На данное сортировочное устройство, снабженное автоматическим регулятором, получен патент Агентства интеллектуальной собственности Азербайджанской Республики.

Предлагаемое устройство не создает условий для загрязнения производственной площади, отличается конкурентными преимуществами и высокими показателями технико-экономической эффективности.

Ключевые слова: устройство, обоснование, форма, параметр, новый сортировщик, пищевое сырье.

Для цитирования: Искендерзаде Э.Б., Аббасов Б.А., Ахмедли Ш.В., Исламова У.Р. Обоснование формы и параметров новых сортировочных устройств для зернистых материалов // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 55–62. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-55-62.

The article is devoted to the substantiation of the shape and parameters of a new sorting device for granular materials. The materials of the article substantiate the relevance of the proposed new device, which has a great place in mechanical engineering and agricultural production.

The shape, design parameters and modes of operation of various elements with different: sorting assortment and efficiency indicators were substantiated taking into account the relevance of the device. For this purpose, a new auger sorting device was developed. It was equipped with various automation devices to increase productivity. The satisfactory results were obtained. This sorting device, equipped with an automatic regulator, received a patent from the Copyright Agency of Azerbaijan Republic.

The proposed device does not create conditions for pollution of the production area, it has competitive advantages and high rates of technical and economic efficiency.

Keywords: device, justification, form, parameter, new sorting unit, food raw materials.

Cite as: Isgandarzada E.B., Abbasov B.A., Ahmadli SH.V., Islamova U.R. Justification of the form and parameters of the new sorting device for grain materials. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 4, pp. 55–62 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-55-62.

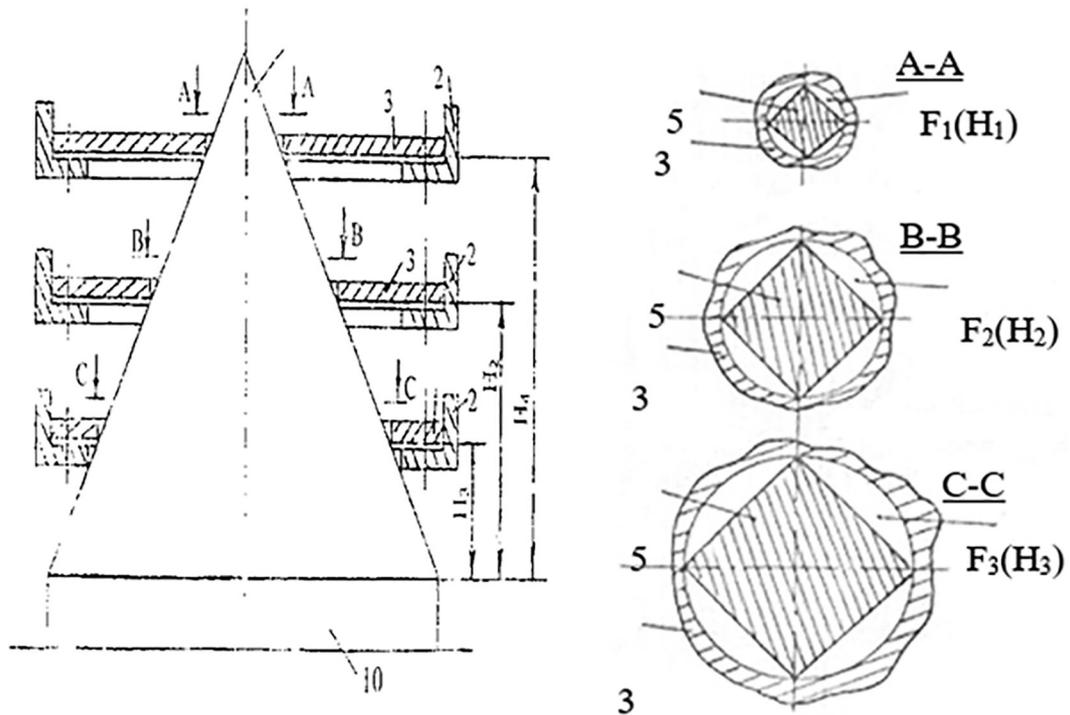


Рис. 2. Расчетная схема установки сортировки зернистых материалов

Fig. 2. Calculation scheme of the installation for sorting granular materials

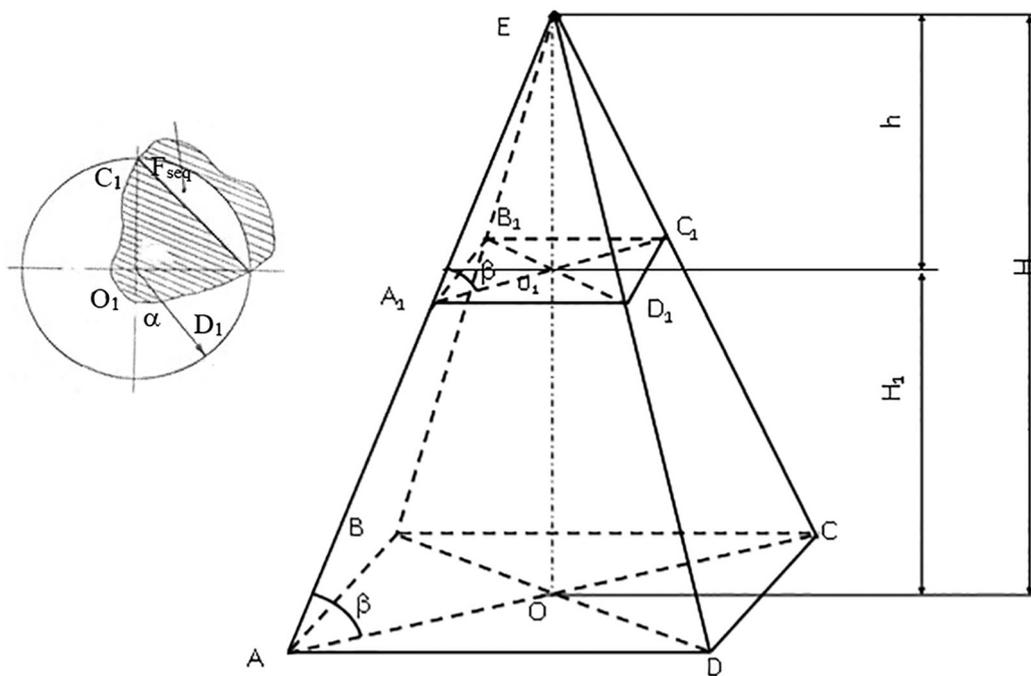


Рис. 3. Расчетные схемы устройства сортировки зернистых материалов

Fig. 3. Calculation schemes of the device for sorting granular materials

Здесь F_{seq} – площадь сегмента круга; $F_{секO_1C_1D_1}$ и $F_{\Delta O_1C_1D_1}$ – соответственно площадь сектора круга $O_1C_1D_1$ и треугольника $O_1C_1D_1$;

Если в уравнении (1) учесть нижеследующие выражения для $F_{секO_1C_1D_1}$ и $F_{\Delta O_1C_1D_1}$:

$$F_{секO_1C_1D_1} = \frac{1}{2}rl = \frac{1}{2}r(\alpha_{rad} \cdot r) = \frac{r^2}{2}\alpha_{rad},$$

$$F_{\Delta O_1C_1D_1} = \frac{r^2}{2}\sin \alpha,$$

то

$$F_{seq} = \frac{r^2}{2}\alpha_{rad} - \frac{r^2}{2}\sin \alpha = \frac{r^2}{2}(\alpha_{rad} - \sin \alpha), \quad (2)$$

где r – внутренний радиус шайбы, касающейся ее, на высоте которой была вычислена правильная пирамида; α – центральный угол $C_1O_1D_1$, соответствующий сектору круга (рис. 3), для пирамиды с четырьмя боковыми сторонами $\alpha = 90^\circ = 1,57 \text{ rad}$; l – длина дуги C_1D_1 , соответствующая сегменту круга ($l = \alpha_{rad} \cdot r = 1,57r$).

Определим связь F_{seq} в выражении (2) с параметрами R и H для правильной пирамиды с высотой H_1 и числом боковых граней, равным 4.

Из рис. 3 следует (если принять $AO = R$ и $A_1O_1 = r$):

$$\text{tg}\beta = \frac{H}{R}, \quad \text{tg}\beta = \frac{H - H_1}{r}.$$

Тогда

$$r = \frac{R(H - H_1)}{H}. \quad (3)$$

Учитывая (3), из выражения (2) получим:

$$F_{seq} = \frac{[R(H - H_1)]^2}{2H^2}(\alpha_{rad} - \sin \alpha). \quad (4)$$

В виду того, что для расчетного случая R , β и H в выражении (4) являются постоянными величинами, имеем:

$$F_{seq} = f(H_1). \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет сделать вывод о том, что с увеличением H_1 площадь живого сечения (окна сортировки), где разгружается сортируемый материал, уменьшается, а с уменьшением, наоборот, увеличивается.

Учитывая, что масса отсортированного материала напрямую связана с площадью живого сечения окна (F_{seq}), через которую она удаляется, корпус блока для сортировки предлагаемых зернистых продуктов легко регулируется с по-

мощью шайб и пирамидальных деталей, установленных в выходном окне крышки. Другими словами, пирамидальный вид сортировочного устройства с различными по ширине сечениями может быть получен путем изменения положения сортировочного устройства по вертикальной оси относительно корпуса в форме пирамиды [15–24].

Конструкция устройства для сортировки зернистых материалов следующая.

Устройство для сортировки зернистого материала (рис. 1) имеет расположенное в дне бункера 1 крышку 2, в которой образуется четыре симметрично расположенные выходные окна, сортирующие материал, образованные правильной пирамидой 5 и шайбообразными участками боковых сторон основания 3.

Сыпучий зернистый материал, помещенный в бункер 1, отсортировывается путем просыпания через окна сортировки [$F_{iseq}(H_i)$] (рис. 3; представлены только два) и собирается через трубки 8 и 9 в бункерах 6 и 7. Для обеспечения устойчивости установки для сортировки зернистых материалов основание правильной пирамиды 5 установлено на неподвижной опоре 10.

Принимая во внимание актуальность устройства, были обоснованы форма, параметры конструкции и режимы работы различных элементов сортировки и разными показателями эффективности. Для этой цели было разработано новое шнековое устройство сортировки (рис. 4), оснащенное различными средствами автоматизации для повышения производительности, и получены удовлетворительные результаты.

Использование в этом устройстве автоматического регулятора Ползунова – Уатта обеспечивает регулировку пропускной способности винтового транспортера из упругого материала, который транспортирует зернистый продукт, в зависимости от его расхода, что приводит к повышению качества и производительности. Поскольку эффективность винтового транспортера в основном обусловлена его шагом и угловой скоростью вала, кинематическая связь муфты транспортера с винтовым транспортером в предлагаемом новом сортировочном узле, а также регулятор угловой скорости его вала, установленный в бункере, способствуют его высоким технологическим возможностям.

С учетом вышеизложенного разработано устройство для дозирования сортируемых зер-

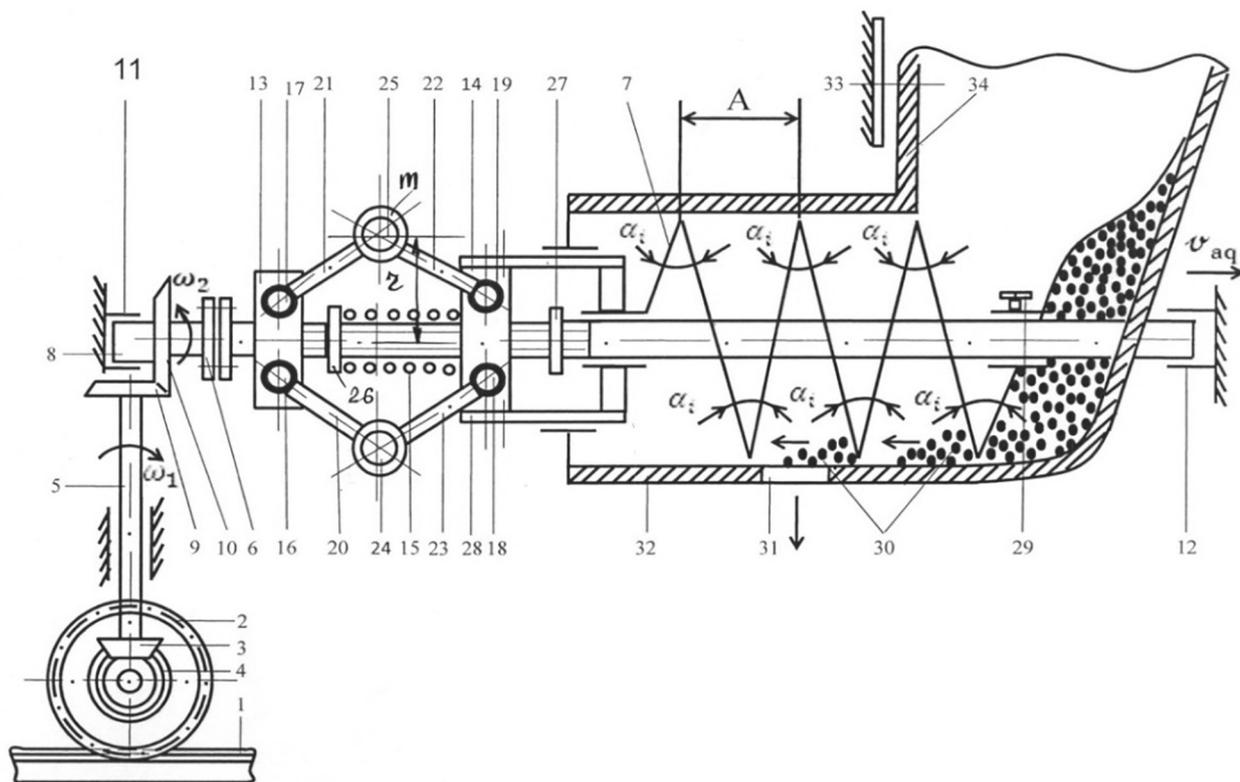


Рис. 4. Технологическая схема устройства для дозирования сортируемых зернистых материалов

Fig. 4. Flow diagram of a device for dispensing sorted granular materials

нистых материалов (рис. 4). На данное сортировочное устройство, снабженное автоматическим регулятором, получен патент Агентства интеллектуальной собственности Азербайджанской Республики (№ I 2019 0079) [10].

На рис. 4 показана четырехступенчатая трансмиссия с зубчатым колесом 2, кинематически связанная с реверсивным электродвигателем 3. Она при помощи вала 5 приводится в движение. В устройстве используется пара дополнительных зубчатых колес 9 и 10, которые передают вращение на вал винта 8 с помощью муфты 6.

Принцип работы устройства для дозирования сортируемых зернистых материалов заключается в следующем. Технологическая способность выполнять сортировку достигается за счет поступательного перемещения массы в области, где установлено сортировочное устройство. Если рассмотреть технологическую схему устройства, как уже упоминалось выше, масса зернистого материала изменяется при разных скоростях подачи дозируемого материала. В предлагаемом блоке с увеличением скорости распределения (для увеличения производительности) шаг

спирали (A), выполненной из упругого материала, будет зависеть от скорости движения дозирующей массы.

В зависимости от угловой скорости вала 8 на сепаратор шнека, изготовленный из эластичного материала, воздействует центробежная сила $F = m\omega^2r$, которая влияет на положение движущейся пластины 7 центробежного регулятора, а также одновременно на шаг A изменяя его выходные отверстия для зернистого материала, взятого из бункера машины.

В результате производится сортировка зернистых сыпучих (текучих) материалов (сельскохозяйственного сырья, минеральных удобрений) и плавная регулировка норм расхода сыпучих материалов.

Выводы

В результате экспериментальных исследований было разработано новое устройство для сортировке зернистого пищевого сырья, имеющее высокие экономические и качественные показатели и обладающее большими технологическими возможностями. Изменяя параметры конструкции нового сортировочного устройства, можно легко регулировать его

производительность при высокой экономической эффективности.

В результате исследования устройства проанализирована зависимость сортировки зернистого пищевого сырья: от установки пластины в сортировочном устройстве; линейной скорости загрузчика сортировочного устройства; производительности бункера сортировочного устройства; а также угла установки смесителей на конвейере сортировочного устройства.

Предлагаемый процесс сортировки отличается от известных аналогичных устройств тем, что устраняет механическое повреждение пищевого сырья, подлежащего сортировке, в результате:

- обеспечения непрерывности сортировки и оптимального режима работы;
- универсальности;
- простоты в эксплуатации.

Предлагаемое устройство не создает условий для загрязнения производственной площади, отличается конкурентными преимуществами и высокими показателями технико-экономической эффективности.

Литература

1. Ахмадиев Ф.Г., Гизязтов Р.Ф., Назипов И.Т. Математическое моделирование процессов классификации зернистых материалов на ситах // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 12–1. С. 30–35.
2. Бабаев Ш.М. Оборудование для сортировки зернистых материалов: патент № I 2015 0082, Государственный комитет по стандартизации, метрологии и патентам Азербайджанской Республики. Баку: 2015.
3. Бабаев Ш.М. и др. Дозатор сыпучих материалов: авт. свид. СССР № 1713472, Госуд. ком. по изобретениям и открытиям при Госуд. комитете СССР по науке и технике Госкомизобретений Б.И. № 7. Москва, 1992.
4. Бабаев Ш.М. и др. Устройство для регулирования нормы высева сыпучих материалов: патент № 2093000 Комитет Российской Федерации по патентам и товарным знакам (Роспатент); Б.и. № 23. Москва, 1997.
5. Бабаев Ш.М. Устройство для сортировки сыпучих материалов: патент Азерб. Республики № 20090182. Баку, 2008.
6. Барский М.Д. Оптимизация процессов разделения зернистых материалов. М.: Недра, 2008. 168 с.
7. ГОСТ 24057–80. Техника сельскохозяйственная. методы эксплуатационно-технологической оценки машин по этапе испытаний. Москва, 1980.
8. Искендерзаде Э.Б., Ш.М. Бабаев, Б.А. Аббасов, Ш.В. Ахмедли, Л.С. Алиева. Определение живого сечения окна для сортировки зернистых материалов // Актуальные вопросы современной науки. 2018. № 1 (17). С. 27–32.
9. Искендерзаде Э.Б., Бабаев Ш.М., Аббасов Б.А. и др. Теоретическое исследование устройства для дозирования зернистых материалов: сборник научных трудов Азербайджанского технического университета. № 2. Баку, 2018. С. 4.
10. Искендерзаде Э.Б., Бабаев Ш.М., Аббасов Б.А., Ахмедли Ш.В., Меликов А.Г., Велиев Г.С. Оборудование для сортировки зернистых материалов: патент № I 2019 0079. Агентство интеллектуальной собственности Азербайджанской Республики. Баку, 2019.
11. Искендерзаде Э.Б., Багиров Б. Гидрофикация сельскохозяйственных машин / Европейская Академия естественных наук. Ганновер (Германия), 2018. 268 с.
12. Голушкова С.В., Сиваченко Л.А. Процесс грохочения зернистых материалов. М.: Белгород, 2005. 176 с.
13. Кольцов В.П., Елшин В.В., Нгуен В.Х. Дозаторы для подачи зернистых материалов в зону высокого давления // Вестник ИрГТУ. 2013. № 5 (76). С. 38–42.
14. Левитин А.В. Метод декомпозиции: Быстрая сортировка // Алгоритмы: введение в разработку и анализ. М.: «Вильямс», 2006. С. 174–179.
15. Пустовойта В.С. и др. Способ сортирования и очистки семян в жидкости. авт. свид. СССР № 1311776, ВОЗВ 1/06, А01С 1/00; ВО2В 1/02. Официальный бюллетень Государственного ком. СССР по делам изобр. и открытий № 19. М., 1987. Ст. 32.
16. Abbasov B.A., Isgandarzada E.B., Babayev Sh.M. The creation of a new device for sorting grain seeds. Materials of the international symposium EANW, vol. I (economic, technical, biological), Hannover, Germany, 2020, p. 94–97.
17. Avallone E.A., Baumeister T., Sadegh A.M. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 14th edition. The McGraw-Hill Companies Inc (USA), 2010. 130 p.
18. Budynas R.G., Nisbett J.K. Shigley's Mechanical Engineering Design. McGraw Hill Primis, 2011. 80 p.
19. Isgandarzada E.B., S.V. Ahmadli, A.B. Abbasov. Preparation for standardization of two-stage mill-

ing and its metrological support. "Global Science and Innovation" materials of the VIII international scientific conference, June 22nd-23rd 2016. Chicago, USA, p. 151–156.

20. Isgandarzada E.B., G.N. Abbasova, B.A. Abbasov, Sh.V. Ahmadi Section flatcutter-disc tool and disc's metrological research. International Journal of Engineering Research & Science (IJOER), ISSN: [2395-6992], [Vol. 2, Issue. 7, July, 2016]. India, p. 130–134.
21. Jones F.D., Ryffel H.H., Horton H.L., Oberg E. Machinery's Handbook. 34th edition. Industrial Press. (USA), 2010. 110 p.
22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskoe-uravnoveshivanie-vibratsionnoy-sortirovochnoy-mashiny/viewer>.
23. URL: <https://logists.by/content/osnovnye-tipy-sortirovochnyh-konveyerov>.
24. URL: <https://www.ngpedia.ru/id139951p3.html>.

References

1. Akhmadiyev F.G., Gizzyatov R.F., Nazipov I.T. Mathematical modeling of the processes of classification of granular materials on sieves. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii*. 2019. No 12–1, pp. 30–35 (in Russ.).
2. Babayev SH.M. Oborudovaniye dlya sortirovki zernistykh materialov [Equipment for sorting granular materials]. Gosudarstvennyy Komitet po Metrologii, Standartizatsii i Patentam Azerbaydzhanskoy Respubliki. Patent No İ 2015 0082. Baku: 2015.
3. Babayev SH.M. i dr. Dozator sypuchikh materialov [Dispenser for bulk materials]. Avt. svid. SSSR No 1713472 Gosud. kom. po izobreteniyam i otkrytiyam pri Gosud. Komiteta SSSR po nauke i tekhnike Goskomizobreteniy B.I. No 7. Moscow, 1992.
4. Babayev SH.M. i dr. Ustroystvo dlya regulirovaniya normy vyseva sypuchikh materialov [The device for regulating the seeding rate of bulk materials]. Patent No 2093000 Komitet Rossiyskoy Federatsii po Patentam i tovarnym znakom (Rospatent) B.I. No 23 Moscow 1997.
5. Babayev SH.M. Ustroystvo dlya sortirovki sypuchikh materialov [Device for sorting bulk materials]. Patent Azerb. Respubliki No 20090182 Baku, 2008.
6. Barskiy M.D. Optimizatsiya protsessov razdeleniya zernistykh materialov [Optimization of processes for the separation of granular materials]. Moscow: Nedra Publ., 2008. 168 p.
7. GOST 24057-80. Tekhnika sel'skokhozyaystvennaya. metody ekspluatatsionno-tekhnologicheskoy otsenki mashin po etape ispytaniy [Agricultural machinery. Methods of operational and technological evaluation of machinery at the testing stage]. Moscow, 1980.
8. Iskenderzade E.B., SH.M. Babayev, B.A. Abbasov, SH.V. Akhmedli, L.S. Aliyeva. Determination of the open area of the window for sorting granular materials. *Aktual'n-yye voprosy sovremennoy nauki*. 2018. No 1 (17), pp. 27–32 (in Russ.).
9. Iskenderzade E.B., Babayev SH.M., Abbasov B.A. i dr. Theoretical study of a device for dispensing granular materials. *Sbornik nauchnykh trudov Azerbaydzhanskogo Tekhnicheskogo Universiteta*. No 2, Baku, 2018, 4 p.
10. Iskenderzade E.B., Babayev SH.M., Abbasov B.A., Akhmedly SH.V., Melikov A.G., Veliyev G.S. Oborudovaniye dlya sortirovki zernistykh materialov [Equipment for sorting granular materials]. Agentstvo intellektual'noy sobstvennosti Azerbaydzhanskoy Respubliki. Patent No İ 2019 0079. Baku, 2019.
11. Iskenderzade E.B., Bagirov B. Hydrofication of agricultural machinery. *Yevropeyskaya Akademiya Yestestvennykh Nauk, Gannover (Germaniya)*, 2018. 268 p.
12. Golushkova S.V., Sivachenko L.A. Protssess grokhocheniya zernistykh materialov [Screening process of granular materials]. Moscow: Izd-vo «BelgoroD» Publ., 2005. 176 p.
13. Kol'tsov V.P., Yelshin V.V., Nguyen V.KH. Dispensers for feeding granular materials to the high pressure zone. *Vestnik IRGTU*. 2013. No 5 (76), pp. 38–42 (in Russ.).
14. Levitin A.V. Decomposition Method: Quick sorting. *Algoritmy: vvedeniye v razrabotku i analiz*. Moscow: «Vil'yamS», 2006, pp. 174–179 (in Russ.).
15. Pustovoyta V.S. i dr. Sposob sortirovaniya i ochistki semyan v zhidkosti [Method for sorting and cleaning seeds in liquid]. Avt. Svid. SSSR No 1311776, VOZV 1/06, A01S 1/00; VO2V 1/02. *Ofitsial'nyy byulleten' Gosudarstvennogo kom. SSSR po delam izob. i otkrytiy*. Moscow. No 19, 1987, p. 32.
16. Abbasov B.A., Isgandarzada E.B., Babayev Sh.M. The creation of a new device for sorting grain seeds. *Materials of the international symposium EANW, vol. I (economic, technical, biological), Hannover, Germany, 2020, p. 94–97.*
17. Avallone E.A., Baumeister T., Sadegh A.M. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 14th edition. The McGraw-Hill Companies Inc (USA), 2010. 130 p.

18. Budynas R.G., Nisbett J.K. Shigley's Mechanical Engineering Design. McGraw Hill Primis, 2011. 80 p.
19. Isgandarzada E.B., S.V. Ahmadli, A.B. Abbasov. Preparation for standardization of two-stage milling and its metrological support. "Global Science and Innovation" materials of the VIII international scientific conference, June 22nd-23rd 2016. Chicago, USA, p. 151–156.
20. Isgandarzada E.B., G.N. Abbasova, B.A. Abbasov, Sh.V. Ahmadli Section flatcutter disc tool and disc's metrological research. International Journal of Engineering Research & Science (IJOER), ISSN: [2395-6992], [Vol. 2, Issue. 7, July, 2016]. India, p. 130–134.
21. Jones F.D., Ryffel H.H., Horton H.L., Oberg E. Machinery's Handbook. 34th edition. Industrial Press. (USA), 2010. 110 p.
22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskoe-uravnoveshivanie-vibratsionnoy-sortirovochnoy-mashiny/viewer>.
23. URL: <https://logists.by/content/osnovnye-tipy-sortirovochnyh-konveyerov>.
24. URL: <https://www.ngpedia.ru/id139951p3.html>.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГИДРОАППАРАТУРЫ ЖЕЛЕЗНЕНИЕМ В ПОТОКЕ ЭЛЕКТРОЛИТА

INTENSIFICATION OF THE RECOVERY OF HYDRAULIC EQUIPMENT PARTS BY IRON IN THE ELECTROLYTE FLOW

Ю.Е. КИСЕЛЬ, д.т.н.
С.П. СИМОХИН
С.А. МУРАЧЕВ

ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», Брянск, Россия, Simonin77@mail.ru

YU.E. KISEL', Dsc in Engineering
S.P. SIMOKHIN,
S.A. MURACHEV

Bryansk State Engineering and Technological University, Bryansk, Russia, Simonin77@mail.ru

Предложена технология безваннового железнения деталей в потоке электролита с одновременным гидромеханическим активированием наращиваемой поверхности, показаны ее преимущества перед традиционным видом нанесения покрытий. Изучены структура, некоторые физико-механические и эксплуатационные свойства железных покрытий в зависимости от режимов электролиза и состава электролитов. Показана возможность высокоскоростного электроосаждения железа с широким спектром физико-механических свойств. Установлены режимы электролиза, позволяющие получать качественные прочносцепленные «чистые» железные покрытия с износостойкостью, в несколько раз превышающей закаленные легированные стали, и скоростью роста осадков, в десятки раз большей, чем при традиционном железнении. Разработан типовой технологический процесс железнения деталей, который апробирован на примере восстановления золотников гидрораспределителей сельскохозяйственных машин. Предложены конструкции установки и электрохимической ячейки для железнения золотников гидрораспределителей, обеспечивающие оптимальные гидродинамические условия при нанесении покрытий на изношенные поверхности. Приведены рекомендации по постэлектролизной обработке восстановленных деталей железнением. Выполнены стендовые и полевые испытания гидрораспределителей с восстановленными золотниками, которые подтвердили результаты лабораторных исследований и показали, что за период эксплуатации неисправностей выявлено не было. Технико-экономические расчеты показали высокую эффективность предлагаемой технологии в сравнении с традиционным железнением. Внедрение технологии на производстве позволит сократить производственные площади и затраты времени на восстановление деталей за счет увеличения производительности процесса железнения и сокращения числа операций, уменьшить затраты материалов для приготовления электролитов за счет сокращения операции анодной обработки и промывок, повысить надежность технологии за счет улучшения ее структурной схемы.

Ключевые слова: прочность сцепления, микротвердость, износостойкость, технологический процесс, ячейка.

Для цитирования: Кисель Ю.Е., Симохин С.П., Мурачев С.А. Интенсификация восстановления деталей гидроаппаратуры железнением в потоке электролита // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 63–70. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-63-70.

The technology of bath-free ironing of parts in an electrolyte flow with simultaneous hydromechanical activation of the growing surface is proposed. Its advantages over the traditional type of coating are introduced. The structure, some physicochemical and operational properties of iron coatings were studied depending on the electrolysis regimes and the composition of electrolytes. The possibility of high-speed electrodeposition of iron with a wide range of physical and mechanical properties is shown. There were shown the electrolysis modes, which make it possible to obtain high-quality strong-adhered pure-iron coatings with a wear resistance several times higher than hardened alloy steels and a precipitation growth rate tens of times higher than with traditional ironing. A typical technological process of parts ironing was developed. It was tested on the example of restoration of hydraulic valve spools of agricultural machinery. The design of an installation and an electrochemical cell for ironing the valve hydraulic distributors, providing optimal hydrodynamic conditions when applying coatings to worn surfaces, was proposed. Recommendations for the post-electrolysis treatment of restored parts by iron are given. Bench and field tests of hydraulic valves with remanufactured valves were carried out. They confirmed the results of laboratory studies, and showed that no malfunctions were identified during the operation period. Technical and economic calculations have shown the high efficiency of the proposed technology in comparison with traditional ironing. The introduction of the technology in production will reduce the production area and the time spent on restoring parts by increasing the productivity of the iron process and reducing the number of operations, reducing the cost of materials for preparing electrolytes by reducing the operation of anodic treatment and washing, and increasing the reliability of the technology by improving its structural scheme.

Keywords: adhesion strength, microhardness, wear resistance, technological process, cell.

Cite as: Kisel' YU.E., Simokhin S.P., Murachev S.A. Intensification of the recovery of hydraulic equipment parts by iron in the electrolyte flow. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 4, pp. 63–70 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-63-70.

Введение

Для интенсификации электролитического железнения, расширения номенклатуры восстанавливаемых деталей сельскохозяйственной техники и одновременного упрощения технологического процесса наращивания металла разработан безваннный метод нанесения покрытий в проточном электролите [1–5]. При помощи приспособлений детали помещают в электрохимическую ячейку, или их поверхность, подлежащая нанесению покрытий, превращается в закрытую гальваническую ванну. Вместо погружения всей детали в электролит рабочий раствор подается насосом к месту нанесения покрытий. В этом случае отпадает необходимость применять ванны больших размеров, изолировать поверхности, не подлежащие покрытию, применять подвесные устройства.

Нанесение железных осадков в потоке электролита с одновременным гидромеханическим активированием наращиваемой поверхности (за счет воздействия скоростных гетерофазных потоков с грубодисперсными твердыми частицами) позволяет значительно повысить производительность процесса. При железнении таким способом с увеличением интенсивности перемешивания величина диффузионного пограничного слоя уменьшается, а количество диффундирующего вещества (ионов железа) возрастает. Поэтому повышается возможность без ущерба для электрохимического процесса увеличить плотность тока и получать плотные осадки с хорошими механическими и эксплуатационными свойствами. Однако сведения об их физико-механических свойствах ограничены. Не установлено, какие режимы нанесения и состав электролита-суспензии (содержание частиц дисперсной фазы в электролите) обеспечивает высокую износостойкость покрытий в условиях абразивного изнашивания. Для разработки технологического процесса получения гальванических покрытий необходимо выбрать оптимальные условия получения наиболее износостойкой матрицы.

Цель исследований

Разработка технологии восстановления деталей безванновым способом в потоке электролита.

Материалы и методы

Влияние добавок и параметров электролиза на прочность сцепления покрытий проводили

с применением центрального ротатбельного униформ – планирования второго порядка при $k = 3$. Обработку результатов эксперимента проводили по стандартной методике [6, 7].

Покрытия получали из хлористого электролита-суспензии (ЭС) железнения ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 500 \pm 10 \text{ кг/м}^3$) при режимах электролиза: pH – $0,5 \pm 0,1$; температура ЭС (Т) – $40 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; скорость потока электролита (v) – $1 \dots 9 \text{ м/с}$; содержание частиц электрокорунда белого в ЭС (марки F100) – $0 \dots 150 \text{ г/л}$; катодная плотность тока (D_k) – $100 \dots 500 \text{ А/дм}^2$. После нанесения покрытия образцы нейтрализовали и стабилизировали в течении 10 суток.

Установка для нанесения покрытия на образцы включала электролизеры, источник тока, термостат, приборы для регулирования и контроля параметров электролиза (рис. 1).

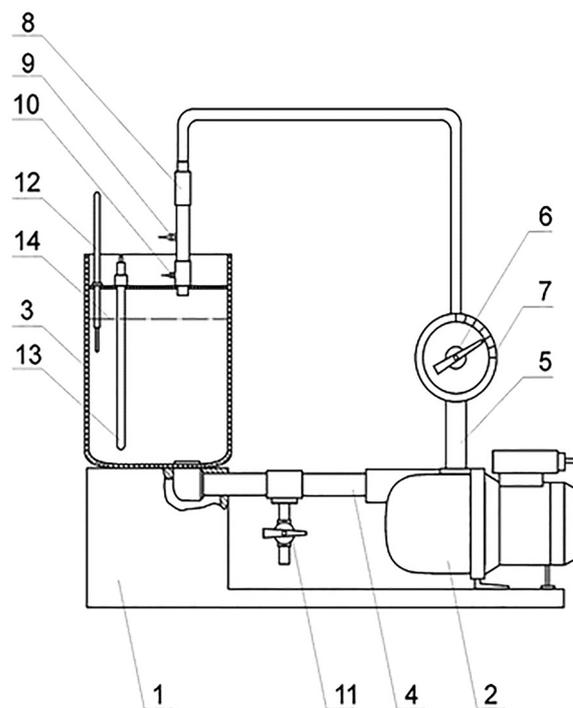


Рис. 1. Экспериментальная установка для нанесения покрытий на образцы:

- 1 – основание; 2 – мотор-насос; 3 – ванна ($0,01 \text{ м}^3$); 4 – всасывающий трубопровод;
- 5 – подающий трубопровод; 6 – кран регулировочный;
- 7 – диск со шкалой; 8 – ячейка; 9 – клемма питания анода;
- 10 – клемма питания катода;
- 11 – кран сливной; 12 – термометр; 13 – контактный нагреватель; 14 – уровень электролита

Fig. 1. Experimental setup for coating samples:
1 – base; 2 – motor pump; 3 – bath ($0,01 \text{ m}^3$);
4 – intake pipeline; 5 – supply pipeline; 6 – control valve; 7 – disc with a scale; 8 – cell; 9 – anode supply terminal; 10 – cathode supply terminal; 11 – drain valve; 12 – thermometer; 13 – contact heater; 14 – electrolyte level

Источником тока служили выпрямители типа ВСА-50. Раствор в ванне железнения (объемом 15 литров) подогревался и стабилизировался по температуре с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$ с помощью термостата. Кислотность электролита контролировали ионометром ЭВ-74.

Прочность сцепления определяли методом кольцевого сдвига [8, 9] на цилиндрических образцах из стали 35 (длина 60 мм, диаметр 12 мм, толщина покрытия $0,5 \pm 0,1$ мм), которые получали в электрохимической ячейке (рис. 2).

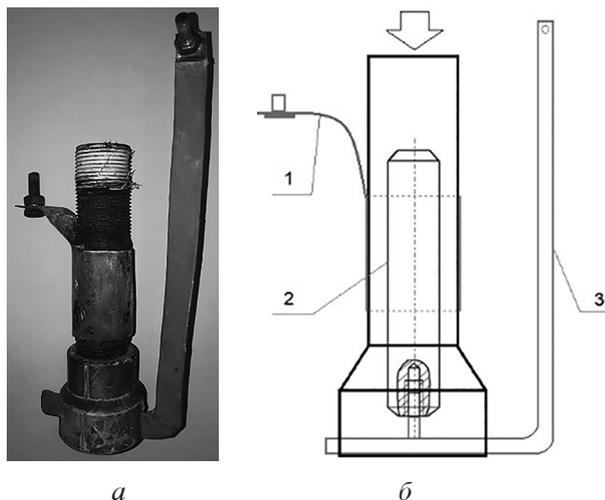
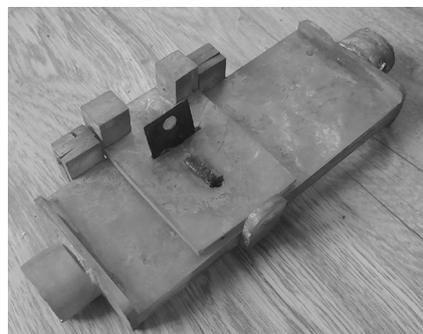


Рис. 2. Ячейка для нанесения осадков на образцы при исследовании их прочности сцепления с основой:

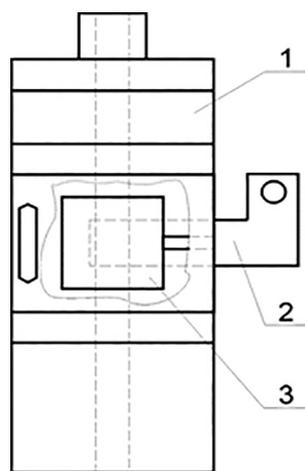
а) общий вид ячейки; б) схема ячейки:
 1 – анод; 2 – образец; 3 – катод

Fig. 2. Cell for depositing precipitates on samples in the study of their adhesion strength to the base:

а) general view of the cell; б) cell diagram:
 1 – anode; 2 – sample; 3 – cathode



а



б

Рис. 3. Ячейка для нанесения покрытий на образцы при исследовании их износостойкости:

1 – корпус; 2 – электрод; 3 – образец

Fig. 3. Cell for applying coatings to samples in the study of their wear resistance:

1 – body; 2 – electrode; 3 – sample

Исследования покрытий на абразивное изнашивание проводились в соответствии с ГОСТ 23.208–79. Электрохимические покрытия толщиной 0,3...0,5 мм наносили на пластины из стали 35 с размерами 30×30×1 мм в электрохимической ячейке (рис. 3). Время испытаний образцов определялось необходимостью получения ощутимой величины износа (J , мг), который определяли весовым методом с погрешностью $5 \cdot 10^{-8}$ кг. В качестве абразивного материала использовали речной песок, с размером зерен не более 1 мм. Эталоны сравнения служили образцы из сталей: 65Г закаленная и 35.

Микроструктуру изучали на поперечных шлифах образцов после механических испытаний с помощью микроскопов МИМ-8. Микротвердость (H_μ) измеряли на ПМТ-3М по ГОСТ 9450–76.

Повторность испытаний в опытах составляла от 3 до 20. Опытные данные обрабатывали методами математической статистики. Для построения функциональных зависимостей использовали регрессионный анализ [6].

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что микротвердость, прочность сцепления с основой и износостойкость покрытий, зависела от параметров электролиза. При регрессионном анализе трехфакторного эксперимента были получены эмпирические зависимости прочности сцепления и износа покрытий от параметров процесса электролиза (скорость потока электроли-

та – X_1 ; плотность тока, А/дм², X_2 ; содержание частиц – X_3):

$$\sigma_{\text{сш}} = 219,1 + X_1 + 17,3 \cdot X_2 - 18,6 \cdot X_3 + 2,3 \cdot X_1^2 + 1,2 \cdot X_2^2 + 0,3 \cdot X_3^2 + 3,0 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,3 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,3 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (1)$$

$$J = 10,6 - 1,5 \cdot X_1 - 2,5 \cdot X_2 + 0,9 \cdot X_3 + 1,9 \cdot X_1^2 + 0,5 \cdot X_2^2 + 0,6 \cdot X_3^2 + 2,9 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,8 \cdot X_1 \cdot X_3 - 6,0 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (2)$$

Анализ результатов исследований показал, что наибольшее влияние на прочность сцепления и износостойкость покрытий оказывала плотность катодного тока (рис. 4).

Это влияние наиболее заметно при изучении свойств осадков, полученных при режимах электролиза, соответствующих «звездным» точкам плана эксперимента. Увеличение катодной плотности тока приводило к снижению прочности сцепления с 240...250 до 120...150 МПа и увеличению износа покрытий (рис. 4). Осадки, полученные при высоких плотностях тока из скоростного потока и низком содержании частиц, имели наименьшую прочность сцепления (140...150 МПа) и износостойкость, которые обусловлены их низким качеством и высокими внутренними напряжениями (рис. 5). Их структура характеризовалась сеткой сквозных трещин, разделяющих осадок на крупные блоки. Это может быть результатом действия интенсивно выделяющегося во-

дорода и накопившихся в прикатодной зоне чужеродных частиц, которые гидроабразивный поток не в полной мере удалял с поверхности катода. Хотя покрытия имели высокую микротвердость (рис. 5), они не обладали высокой износостойкостью, поскольку при их деформировании в процессе нагружения происходит развитие готовых очагов разрушения.

Увеличение содержания частиц электрокорунда в электролите приводило к увеличению прочности сцепления и износостойкости покрытий (см. рис. 4). Введение в электролит абразивных частиц способствовало получению монолитных осадков или структуры с мелкой сеткой микротрещин. Вероятно, это обусловлено повышением эффективности перемешивания прикатодного слоя и снижения перенапряжения при выделении осадка на катоде, очисткой поверхности катода от выделяющегося водорода и чужеродных частиц.

Можно отметить, что структура электролитического железа, полученного в условиях гидромеханического активирования с увеличением скорости потока электролита-суспензии более 3...4 м/с при постоянных остальных условиях электролиза, отличалась отсутствием обычной слоистости, наблюдаемой у покрытий, получаемых при стационарных условиях электролиза. Таким образом, нестационарные режимы электроосаждения, обеспечивающие получение осадков с микротвердостью выше 3,5...4,0 ГПа, являются границей раздела области получения трещиноватых разупрочненных покрытий.

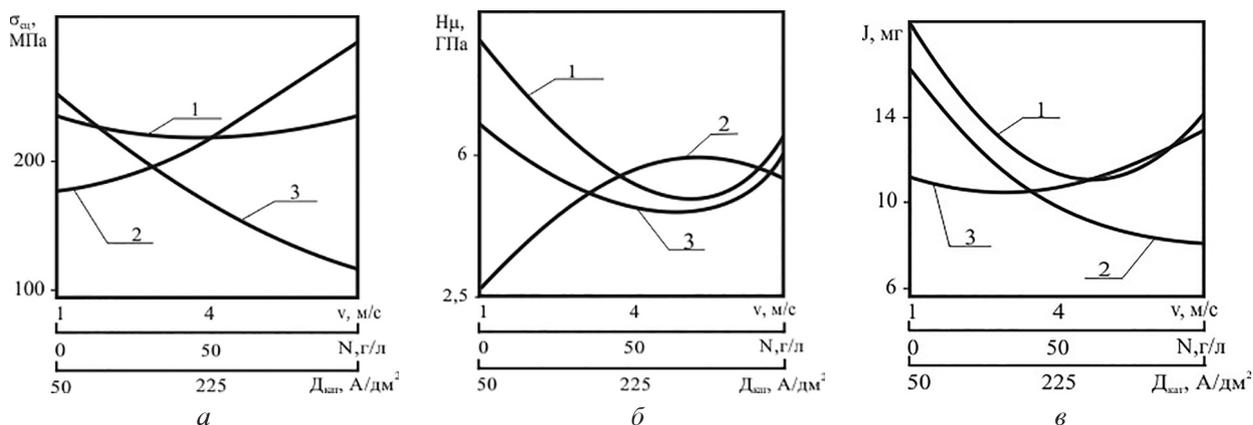


Рис. 4. Влияние параметров электролиза на прочность сцепления покрытия с основой (а), микротвердость (б) и износ (в):

- 1 – скорость потока электролита-суспензии; 2 – содержание дисперсных частиц; 3 – катодная плотность тока

Fig. 4. Influence of electrolysis parameters on the adhesion strength of the coating to the base (a), microhardness (b) and wear (c): 1 – flow rate of the electrolyte-dispersion; 2 – content of dispersed particles; 3 – cathode current density

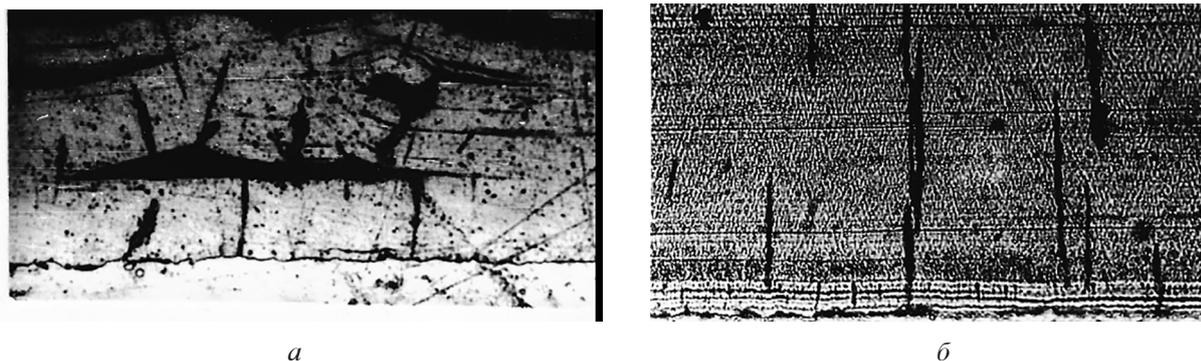


Рис. 5. Влияние условий электролиза на микроструктуру электроосажденного железа ($\times 400$):
а) разрушенные разупрочненные осадки; б) монолитные осадки

Fig. 5. The influence of electrolysis conditions on the microstructure of electrodeposited iron ($\times 400$):
a) destroyed softened deposits; b) monolithic sediments

Увеличение содержания наполнителя в ЭС до $80\text{...}120 \text{ кг/м}^3$ приводило к формированию структуры покрытий с густой сеткой микро-трещин (рис. 6), что способствовало увеличению износостойкости покрытий и прочности сцепления их с основой до $260\text{...}280 \text{ МПа}$.

При изломе покрытия не отделялись от подложки (рис. 6). Подобное изменение механических свойств покрытия можно попытаться объяснить изменением их внутренних напряжений растяжения, которые с увеличением микропористости покрытий частично «снимаются» [5]. Такая структура, обладая низким уровнем остаточных внутренних напряжений, вследствие более глубокого разрушения покрытий в процессе электролиза, приводила к увеличению микротвердости и износостойкости осадков.

Таким образом, для получения прочносцепленных и износостойких покрытий, имеющих высокую микротвердость ($4\text{...}5 \text{ ГПа}$), оптимальную микроструктуру и высокую скорость роста осадков ($1,5\text{...}3 \text{ мм/ч}$), необходимо поддерживать наиболее благоприятные состав и режимы электролиза: скорость потока ЭС – $3\text{...}4 \text{ м/с}$, содержание частиц в ЭС – $80\text{...}120 \text{ г/л}$, D_k – $150\text{...}300 \text{ А/дм}^2$. Соблюдение рекомендуемых режимов электролиза позволяет получать покрытия с износостойкостью в $1,5\text{...}2$ раз большей по сравнению со сталью 65Г закаленной (серийного лемеха) и в $3\text{...}5$ раз чем со сталью 35 нормализованной.

Результаты лабораторных исследований были использованы для разработки технологии восстановления деталей сельскохозяйственных машин в потоке электролита,

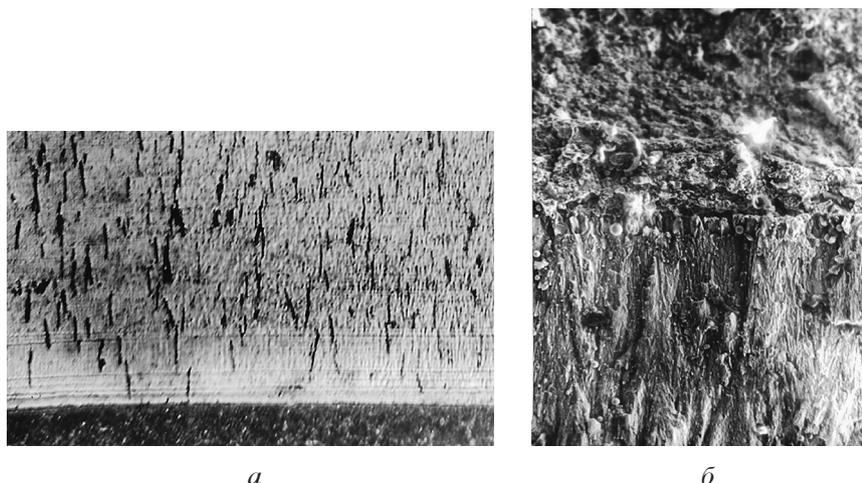


Рис. 6. Микроструктура ($\times 400$) (а) и структура поперечного излома осадков железа ($\times 1000$) (б),
полученных при оптимальных условиях электролиза

Fig. 6. Microstructure ($\times 400$) (a) and structure of transverse fracture of iron deposits ($\times 1000$) (b),
obtained under optimal electrolysis conditions

апробацию которого выполняли на примере золотников гидрораспределителей.

В результате исследований процесса электроосаждения железа в условиях гидромеханического активирования катода была установлена возможность высокоскоростного электроосаждения покрытий с широким спектром физико-механических свойств. Реализация многофакторных ЦКР планов позволила установить область режимов электролиза, в которой были получены качественные осадки, толщиной 0,2...1,0 мм, с выходом по току 80...90 %. Микротвердость осадков находилась в пределах 5,5...6,5 ГПа. В данной области условий электроосаждения покрытия имели упорядоченную пористую структуру, обеспечивающую их высокую маслосмочность и стойкость к задиру.

Вместе с тем, для реализации результатов исследований восстановления золотников гидрораспределителей необходимо было разработать общую технологическую схему восстановления деталей железнением в условиях гидромеханического активирования, осуществить опытную проверку технологии и работоспособности покрытий в условиях полевой эксплуатации и оценить технико-экономическую оценку технологии.

Технологический процесс должен включать следующие операции: предварительная подготовка поверхности (механическая обработка), обезжиривание, промывка, анодная обработка, электроосаждение и окончательная механическая обработка.

Очистку, мойку и дефектовку деталей можно принять стандартными согласно требованиям [3, 4]. Электрохимическое обезжиривание деталей целесообразно проводить в стандартном электролите при 1,0...2,0 А/дм² или венской известью.

Разработке технологии восстановления золотников гидрораспределителей предшествует, как правило, анализ состояния ремонтного фонда, на основе которого определяется основные составляющие величины припуска на предварительную механическую обработку [10]. При ванновом железнении для повышения эффективности восстановления деталей, как правило, рекомендуется разделить детали на размерные группы в зависимости от величины износа и установить для каждой группы необходимую продолжительность нанесения покрытий. При проточном железнении эту операцию можно исключить.

Учитывая, что исходная шероховатость деталей развивается в результате роста осадков, целесообразно предварительную механическую обработку завершить доводочными операциями (чистовым шлифованием и хонингованием). В этом случае сокращается припуск на окончательную механическую обработку и, соответственно, количество операций окончательной механической обработки покрытия.

Существенное упрощение технологии скоростного электроосаждения может быть достигнуто при выполнении операции анодной обработки и электроосаждения покрытия в рабочем электролите. Для полного удаления анодного шлама с поверхности детали необходимо поддерживать скорость потока и содержание абразивных частиц не менее 3 м/с и 80 г/л соответственно. Режимы анодной обработки: $T = 100...120$ с, $D_a = 6...10$ кА/м². Режимы необходимо уточнять в зависимости от марки стали, из которой изготовлен золотник.

Электроосаждение покрытия необходимо начинать с выхода на рабочий режим, который осуществляют в 3 этапа: установление плотности тока на уровне 0,05...0,2 кА/м² в течение 200...300 сек.; ступенчатое увеличение плотности тока до 5...10 кА/м² в течение 300...480 сек.; выход на рабочий режим в течение 60...180 сек. Скорость потока электролита на первом этапе выхода по току можно поддерживать на уровне 1...1,5 м/с. На втором этапе выхода на режим необходимо установить рабочую скорость потока электролита на уровне 3...5 м/с. В дальнейшем процесс ведут на рабочем режиме электроосаждения.

Время выхода на рабочий режим электроосаждения можно значительно сократить, если на начальном этапе установить высокую рабочую скорость потока электролита (6...8 м/с). В этом случае начальные плотности тока могут быть увеличены (до 1...3 кА/м²).

После нанесения покрытия ячейку с золотником отключают от установки. Затем золотник из ячейки демонтируют, промывают холодной водой и нейтрализуют в растворе каустической соды.

Предварительную механическую обработку восстановленных золотников рекомендуется проводить шлифованием на режимах, рекомендованных для закаленных сталей [10]. Для определения припуска на окончательную механическую обработку поверхности золотников гидрораспределителей можно применить известную методику [10].

Технологический процесс апробировался на участке ремонта гидрораспределителей ООО «ГидроРемСервис». Изношенные отверстия корпусов гидрораспределителей восстанавливали алмазным хонингованием и притиркой.

Нанесение покрытий проводили на опытной установке проточного железнения в лаборатории строительного института Брянского ГИТУ (рис. 7). Состав электролита: $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} - 500...550 \text{ кг/м}^3$, электрокорунд белый (марки F100) – 80...100 г/л. Режимы нанесения покрытий: $\text{pH} - 0,3-0,5$; $D_{\text{к}} - 100...500 \text{ А/дм}^2$; $T = 40-50 \text{ }^\circ\text{C}$; скорость потока ЭС – 3...4 м/с. Для нанесения покрытий на золотники гидрораспределителей была разработана электрохимическая ячейка (рис. 4).

После нанесения покрытий золотники шлифовали до требуемых размеров и притирали. Регулировку гидрораспределителей после сборки выполняли на стенде КИ-4815М.

Испытания гидрораспределителей с восстановленными золотниками проводили на опытном стенде ООО «ГидроРемСервис» и в хозяйствах Брянской области. Опытные гидрораспределители работали в период с марта 2018 г. по февраль 2020 г. на двух тракторах ЮМЗ-6, выполняющих различные виды сельскохозяйственных работ. Неисправностей ги-

дрораспределителей за период эксплуатации выявлено не было.

Таким образом, результаты эксплуатационных испытаний полностью подтвердили лабораторные исследования. Технологический процесс был принят к внедрению на ряде предприятий Брянской области. Техничко-экономическая оценка технологии восстановления деталей железнением при нестационарных режимах электролиза, выполненная на примере золотников гидрораспределителей, показала ее высокую эффективность в сравнении с ванновым способом. Основные факторы, определяющие эффективность технологии:

- сокращение производственных площадей, занятых технологическим оборудованием, за счет изменения технологической схемы процесса и применения одного и того же выпрямителя на операциях анодной обработки и нанесения покрытий;
- сокращение затрат времени и электроэнергии на восстановление деталей за счет увеличения производительности процесса железнения и сокращения числа операций;
- уменьшение затрат материалов для приготовления электролитов за счет сокращения операции анодной обработки и промывок;
- повышение надежности технологии за счет улучшения ее структурной схемы.

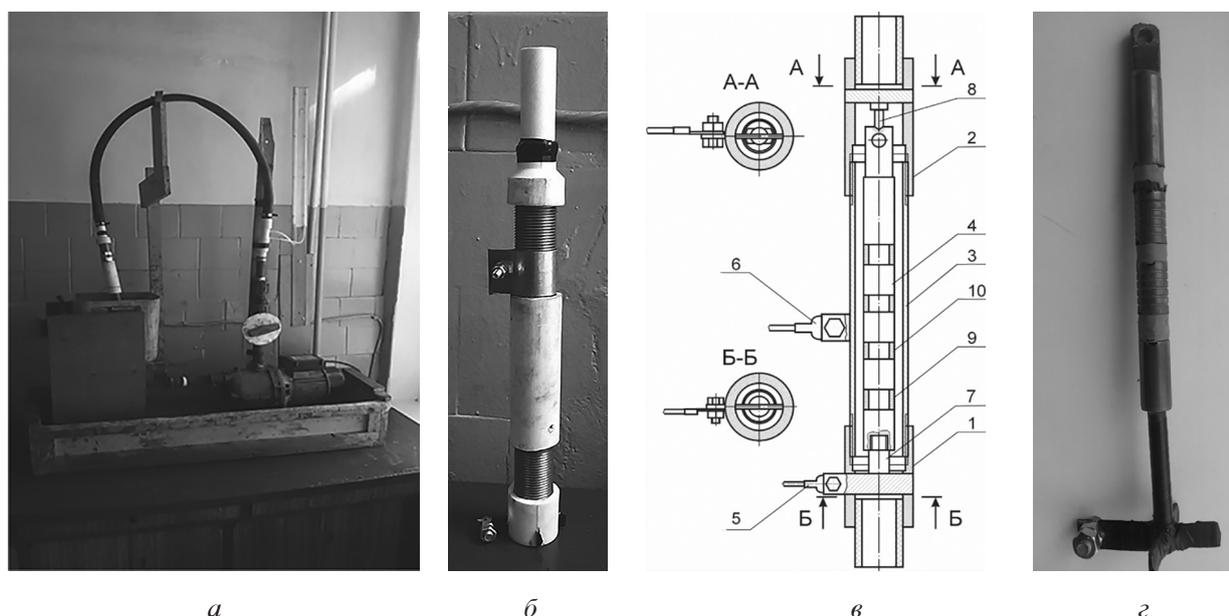


Рис. 7. Общий вид установки (а) и ячейки (б), схема ячейки (в) и золотник гидрораспределителя Р 100 после нанесения покрытия (г)

Fig. 7. General view of the installation (a) and the cell (b), scheme of the cell (c) and the valve of the P 100 hydraulic distributor after coating (d)

Вывод

Нанесение железных осадков в потоке электролита с одновременным гидромеханическим активированием наращиваемой поверхности (за счет воздействия скоростных гетерофазных потоков с грубодисперсными твердыми частицами) позволяет без ущерба для электрохимического процесса увеличить плотность тока (до 200...300 А/дм²) и значительно повысить производительность процесса. Установлены режимы нанесения качественных железных покрытий, имеющих высокую прочность сцепления и обладающих повышенной – до 2 раз – износостойкостью по сравнению с закаленными легированными сталями.

Разработаны технологический процесс, установка и оснастка нанесения покрытий на золотники гидрораспределителей. Проведена опытно-производственная проверка технологии, показавшая высокую эффективность и целесообразность ее внедрения на ремонтных предприятиях.

Литература

1. Юдин В.М., Вихарев М.Н., Слинко Д.Б. Восстановление посадочных отверстий корпусных деталей гальваническими покрытиями // Технический сервис машин. 2019. № 4 (137). С. 152–159.
2. Спицын И.А., Юдин В.М., Захаров Ю.А., Голубев И.Г. Восстановление чугунных деталей сельскохозяйственной техники гальваническим цинкованием с механической активацией катодной поверхности // Техника и оборудование для села. 2020. № 9 (279). С. 38–42.
3. Курчаткин В.В., Тататоркин В.М., Батищев А.Н., Голубев И.Г. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве. М.: Academia, 2013. 464 с.
4. Технология ремонта машин / под ред. Е.А. Пучина. М.: КолосС, 2007. 488 с.
5. Гурьянов Г.В. Электроосаждение износостойких композиций. Кишинев: Штиинца, 1986. 240 с.
6. Колемаев В.А., Староверов О.В., Турундаевский В.Б. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1991. 400 с.
7. Юдин М.И. Планирование эксперимента и обработка его результатов. Краснодар: КГАУ, 2004. 239 с.
8. Кисель Ю.Е. Повышение долговечности деталей сельскохозяйственной техники электротермической обработкой композиционных электрохимических покрытий: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Саратов, 2014. 37 с.

9. Гурьянов Г.В., Кисель Ю.Е. Износостойкие электрохимические сплавы и композиты на основе железа. Брянск: БГИТА, 2015. 98 с.
10. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: справочник / В.И. Баранников [и др.]. М.: Машиностроение, 1990. 373 с.

References

1. Yudin V.M., Vikharev M.N., Slinko D.B. Restoration of bore holes of body parts with galvanized coatings. *Tekhnicheskij servis mashin*. 2019. No 4(137), pp. 152–159 (in Russ.).
2. Spitsyn I.A., Yudin V.M., Zakharov YU.A., Golubev I.G. Restoration of cast iron parts of agricultural machinery by galvanizing with mechanical activation of the cathode surface. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*. 2020. No 9 (279), pp. 38–42 (in Russ.).
3. Kurchatkin V.V., Tatatorkin V.M., Batishev A.N., Golubev I.G. *Tekhnicheskoye obsluzhivaniye i remont mashin v sel'skom khozyaystve* [Maintenance and repair of machinery in agriculture]. Academia Publ., 2013. 464 p.
4. *Tekhnologiya remonta mashin*. Pod red. YE.A. Puchina. Moscow: KoloSS Publ., 2007. 488 p.
5. Gur'yanov G.V. *Elektroosazhdeniye iznosostoykikh kompozitsiy* [Electrodeposition of wear-resistant compositions]. Kishinev: Shtiintsa Publ., 1986. 240 p.
6. Kolemeyev V.A., Staroverov O.V., Turundayevskiy V.B. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of probability and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1991. 400 p.
7. Yudin M.I. *Planirovaniye eksperimenta i obrabotka yego rezul'tatov* [Experiment planning and processing of its results]. Krasnodar: KGAU Publ., 2004. 239 p.
8. Kisel' YU.E. *Povysheniye dolgovechnosti detaley sel'skokhozyaystvennoy tekhniki elektrotermicheskoy obrabotkoy kompozitsionnykh elektrokhimicheskikh pokrytiy: avtoref. dis. doktora tekhnicheskikh nauk* [Increasing the durability of agricultural machinery parts by electrothermal treatment of composite electrochemical coatings: Dissertation for Degree of DSc in Engineering]. Saratov, 2014. 37 p.
9. Gur'yanov G.V., Kisel' YU.E. *Iznosostoykiye elektrokhimicheskiye splavy i kompozity na osnove zheleza* [Wear-resistant electrochemical iron-based alloys and composites]. Bryansk: Izd-vo BGITA Publ., 2015. 98 p.
10. *Progressivnyye rezhushchiye instrumenty i rezhimy rezaniya metallov* [Progressive cutting tools and cutting modes of metals]: spravochnik / V.I. Barannikov [i dr.]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1990. 373 p.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО РЕЖИМА СМЕШИВАНИЯ КОРМОВЫХ КОМПОНЕНТОВ В СМЕСИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

STUDY OF THE CONTINUOUS MODE OF MIXING FEED COMPONENTS IN A MIXING PLANT

П.Н. СОЛОНЩИКОВ, к.т.н.
ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ, Киров, Россия,
solon-pavel@yandex.ru

P.N. SOLONSHCHIKOV, PhD in Engineering
FGBOU VO Vyatskiy GATU, Kirov, Russia,
solon-pavel@yandex.ru

В статье рассматривается проблема по разработке средств, которые смогут повысить эффективность механизации процесса приготовления жидких кормов в животноводстве. Конструкторскими бюро, научно-исследовательскими и проектно-технологическими институтами механизации и электрификации сельского хозяйства разработаны новые прогрессивные технологии, а также комплекты, агрегаты, машины и аппараты для животноводства и кормопроизводства. На основе этой техники внедряется комплексная механизация ферм и создаются животноводческие комплексы с индустриальной технологией производства продукции. Но в последнее время широкого применения отечественных машин по приготовлению жидких кормовых смесей не наблюдается. Поэтому предлагается экспериментальная установка, совмещающая в себе три функции: дозатора, насоса и смесителя, позволяющего в конечном итоге получить смесь хорошего качества.

В статье приводится программа и методика исследований установки. Для этого разработан специальный стенд, позволяющий определять параметры качества смеси и удельных затрат электрической энергии. В качестве поиска оптимального сочетания факторов для критериев оптимизации: степень однородности и удельные затраты электрической энергии – был выбран план 32. Экспериментальные исследования показали диапазон подачи установки при различных частотах вращения вала рабочего колеса. Исследования по смешиванию подтвердили эффективность конструкции установки и ее составляющих устройств: дозатора, насоса и смесителя. С помощью методов планирования эксперимента выделены основные факторы влияющие на процесс смешивания, и определены оптимальные параметры качества смеси. По проведенным исследованиям по непрерывному внесению компонентов в экспериментальной установке для приготовления жидких кормовых смесей получили, что оптимальными сочетаниями факторов будет температура воды $t = 26...38$ °С и частота вращения $n = 1500...1650$ мин⁻¹, при этом степень однородности достигает $\Theta = 94,6$ %, удельные затраты электрической энергии $E_{эл} = 0,198$ кВт·ч/т.ед.ст.одн.

Ключевые слова: установка, смесь, температура, частота вращения рабочего колеса, степень однородности, удельные затраты электрической энергии, фактор, жидкие кормовые смеси.

Для цитирования: Солонщиков П.Н. Исследование непрерывного режима смешивания кормовых компонентов в смесительной установке // Тракторы и сельхозмашины. 2021. № 4. С. 71–76. DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-71-76.

The article discusses the problem of developing means that can increase the efficiency of mechanization of the process of preparing liquid feed in animal husbandry. Design bureaus, research and technological institutes for mechanization and electrification of agriculture have developed new progressive technologies, as well as kits, units, machines and apparatus for animal husbandry and fodder production. On the basis of this technique, complex mechanization of farms is being introduced and livestock complexes with industrial production technology are being created. But recently, the widespread use of domestic machines for the preparation of liquid feed mixtures has not been presented. Therefore, an experimental setup is proposed that combines three functions: a batcher, a pump and a mixer, which ultimately allows to obtain a mixture of good quality.

The article provides a program and research methodology for the installation. For this, a special stand has been developed, which makes it possible to determine the parameters of the mixture quality and the specific consumption of electrical energy. As a search for the optimal combination of factors for the optimization criteria: the degree of homogeneity and the specific consumption of electrical energy, plan 32 was chosen. Experimental studies have shown the range of supply of the installation at different speeds of rotation of the impeller shaft. Mixing studies have confirmed the effectiveness of the design of the plant and its components: dispenser, pump and mixer. With the help of experimental planning methods, the main factors influencing the mixing process are identified, and the optimal parameters of the mixture quality are determined. According to the studies carried out on the continuous introduction of components in an experimental installation for the preparation of liquid feed mixtures, we obtained that the optimal combinations of factors would be the water temperature $t = 26...38$ °C and the rotation frequency $n = 1500...1650$ min⁻¹, while the degree of homogeneity reaches $\Theta = 94,6$ % and unit costs of electric energy $E_{el} = 0,198$ kWh/t.u. st.un.

Keywords: installation, mixture, temperature, impeller rotation frequency, degree of homogeneity, specific consumption of electrical energy, factor, liquid feed mixtures.

Cite as: Solonshchikov P.N. Study of the continuous mode of mixing feed components in a mixing plant. Traktory i sel'khoz mashiny. 2021. No 4, pp. 71–76 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2021-4-71-76.

Введение

В нашей стране развитию животноводства уделяется большое внимание. Большая часть основной продукции животноводства в предстоящие годы будет производиться на существующих фермах в условиях их коллективной аренды, а также в фермерских индивидуальных хозяйствах, что обеспечит интенсивное ведение отрасли.

Конструкторскими бюро, научно-исследовательскими и проектно-технологическими институтами механизации и электрификации сельского хозяйства разработаны новые прогрессивные технологии, а также комплекты, агрегаты, машины и аппараты для животноводства и кормопроизводства. На основе этой техники внедряется комплексная механизация ферм и создаются животноводческие комплексы с индустриальной технологией производства продукции.

Техническая оснащенность хозяйств влияет на производство животноводческой продукции через экономию живого труда при обслуживании животных, улучшение условий их содержания, повышение окупаемости кормов и т.д. Доля затрат овеществленного труда в стоимости валовой продукции животноводства повышается с применением средств механизации [1, 2].

В связи с переходом хозяйств на новые экономические отношения остро встала проблема комплексной механизации, так как экономический эффект на фермах может быть достигнут лишь при становлении их на механизированную основу с применением прогрессивных технологий ведения животноводства. Но при этом, для того чтобы восполнять поголовье животных, необходимо организовать правильное приготовление кормов и кормление молодняка, что в свою очередь позволит выполнить функцию замены взрослых животных.

Цель исследований

Изучение процесса приготовления жидких кормовых смесей на основе заменителя цельного молока с использованием экспериментальной установки при изменении настроечных параметров.

Материалы и методы

Экспериментальная установка для приготовления жидких кормовых смесей представляет собой многофункциональное техническое средство, способное выполнять 3 функции:

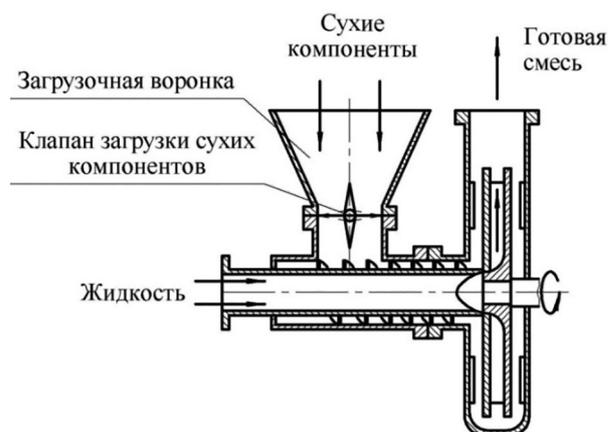


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для приготовления жидких кормовых смесей

Fig. 1. Scheme of an experimental setup for the preparation of liquid feed mixtures

дозирование материала (заменитель цельного молока), подачу жидкости (функция нагнетания) и приготовление смеси (функция смесителя) (рис. 1) [3–5].

Испытание установки проводили на специально созданном стенде (рис. 2), который позволяет отбирать пробы во время испытаний.

По проточной схеме установка работает следующим образом. Перед началом работы кран 11 закрывают, а краны 9, 10 открывают. После запуска электродвигателя открывают кран 6 и засыпают в загрузочную камеру 7 сухие компоненты. Полученная смесь поступает в бак 3 [6].

Качество смеси, полученной при смешивании компонентов, определим с помощью степени однородности, который характеризует завершенность процесса в целом [7]:

$$\Theta = \frac{\Phi_0(z_i)}{\Phi(z-3)} = \frac{\Phi_0(z_i)}{0,9973}, \quad (1)$$

где Φ_0 – нормированная функция Лапласа.

Доля частиц контрольного компонента в смеси находится в заданных пределах $\pm\Delta$; при этом $0 < \Theta < 1$. Предельному случаю полного смешивания соответствует значение $\Theta = 1$. Рецепт соотношения компонентов была принята исходя из зоотехнических требований, соответственно в интервале от 1:8...1:10, то есть на 8 л воды 1 кг заменителя молока, отклонение допустимое $\Delta = \pm 20\%$. Таким образом, формулу (1) нужно преобразовать с учетом этих допущений так, что в знаменателе будет не число 0,9973, которое близко смешиванию компонентов в соотношении 1:1,

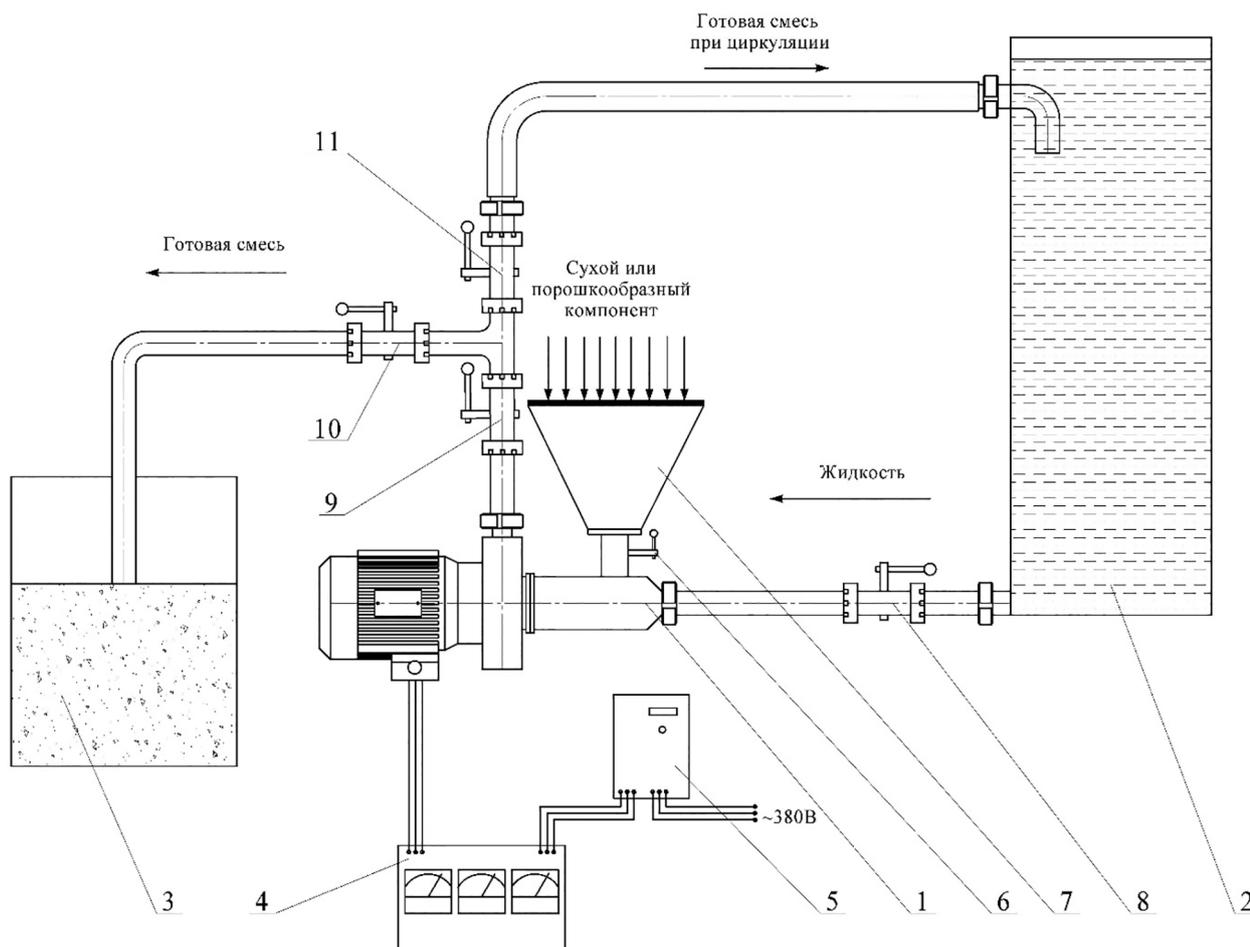


Рис. 2. Схема работы установки с открытым контуром:

1 – установка; 2 – бак с водой; 3 – бак с готовой смесью; 4 – мультиметр DMK-20; 5 – частотный преобразователь; 6 – клапан загрузки компонентов; 7 – загрузочная камера; 8, 9, 10, 11 – шаровые краны

Fig. 2. Scheme of the setup with an open circuit: 1 – setup; 2 – water tank; 3 – ready-mix tank; 4 – DMK-20 multimeter; 5 – frequency converter; 6 – component loading valve; 7 – loading chamber; 8, 9, 10, 11 – ball valves

а будет интервал от 0,125 до 0,1, что соответствует соотношению 1:8...1:10:

$$\Theta = \frac{\Phi_o(z_i)}{0,125...0,1} \quad (2)$$

Для оценки качества работы смесительной установки используем один из показателей, такой как удельные энергозатраты, отнесенные к единице массы готового продукта, определяемый по формуле (кВт·ч/т):

$$q = \frac{P}{Q_{\text{ч}}} \quad (3)$$

где P – мощность, потребляемая установкой, кВт; $Q_{\text{ч}}$ – часовая производительность установки, м³/ч или т/ч.

Формула (3) является универсальной, но она не учитывает характер качества по-

лученного продукта, поэтому лучше ввести такой показатель, как удельные энергозатраты электрической энергии, учитывающий степень однородности смеси, который определим по формуле (кВт·ч/т.ед.ст.одн.):

$$\Theta_{\text{эл}} = \frac{P}{Q_{\text{ч}} \cdot \Theta} \quad (4)$$

Мощность, расходуемая электродвигателем, который приводит в движение установку, определим по формуле [2, 5]:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}} \cdot I_{\text{ф}} \cdot \cos \varphi = U_{\text{л}} \cdot I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

где $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение сети, В; $I_{\text{ф}}$ – сила тока фазная, учитывая, что соединение «звезда», то $I_{\text{ф}} = I_{\text{л}}$ – линейная сила тока, А; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности электродвигателя.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования установки как насоса позволили получить следующие данные по производительности: при частоте вращения $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$, производительность $Q_{\text{ч}} = 16 \text{ м}^3/\text{ч}$, $n = 2250 \text{ мин}^{-1} - Q_{\text{ч}} = 12 \text{ м}^3/\text{ч}$, а при $n = 1500 \text{ мин}^{-1} - Q_{\text{ч}} = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$ [8, 9].

Для оценки качества смешивания при непрерывном внесении компонентов, выделили 2 фактора, которые будут влиять на критерии оптимизации: степень однородности и удельные энергозатраты электрической энергии $\Theta_{\text{эл}}$. Для этого составили план эксперимента 3^2 (табл. 1) [11]. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

По результатам исследования получили следующие уравнения регрессии для степени однородности $\Theta (y_1)$ и удельных энергозатрат электрической энергии $\Theta_{\text{эл}} (y_2)$:

$$\Theta = 91,28 - 1,83 \cdot x_1 + 2,6 \cdot x_2 + 2,56 \cdot x_1^2 + 1,87 \cdot x_1 \cdot x_2 - 2,29 \cdot x_2^2. \quad (6)$$

$$\Theta_{\text{эл}} = 0,205 + 0,004 \cdot x_1 - 0,006 \cdot x_2 - 0,005 \cdot x_1^2 + 0,0045 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,005 \cdot x_2^2. \quad (7)$$

С помощью программных приложений Microsoft Office Excel 2007 и Statgraphics Plus 5.0, были произведены расчеты оценок коэффициентов регрессии; при этом была оценена их значимость, проверена адекватность полученных моделей, по которым строили двумерные сечения поверхностей откликов. Расчеты, проведенные по определению среднего значения отклика и расчетного значения критерия оптимизации, определяли в среде Microsoft Office Excel 2007. В уравнениях (6) и (7), наибольшее влияние на степень однородности смеси и удельные энергозатраты электриче-

Таблица 1

План эксперимента 3^2

Table 1. Plan of 3^2 experiment

Название факторов и единицы их измерения	Кодированное обозначение факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний -1	средний 0	верхний +1	
Частота вращения рабочего колеса, n , мин^{-1}	x_1	1500	2250	3000	500
Температура воды, t , $^{\circ}\text{C}$	x_2	20	30	40	10

Таблица 2

Результаты исследований по определению степени однородности и удельных энергозатрат электрической энергии

Table 2. Research results to determine the degree of homogeneity and specific energy consumption of electrical energy

Уровни варьирования	Факторы		Критерии оптимизации	
	Частота вращения рабочего колеса, n , мин^{-1}	Температура воды, t , $^{\circ}\text{C}$	Степень однородности, Θ , %	Удельные энергозатраты электрической энергии, $\Theta_{\text{эл}}$, кВт·ч/т.ед.ст.одн.
	x_1	x_2	y_1	y_2
Верхний +1	3000	40	–	–
Основной 0	2250	30	–	–
Нижний -1	1500	20	–	–
1	-1	-1	92,52	0,203
2	0	-1	86,45	0,217
3	+1	-1	85,28	0,220
4	-1	0	94,61	0,198
5	0	0	93,75	0,200
6	+1	0	90,61	0,207
7	-1	+1	95,31	0,197
8	0	+1	89,04	0,211
9	+1	+1	95,55	0,196

ской энергии оказывает температура воды ($b_2 = 2,6$ и $b_2 = -0,006$).

Оценки коэффициентов регрессии считались значимыми с 95%-й доверительной вероятностью при величине P-Value [10, 11], приведенной в таблице дисперсионного анализа, не превышающей 0,05. Анализируя сечение (рис. 3, а), можно сделать вывод, что при температуре воды $t = 26...38$ °С и частоте вращения $n = 1500...1650$ мин⁻¹ достигли максимального значения степени однородности $\Theta = 94,6$ %. По двумерному сечению (рис. 3, б) видно, что наименьшие затраты электрической энергии достигаются при сочетании факторов $t = 26...38$ °С и частоте вращения $n = 1500...1650$ мин⁻¹ и значение составляет $\Theta_{эл} = 0,198$ кВт·ч/т.ед.ст.одн.

Полученные результаты показывают, что при увеличении температуры уменьшается начальная вязкость воды, что в дальнейшем способствует качественному смешиванию компонентов. При этом, если подача будет достаточно большой, то качество смеси будет ухудшаться и увеличивается потребление энергии.

Выводы

По проведенным исследованиям по непрерывному внесению компонентов в экспериментальной установке для приготовления жидких кормовых смесей, получили что оптимальными сочетаниями факторов будет температура воды $t = 26...38$ °С и частота вращения

$n = 1500...1650$ мин⁻¹, при этом степень однородности достигает $\Theta = 94,6$ % и удельные затраты электрической энергии $\Theta_{эл} = 0,198$ кВт·ч/т.ед.ст.одн.

Литература

1. Булатов С.Ю. Разработка и совершенствование технологических линий и технических средств приготовления кормов в условиях малых форм хозяйствования: дис. ... докт. техн. наук. Княгинино, 2018. 412 с.
2. Мохнаткин В.Г., Шулятьев В.Н., Филинков А.С. и др. Обзор устройств и установок для приготовления заменителей цельного молока и анализ их эффективности // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Материалы V Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение», посвященной 60-летию инженерного факультета: сборник научных трудов. Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. Вып. 13. С. 101–105.
3. Мохнаткин В.Г., Шулятьев В.Н., Филинков А.С., Солонщиков П.Н. и др.; заявитель ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА. Установка для приготовления смесей: патент № 146974 Российской Федерации, МПК 29С9/00, А01J11/16, В01F7/02. № 2014121853/10; заявл. 29.05.2014, опубл. 20.10.2014; . 2 с.
4. Мохнаткин В.Г., Филинков А.С., Солонщиков П.Н. Многоцелевые насосы для интенсификации смешивания // Сельский механизатор. 2013. № 8. С. 25.
5. Мохнаткин В.Г., Шулятьев В.Н., Филинков А.С. и др. Устройство для приготовления смесей: патент на полезную модель 104022 РФ, МПК

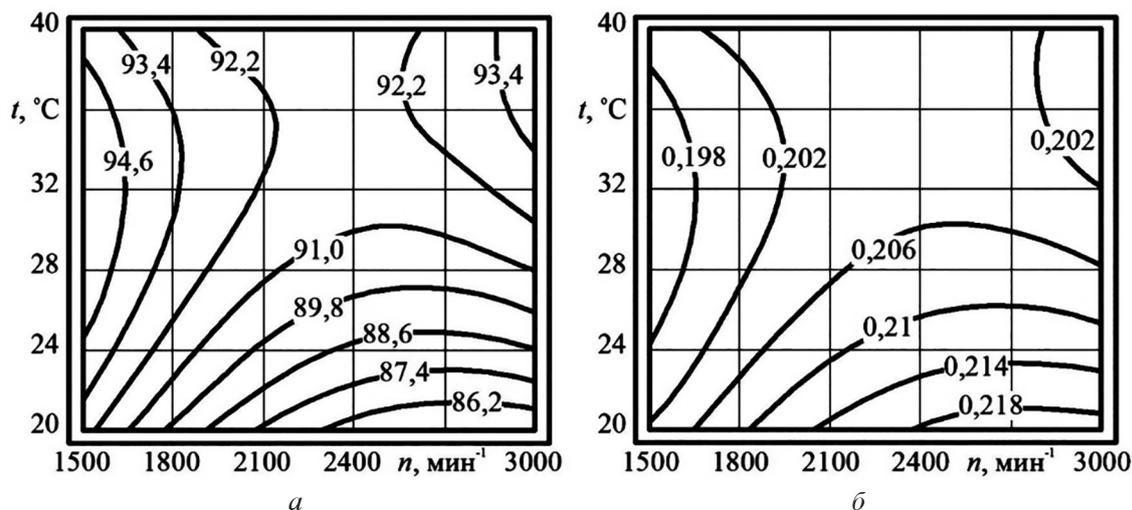


Рис. 3. Двумерные сечения поверхности отклика для степени однородности Θ , % (а) и удельных энергозатрат электрической энергии $\Theta_{эл}$, кВт·ч /т.ед.ст.одн., (б) в зависимости от частоты вращения рабочего колеса n , мин⁻¹, и температуры воды t , °С

Fig. 3. Two-dimensional sections of the response surface for the degree of homogeneity Θ , % (а) and specific energy consumption of electrical energy $E_{эл}$, kW·h /t.d. h. (б) depending on the frequency of rotation of the impeller n , min⁻¹ and water temperature t , °С

A23C11/00. № 2010152132/10; заявл. 20.12.2010. Бюл. 2011. № 13.

6. Мохнаткин В.Г., Шулятьев В.Н., Филинков А.С. и др. Программа и методика испытаний устройства ввода и смешивания порошкообразных компонентов с жидкостью // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики. Материалы V Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение», посвященной 60-летию инженерного факультета: сборник научных трудов. Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. Вып. 13. С. 96–100.
 7. Алешкин В.Р. Статистическая оценка качества смешивания кормов // Сб. науч. тр. Перм. с.-х. ин-т. Пермь, 1983. С. 3–9.
 8. Филинков А.С., Солонщиков П.Н., Обласов А.Н. и др. Устройство для смешивания компонентов с жидкостью для приготовления питательных сред // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. 2013. № 9. С. 50–53.
 9. Оболенский Н.В., Булатов С.Ю., Свистунов А.И. Исследование процесса смешивания компонентов комбикорма // Вестник научных конференций. 2015. № 1–1 (1). С. 111–117.
 10. Андреев В.Л. Использование статистического пакета Statgraphics Plus 5.1 для обработки результатов экспериментальных исследований: методическое пособие. Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2012. 32 с.
 11. Алешкин В.Р., Филинков А.С. Основы научных исследований: тетрадь для лабораторных работ. Изд. 3-е переработ. и доп. Киров: Вятская ГСХА, 2010. 45 с.
- ### References
1. Bulatov S.YU. Razrabotka i sovershenstvovaniye tekhnologicheskikh liniy i tekhnicheskikh sredstv prigotovleniya kormov v usloviyakh malyykh form khozyaystvovaniya: dis. ... dokt. tekhn. nauk [Development and improvement of technological lines and technical means for the preparation of feed in the conditions of small-scale farming: Dissertation for Degree of DSc in Engineering]. Knyaginino, 2018. 412 p.
 2. Mokhnatkin V.G., Shulyat'yev V.N., Filinkov A.S. i dr. Overview of devices and installations for the preparation of full milk substitutes and analysis of their effectiveness. Uluchsheniye ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy energetiki. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka – Tekhnologiya – ResursosberezheniYE», posvyashchennoy 60-letiyu inzhenernogo fakul'teta: Sbornik nauchnykh trudov [Improving the performance indicators of agricultural energy. Materials of the V International Scientific and Practical Conference “Science – Technology – Resource Saving”, dedicated to the 60th anniversary of the Faculty of Engineering: Collection of scientific papers]. Kirov: FGBOU VPO Vyatskaya GSKHA, 2012. Vyp. 13, pp. 101–105 (in Russ.).
 3. Patent No 146974 Rossiyskaya Federatsiya, MPK 29C9/00, A01J11/16, V01F7/02. Ustanovka dlya prigotovleniya smesey [Installation for the preparation of mixtures]: No 2014121853/10; yayavl.: 29.05.2014; opubl. 20.10.2014 / V.G. Mokhnatkin, V.N. Shulyat'yev, A.S. Filinkov, P.N. Solonshchikov i dr.; yayavitel' FGBOU VPO Vyatskaya GSKHA. 2 p.
 4. Mokhnatkin V.G., Filinkov A.S., Solonshchikov P.N. Multipurpose pumps for mixing intensification. Sel'skiy mekhanizator, 2013. No 8, pp. 25.
 5. Patent na poleznuyu model' 104022 RF, MPK A23C11/00. Ustroystvo dlya prigotovleniya smesey [Mixing device] / V.G. Mokhnatkin, V.N. Shulyat'yev, A.S. Filinkov, i dr. No 2010152132/10; Zayavleno 20.12.2010. Byul. 2011. No 13.
 6. Mokhnatkin V.G., Shulyat'yev V.N., Filinkov A.S. i dr. Program and methodology for testing the device for introducing and mixing powder components with liquid. Uluchsheniye ekspluatatsionnykh pokazateley sel'skokhozyaystvennoy energetiki. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauka – Tekhnologiya – ResursosberezheniYE», posvyashchennoy 60-letiyu inzhenernogo fakul'teta: Sbornik nauchnykh trudov [Improving the performance indicators of agricultural energy. Materials of the V International Scientific and Practical Conference “Science – Technology – Resource Saving”, dedicated to the 60th anniversary of the Faculty of Engineering: Collection of scientific papers]. Kirov: FGBOU VPO Vyatskaya GSKHA, 2012. Vyp. 13, pp. 96–100 (in Russ.).
 7. Aleshkin V.R. Statistical assessment of the quality of mixing feed. Sb. nauch. tr. Perm. s.-kh. in-t. Perm', 1983, pp. 3–9 (in Russ.).
 8. Filinkov A.S., Solonshchikov P.N., Oblasov A.N. i dr. A device for mixing components with a liquid for the preparation of culture media. Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova. 2013. No 9, pp. 50–53 (in Russ.).
 9. Obolenskiy N.V., Bulatov S.YU., Svistunov A.I. Investigation of the process of mixing feed components. Vestnik nauchnykh konferentsiy. 2015. No 1–1 (1), pp. 111–117 (in Russ.).
 10. Andreyev V.L. Ispol'zovaniye statisticheskogo paketa Statgraphics Plus 5.1 dlya obrabotki rezul'tatov eksperimental'nykh issledovaniy [Using the statistical package Statgraphics Plus 5.1 for processing the results of experimental studies]: Metodicheskoye posobiye. Kirov: FGBOU VPO Vyatskaya GSKHA Publ., 2012. 32 p.
 11. Aleshkin V.R., Filinkov A.S. Osnovy nauchnykh issledovaniy: tetrad' dlya laboratornykh rabot [Fundamentals of research: workbook for laboratory works]. Izd. 3-e pererabot. i dop. Kirov: Vyatskaya GSKHA Publ., 2010. 45 p.