



МОСКОВСКИЙ  
ПОЛИТЕХ

ISSN 0321-4443  
eISSN 2782-425X



# ТРАКТОРЫ И СЕЛЬХОЗМАШИНЫ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

89 (3) 2022



[WWW.MOSPOLYTECH.RU](http://WWW.MOSPOLYTECH.RU)



ВЕДУЩИЙ ЖУРНАЛ ОТРАСЛИ ТРАКТОРНОГО  
И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

ЭКО • ВЕКТОР



moscow  
polytech

ISSN 0321-4443  
eISSN 2782-425X



# TRACTORS

AND AGRICULTURAL MACHINERY

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

89 (3) 2022



[WWW.MOSPOLYTECH.RU](http://WWW.MOSPOLYTECH.RU)



LEADING JOURNAL OF THE INDUSTRY OF  
TRACTOR AND AGRICULTURAL ENGINEERING

ECO • VECTOR

## УЧРЕДИТЕЛИ

- 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: 191186, Санкт-Петербург, Аптекарский

переулок, д. 3, литера А, помещение 1Н

E-mail: info@eco-vector.com

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

## РЕКЛАМА

Отдел рекламы

E-mail: adv@eco-vector.com

Тел.: +7 (495) 308-83-89

## РЕДАКЦИЯ

Заведующий редакцией:

Сергей Евгеньевич Арсеньев

Адрес: 107023, Москва, Большая Семеновская ул., 38

E-mail: tismash@mospolyltech.ru

Тел.: +7 (495) 223-05-23

Выпускающий редактор

Елена Львовна Сухачёва

Тел.: +7 (931) 101-26-64

## ПОДПИСКА

Подписка на печатную версию через интернет:

[www.journals.eco-vector.com](http://www.journals.eco-vector.com)

[www.akc.ru](http://www.akc.ru)

[www.pressa-ef.ru](http://www.pressa-ef.ru)

## ПОЛИТИКА СВОБОДНОГО ДОСТУПА

В электронном виде журнал распространяется бесплатно – в режиме немедленного открытого доступа

## ИНДЕКСАЦИЯ

- РИНЦ
- Google Scholar
- Ulrich's International Periodicals Directory
- WorldCat

## Оригинал-макет

подготовлен в издательстве «Эко-Вектор».

Литературные редакторы: Д.С. Сквородникова,

Е.В. Мурашкин

Корректоры: Д.С. Сквородникова, М.Н. Шошина

Обложка: М.С. Кузьменко

Сдано в набор 01.07.2022. Подписано в печать 16.12.2022.

Формат 60 × 88%. Печать офсетная. Печ. л. 10,25.

Усл. печ. л. 9,5. Уч.-изд. л. 5,6. Тираж 500 экз.

Дата выхода в свет 09.01.2023.

Заказ № 2-9814-lv. Цена свободная.

Отпечатано в типографии ООО «Типография Экспресс В2В» 191180, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтаны, д. 104, лит. А, пом. 3Н, оф. 1. Тел.: +7 (812) 646-33-77

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения авторов может не совпадать с мнением редакции. К публикации принимаются только статьи, подготовленные в соответствии с правилами для авторов. Направляя статью в редакцию, авторы принимают условия договора публичной оферты. С правилами для авторов и договором публичной оферты можно ознакомиться на сайте: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/>. Полное или частичное воспроизведение материалов, опубликованных в журнале, допускается только с письменного разрешения издателя — издательства «Эко-Вектор».

ISSN 0321-4443

eISSN 2782-425X



# ТРАКТОРЫ И СЕЛЬХОЗМАШИНЫ

Том 89 | Выпуск 3 | 2022

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с февраля 1930 г.

## 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)

## ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**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 Никитиевич** – 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 лубричных культур; заслуженный изобретатель РФ (Тверь, Россия)

**КОТИБЕВ 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; заведующий кафедрой 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 инжиниринговой компании AVL List (Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List – «Институт двигателей внутреннего сгорания „Лист“») (Грац, Австрия)

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



МОСКОВСКИЙ  
ПОЛИТЕХ

ЭКО-ВЕКТОР

## FOUNDERS

- Moscow Polytechnic University
- Eco-Vector

The journal is registered by the Russian Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media. Registration certificate PI No ФЦ 77-81900 issued on October 05, 2021

The journal is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals of Higher Attestation Commission of Russia (VAK), where it is recommended to publish the basic scientific results of the dissertation for the degree of doctor and candidate of sciences

## PUBLISHER

### Eco-Vector

**Address:** 3 liter A, 1H, Aptekarsky pereulok, 191186, Saint Petersburg, Russian Federation

**E-mail:** info@eco-vector.com

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

## ADVERTISE

### Adv. department

**E-mail:** adv@eco-vector.com

**Phone:** +7 (495) 308-83-89

## EDITORIAL

### Executive editor

Sergey Y. Arseniev

**Address:** 38, Bolshaya Semyonovskaya str., Moscow, 107023, Russian Federation

**E-mail:** tismash@mospolytech.ru

**Тел:** +7 (495) 223-05-23

### Managing Editor

Elena L. Sukhacheva

**Phone:** +7 (931) 101-26-64

## SUBSCRIPTION

For print version:

[www.journals.eco-vector.com](http://www.journals.eco-vector.com)

[www.akc.ru](http://www.akc.ru)

[www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru)

## OPEN ACCESS

Immediate Open Access is mandatory for all published articles

## INDEXATION

- Russian Science Citation Index
- Google Scholar
- Ulrich's International Periodicals Directory
- WorldCat

## TYPESET

complete in Eco-Vector

Copyeditors: *Darya S. Skovorodnikova,*

*Evgeniy V. Murashkin*

Proofreaders: *Darya S. Skovorodnikova,*

*Maia N. Shoshina*

Cover: *Marina S. Kuzmenko*

The editors are not responsible for the content of advertising materials. The point of view of the authors may not coincide with the opinion of the editors. Only articles prepared in accordance with the guidelines are accepted for publication. By sending the article to the editor, the authors accept the terms of the public offer agreement. The guidelines for authors and the public offer agreement can be found on the website: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/>. Full or partial reproduction of materials published in the journal is allowed only with the written permission of the publisher – the Eco-Vector publishing house.

ISSN 0321-4443

eISSN 2782-425X



# TRACTORS AND AGRICULTURAL MACHINERY

VOLUME 89 | ISSUE 3 | 2022

SCIENTIFIC AND PRACTICAL JOURNAL

Published since February 1930

## EDITOR-IN-CHIEF

**Valery N. KAMINSKY** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); 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)

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

**Alexander V. LEPESHKIN** – Professor, Cand. Sci. (Engin.); Professor of Moscow Polytechnic University, Associate Professor of Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

## EDITORIAL BOARD MEMBERS

**Sergey V. BAKHMUTOV** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); 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, Dr. Sci. (Engin.); Deputy Director for Innovation and Implementation Activities of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

**Konstantin I. GORODETSKIY** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); Professor of Moscow Polytechnic University; Honorary Mechanical Engineer of the Russian Federation (Moscow, Russia)

**Sergey N. DEVYANIN** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); Professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

**Mikhail N. YEROKHIN** – Full Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Engin.); Professor of Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (Moscow, Russia)

**Eduard V. ZHALNIN** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); 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, Dr. Sci. (Engin.); Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

**Mikhail M. KOVALEV** – Dr. Sci. (Engin.); Research Advisor of the Federal Scientific Center for Bast Crops; Honorary Inventor of the Russian Federation (Tver, Russia)

**George O. KOTIEV** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); Head of the Department of Bauman Moscow State Technical University; Honorary Scientist of the Russian Federation (Moscow, Russia)

**Gennadiy M. KUTKOV** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); 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, Dr. Sci. (Engin.); 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, Dr. Sci. (Engin.); First Deputy Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russia)

**Mikhail V. LYASHENKO** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); Head of the Department of Volgograd State Technical University (Volgograd, Russia)

**Andriy P. MARCHENKO** – Professor, Dr. Sci. (Engin.); 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, Dr. Sci. (Engin.) (Dr.-Ing.); Professor of Osnabrück University of Applied Sciences (Osnabrück, Germany)

**Arkadiy A. SKVORTSOV** – Professor, Dr. Sci. (Phys&Math.); Head of the Department of Moscow Polytechnic University (Moscow, Russia)

**Rudolf Yu. SOLOVYEV** – Associate Professor, Cand. Sci. (Engin.); 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, Dr. Sci. (Engin.); Professor of Moscow Polytechnic University; Member of the Veterans (Elders) Expert Council of the Russian Piston Engine Industry (Moscow, Russia)

**Christian FUCHS** – Dr. Sci. (Engin.); 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)



# СОДЕРЖАНИЕ

---

## СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

*Ю.С. Ценч, В.В. Косенко, В.В. Шаров*

Эволюция конструкций гусеничных тракторов общего назначения ..... 155

## ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

*А.Р. Кульчицкий*

О новых требованиях к экологическим показателям сельскохозяйственных тракторов  
в Таможенном союзе ..... 167

## НОВЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

*А.В. Химченко, Н.И. Мищенко, О.В. Савчук*

Оценка возможности применения искусственных нейронных сетей  
для самодиагностики двигателя внутреннего сгорания с отключением цилиндров ..... 175

## ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

*М.Д. Ханнанов, И.Ф. Гумеров, Л.И. Фардеев, А.С. Куликов, Э.Р. Алимгулов*

Экспериментальное исследование механических потерь современного дизеля ..... 187

*Г.М. Крохта, Е.Н. Хомченко, Н.А. Усатых, А.Б. Иванников*

К вопросу вторичного использования эксергии выпускных газов в автотракторных силовых установках ..... 197

*В.М. Бойков, С.В. Старцев, А.В. Павлов, Е.С. Нестеров*

Результаты экспериментальных исследований плуга для агрегатирования с тракторами тягового класса 3 ..... 207

## КАЧЕСТВО, НАДЕЖНОСТЬ

*А.Н. Зинцов, В.А. Добрецов, В.Н. Соколов*

Особенности плющения стеблей при двухфазной технологии уборки льна-долгунца ..... 215

## ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА

*В.А. Максименко, К.Н. Буханцов*

Расчет и выбор параметров электромагнита для обеззараживающего устройства зерна и семян ..... 223

# CONTENTS

---

## PAGES OF HISTORY

*Yuliya S. Tsench, Vyacheslav V. Kosenko, Vladimir V. Sharov*

The evolution of design of general purpose tracked tractors ..... 155

## ENVIRONMENTALLY CLEAN TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

*Alexey R. Kulchitskiy*

On new requirements for the environmental indicators of agricultural tractors in the Customs Union ..... 167

## NEW MACHINES AND EQUIPMENT

*Arkady V. Khimchenko, Nicolay I. Mishchenko, Oleg V. Savchuk*

Evaluation of the possibility of using artificial neural networks for self-diagnosis  
of an internal combustion engine with cylinder deactivation ..... 175

## THEORY, DESIGN, TESTING

*Marat D. Khannanov, Irek F. Gumerov, Lenar I. Fardeev, Andrey S. Kulikov, Eduard R. Alimgulov*

The experimental study of mechanical losses in the modern diesel engine ..... 187

*Gennady M. Krokhta, Egor N. Khomchenko, Nikolai A. Usatykh, Alexey B. Ivannikov*

On the question of secondary use of exhaust exergy in power units of vehicles and tractors ..... 197

*Vasily M. Boykov, Sergey V. Startsev, Andrey V. Pavlov, Evgeny S. Nesterov*

Results of experimental studies of the plow for coupling with drawbar category 3 tractors ..... 207

## QUALITY, RELIABILITY

*Alexander N. Zintsov, Vyacheslav A. Dobretsov, Valery N. Sokolov*

Peculiarities of stems flattening at two-phase fiber flax harvesting technology ..... 215

## ECONOMICS, ORGANIZATION AND TECHNOLOGY OF MANUFACTURING

*Vladimir A. Maksimenko, Kirill N. Bukhantsov*

The calculation and choice of the electromagnet parameters for the grain and seeds disinfectant device ..... 223

УДК 631.372.000.93

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109676>

Оригинальное исследование

# Эволюция конструкций гусеничных тракторов общего назначения

Ю.С. Ценч<sup>1</sup>, В.В. Косенко<sup>2</sup>, В.В. Шаров<sup>3</sup><sup>1</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия;<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия;<sup>3</sup> Музей истории отечественного тракторостроения, МБУК «Созвездие», Новый Быт, Чеховский район, Московская обл., Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Важнейшей задачей, обеспечивающей становление механизированного сельского хозяйства в 1920–30-е годы прошлого столетия, было создание отечественного тракторостроения. Основополагающую роль в его развитии сыграл Сталинградский (Волгоградский) тракторный завод, который многие годы являлся флагманом этой важнейшей отрасли.

**Цель работы.** Обоснование актуальности создания отрасли тракторостроения в процессе индустриализации страны. Анализ преимуществ гусеничных тракторов по сравнению с колесными, обоснование необходимости их массового производства, определение тенденций развития технико-эксплуатационных характеристик гусеничных тракторов общего назначения.

**Материалы и методы.** Анализ параметров эволюции конструкций гусеничных тракторов, выпускаемых Сталинградским (Волгоградским) заводом за все годы его работы, анализ технических характеристик десяти самых высокопроизводительных гусеничных тракторов, выпущенных в разные годы этим предприятием.

**Результаты.** Установлено, что на основе колесных тракторов были созданы первые гусеничные модели, которые наилучшим образом соответствовали требованиям их эксплуатации в почвенно-климатических условиях нашей страны, а также удовлетворяли потребность использования таких машин в военных целях. Обоснована важность использования показателя энергонасыщенности как главного фактора, определяющего работу трактора на повышенных скоростях; представлен график изменения этого показателя по годам выпуска и отмечены тенденции его дальнейшего роста.

**Заключение.** Энергонасыщенность гусеничных тракторов, выпускаемых заводом на протяжении 55 лет, возросла в 1,85 раз, с 7,5 до 13,91 кВт. Опыт волгоградских тракторостроителей должен быть проанализирован и использован с целью выявления закономерностей, тенденций и современных направлений развития тракторной техники.

**Ключевые слова:** Волгоградский (Сталинградский) тракторный завод; гусеничный трактор; двигатель; трансмиссия; коробка передач; энергонасыщенность; скоростной диапазон.

## Для цитирования:

Ценч Ю.С., Косенко В.В., Шаров В.В. Эволюция конструкций гусеничных тракторов общего назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 3. С. 155–166. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109676>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109676>

Original study article

# The evolution of design of general purpose tracked tractors

Yuliya S. Tsench<sup>1</sup>, Vyacheslav V. Kosenko<sup>2</sup>, Vladimir V. Sharov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian

<sup>2</sup> Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian

<sup>3</sup> Museum of the History of Domestic Tractor Industry, MBEC "Sozvezdie", Novy Byt village, Chekhov district, Moscow region, Russian

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The most important task, that supported the formation of mechanized agriculture in the 1920–30s, was the creation of domestic tractor industry. The Stalingrad (Volgograd) Tractor Plant, being the flagship of this important industry for many years, played a fundamental role in its development.

**AIMS:** Justification of the relevance of the tractor industry creation within the process of the country industrialization. Analysis of the advantages of tracked tractors in comparison with wheeled tractors, justification of need for their mass production, determination of trends in the development of technical and operational characteristics of general purpose tracked tractors.

**METHODS:** Analysis of the evolution parameters of the design of tracked tractors, produced by Stalingrad (Volgograd) Tractor Plant throughout its operation years, analysis of technical specification of the ten highest performance tracked tractors, produced in different years by this enterprise.

**RESULTS:** It is found that the first tracked models were based on wheeled tractors, met the operation requirements in the soil and climate conditions of our country in the best way, as well as satisfied the need for the use of such machines for military purposes. The importance of using the energy saturation indicator as the main factor of the tractor performance at increased velocities is justified; the graph of behavior of this indicator, depending on production year, is given and trends of its further growth are noted.

**CONCLUSIONS:** The energy saturation of tracked tractors, produced by the plant for 55 years, has increased by 1.85 times, from 7.5 to 13.91 kW. The experience of Volgograd tractor manufacturers should be analyzed and used in order to identify patterns, trends and modern directions of the tractor technology development.

**Keywords:** *Volgograd (Stalingrad) tractor plant; tracked tractor; engine; transmission; gear box; energy saturation; speed range.*

## Cite as:

Tsench YuS, Kosenko VV, Sharov VV. The evolution of design of general purpose tracked tractors // *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):155–166.  
DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109676>

Received: 20.06.2022

Accepted: 30.06.2022

Published: 15.07.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Индустриализация народного хозяйства, начавшаяся в 1920-е годы прошлого столетия, предполагала осуществление технического прорыва в механизации сельского хозяйства, обеспечивая его современными прогрессивными, высокопроизводительными машинами и орудиями. Для решения этой задачи возникла необходимость в создании такого направления в сельхозмашиностроении, как тракторостроение, что потребовало мобилизации научно-технического потенциала страны: ученых, инженеров, конструкторов, техников, квалифицированных рабочих [1, 2]. Необходимо было также использовать опыт зарубежных специалистов. Это обусловило создание в 1930 г. Волгоградского (Сталинградского) тракторного завода, который на протяжении десятков лет являлся флагманом советского тракторостроения. Построенный и оснащенный по самым современным для своего времени технологиям, он обладал огромным потенциалом, позволявшим выпускать более 40 тысяч тракторов в год.

Эффективное заимствование в конце 1920-х годов XX века передового зарубежного опыта, усилия отечественных ученых и инженеров позволили наладить к 1930 г. поточно-массовое производство сложной тракторной техники для сельскохозяйственного производства. Выпускаемая серийно колесная тракторная техника с 1930 г. на Сталинградском (СТЗ), а с 1931 и на Харьковском (ХТЗ) тракторных заводах позволила за 6–7 лет в основном удовлетворить первоочередные потребности развивающегося механизированного сельскохозяйственного производства в СССР. Дальнейшее наращивание темпов механизации сельскохозяйственного производства обусловило необходимость создания и внедрения более прогрессивных моделей мобильной техники.

**Цель исследования** – исследовать эволюционный процесс создания конструкций гусеничных тракторов производства Волгоградского (Сталинградского) тракторного завода.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Советские ученые, занимающиеся проблемами механизации сельского хозяйства, видели будущее отечественного тракторостроения в разработке гусеничных моделей тракторов, которые наилучшим образом соответствовали требованиям эксплуатации в почвенно-климатических условиях нашей страны. Гусеничный движитель обеспечивает лучшую по сравнению с колесным проходимость и позволяет в условиях бездорожья проводить необходимые работы. Гусеничный трактор может выезжать в поле на весенние полевые работы на несколько дней раньше колесного, что существенно расширяет агросроки выполнения работ. Он также мог качественно выполнять работу в поле при кратковременных

дождевых осадках и в осеннюю распутицу. Гусеничный трактор в меньшей степени уплотняет почву и подвергается меньшей вибрации при обработке полей поперек борозд в отличие от трактора с железными колесами, что положительно сказывается на условиях труда водителя. Выводы ученых относительно перспективности гусеничных тракторов совпадали и с желанием военных специалистов, которые предполагали использовать гусеничную технику для транспортировки артиллерийских орудий. Все это обусловило необходимость разработки и постановки на производство гусеничного трактора.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Переняв передовой опыт мирового тракторостроения, полученный при воспроизводстве зарубежных тракторов, выпускавшихся в нашей стране под марками СХТЗ-15/30, С-60, Фордзон-Путиловец, Универсал, отечественные ученые, инженеры, конструкторы, технологи, рабочие объединенными усилиями сумели найти свой путь дальнейшего развития отрасли. Они создали в середине 1930-х годов XX века собственную конструкцию трактора, максимально приспособленного к массовому производству и эксплуатации в разнообразных полевых условиях сельского хозяйства России.

Этот трактор, получивший название СТЗ-НАТИ, был создан силами научных работников научно-исследовательского тракторного института (НАТИ) и конструкторов Сталинградского тракторного завода (СТЗ). В 1937 г. он был поставлен на производство в Сталинграде (ныне Волгограде) и Харькове [3, 4] (рис. 1). Новый сельскохозяйственный гусеничный трактор обладал существенными отличиями от известных в то время зарубежных тракторов.

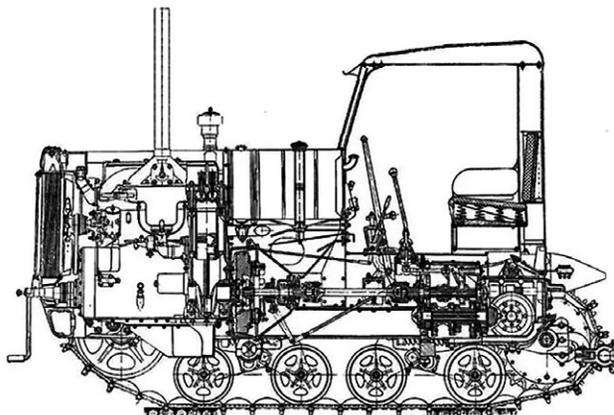
Конструкция трактора включала эластичную подвеску опорных катков, литые звенья гусениц. Впервые в мире сельскохозяйственный трактор был оснащен металлической кабиной полузакрытого типа с мягким двухместным сиденьем. Агрегаты трактора крепились на общей раме, что создавало определенные удобства при осуществлении узлового ремонта.

На тракторе устанавливался четырехцилиндровый четырехтактный карбюраторный двигатель 1МА водяного охлаждения, работающий на керосине и развивающий мощность 52 л.с. при 1520 оборотах коленчатого вала в минуту. Диаметр цилиндра составлял 125 мм, ход поршня – 152 мм.

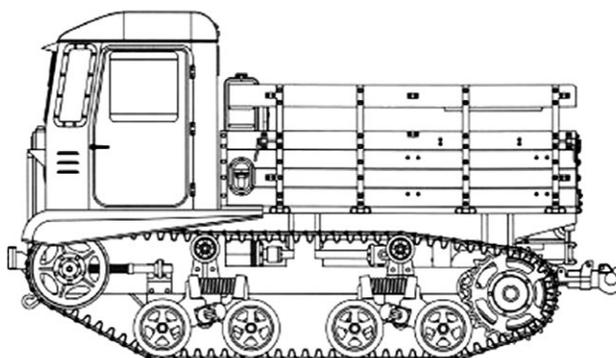
Конструкция трансмиссии предусматривала четыре передачи вперед (3,82; 4,53; 5,28; 8,04 км/ч) и одну назад (3,12 км/ч).

Габаритные размеры трактора СТЗ-НАТИ (1ТА): длина 3,70 м, ширина 1,86 м, высота 2,21 м. Эксплуатационный вес – 5100 кг.

Сельскохозяйственный трактор СТЗ-НАТИ (1ТА) имел транспортную модификацию СТЗ-НАТИ (2ТВ), которая



**Рис. 1.** Сельскохозяйственный гусеничный трактор СТЗ-НАТИ (1ТА), 1937 г.  
**Fig. 1.** The STZ-NATI (1TA) agricultural tracked tractor, 1937.



**Рис. 2.** Транспортный гусеничный трактор СТЗ-НАТИ (2ТВ), 1937 г.  
**Fig. 2.** The STZ-NATI (2TV) transport tracked tractor, 1937.

собиралась в основном из тех же деталей, что и сельскохозяйственная модификация, но имела другую компоновку, предназначенную для использования в армейских частях. Основные узлы транспортного трактора (двигатель, муфта сцепления, кардан, задний мост, бортовая передача, направляющее колесо, подвеска и др.) почти не отличались от узлов сельскохозяйственного (рис. 2).

Во время Великой Отечественной войны Сталинградский и Харьковский тракторные заводы были разрушены. Производство аналогичных гусеничных тракторов было налажено на вновь построенном Алтайском тракторном заводе под маркой АСХТЗ-НАТИ. Серийно трактор выпускался до 1952 г., всего было изготовлено более 210 тыс. машин [3].

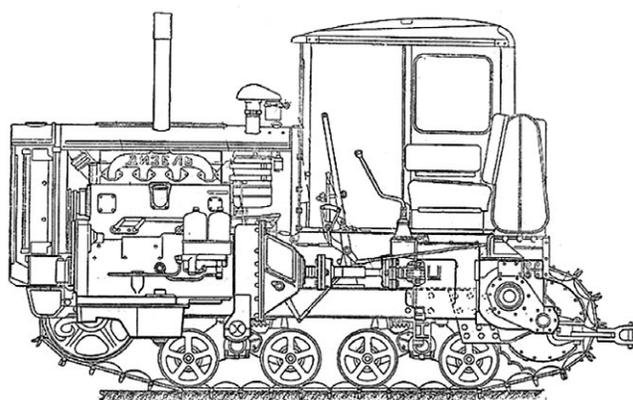
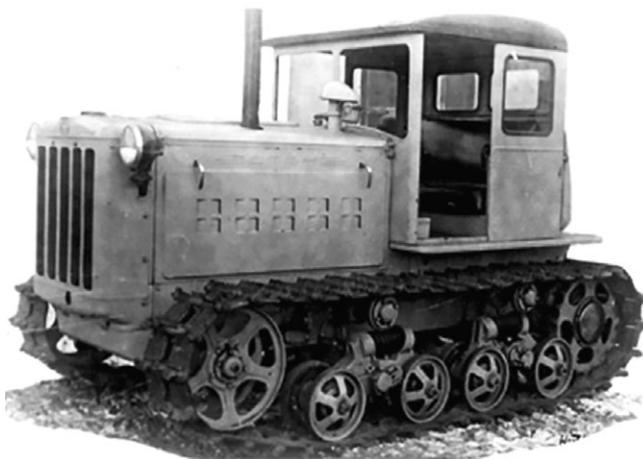
С появлением трактора СТЗ-НАТИ началась новая эпоха в советском тракторостроении. Она ознаменовалась тем, что благодаря опыту, числу и квалификации специалистов-тракторостроителей стало возможным создавать отечественные оригинальные конструкции

колесных и гусеничных машин собственными силами. Страна становилась в полной мере самостоятельной в плане технического перевооружения сельскохозяйственного производства.

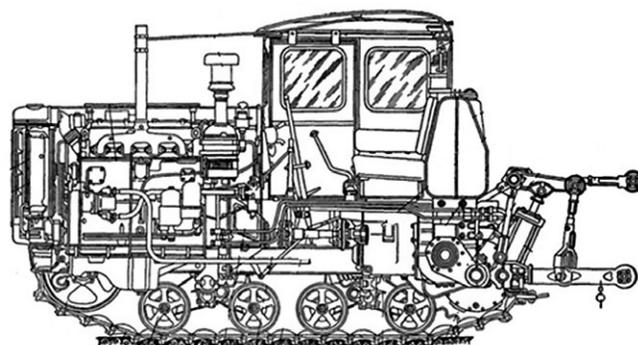
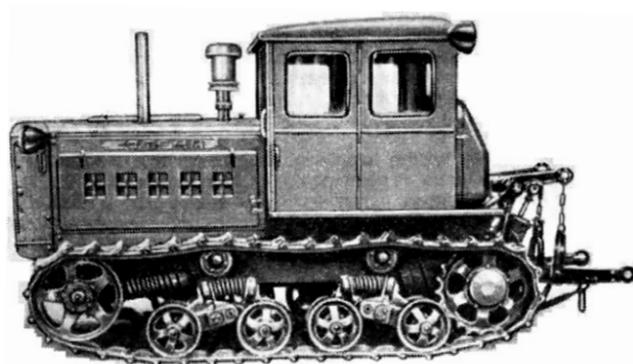
Очередным шагом отечественных тракторостроителей стало создание и внедрение в серийное производство в 1949 г. на СТЗ и ХТЗ гусеничного сельскохозяйственного трактора с дизельным двигателем. Эта разработка стала результатом модернизации основного довоенного пахотного трактора СХТЗ-НАТИ, у которого карбюраторный двигатель был заменен дизелем. Этот трактор стал известным под маркой ДТ-54.

Трактор ДТ-54 относился к гусеничным сельскохозяйственным тракторам общего назначения повышенной мощности [4] (рис. 3).

На тракторе устанавливался четырехцилиндровый четырехтактный бескомпрессорный дизельный двигатель Д-54 водяного охлаждения, работающий на дизельном топливе и развивающий мощность 54 л.с. при 1300



**Рис. 3.** Гусеничный трактор ДТ-54, 1949 г.  
**Fig. 3.** The DT-54 tracked tractor, 1949.



**Рис. 4.** Гусеничный трактор ДТ-54А, 1957 г.  
**Fig. 4.** The DT-54A tracked tractor, 1957.

оборотах коленчатого вала в минуту. Диаметр цилиндра составлял 125 мм, ход поршня – 152 мм.

Конструкция трансмиссии предусматривала пять передач вперед (3,59; 4,65; 5,43; 6,28; 7,90 км/ч) и одну назад (2,40 км/ч).

Габаритные размеры трактора ДТ-54: длина 3,60 м, ширина 1,87 м, высота 2,30 м. Эксплуатационный вес равнялся 5400 кг.

Производство тракторов ДТ-54 осуществлялось в СССР на трех тракторных заводах: Сталинградском (Волгоградском, ВГТЗ) с 1949 по 1963 гг.; Харьковском с 1949 по 1961 гг.; Алтайском с 1952 по 1979 гг. Всего было выпущено 957 900 тракторов [5].

При модернизации ДТ-54 в 1957 г. впервые в мире была установлена гидравлическая навесная система, что существенно облегчило труд механизаторов и увеличило производительность мобильных машинно-тракторных агрегатов. Трактор стал выпускаться под маркой ДТ-54А (рис. 4).

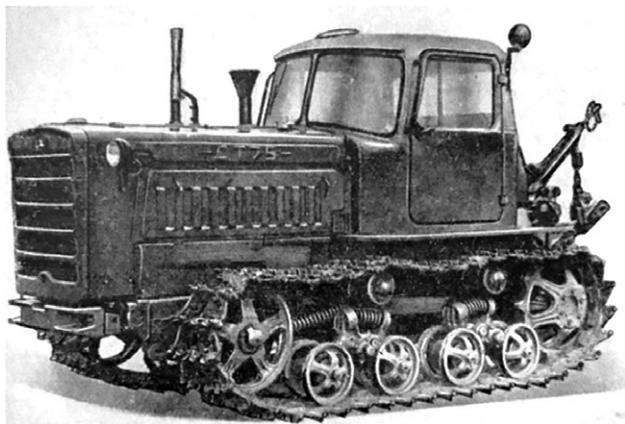
Для выполнения работ на замедленных скоростях на новом тракторе был установлен шестеренчатый ходоуменьшитель. Его использовали при работе с рассадопосадочными и мелиоративными машинами. Минимальная скорость агрегата при этом была снижена и уменьшилась в 6,79 раз.

Конструкция трансмиссии с ходоуменьшителем предусматривала семь передач вперед (0,53; 1,63; 3,59; 4,65; 5,43; 6,28; 7,90 км/ч) и одну назад (2,43 км/ч).

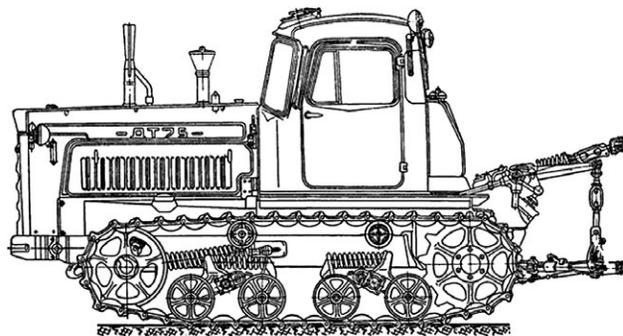
Габаритные размеры трактора ДТ-54А: длина 4,19 м, ширина 1,87 м, высота 2,30 м. Эксплуатационный вес равнялся 5740 кг.

На базе этого трактора на Сталинградском, а затем и на Алтайском тракторных заводах выпускалась болоходная модификация ДТ-55АБ.

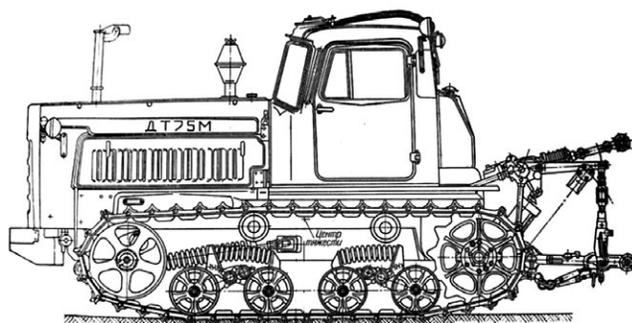
В 1963 г. на Волгоградском тракторном заводе была поставлена на производство новая модель гусеничного трактора общего назначения под маркой ДТ-75 [6] (рис. 5).



**Рис. 5.** Гусеничный трактор ДТ-75, 1963 г.  
**Fig. 5.** The DT-75 tracked tractor, 1963.



**Рис. 6.** Гусеничный трактор ДТ-75М, 1967 г.  
**Fig. 6.** The DT-75M tracked tractor, 1967.



Трактор предназначался для работы на повышенных скоростях в агрегате с навесными, полунавесными и прицепными гидрофицированными и негидрофицированными машинами и орудиями в сельском хозяйстве. Он мог также использоваться на строительных, мелиоративных и транспортных работах.

ДТ-75 был выполнен по классической схеме для гусеничных сельскохозяйственных тракторов и унаследовал многие узлы и детали от своего предшественника – трактора ДТ-54А.

На тракторе устанавливался четырехтактный четырехцилиндровый дизельный двигатель СМД-14 жидкостного охлаждения мощностью 75 л.с. при 1700 оборотах коленчатого вала в минуту. Диаметр цилиндра равнялся 120 мм, ход поршня – 140 мм.

Конструкция трансмиссии обеспечивала семь передач вперед (5,08; 5,66; 6,30; 7,00; 7,80; 8,70; 10,70 км/ч), а с включаемым УKM добавлялось еще две передачи вперед (4,06 и 4,53 км/ч) и две назад – 4,35 и 3,48 км/ч. В дальнейшем трактор по заказу потребителя вместо УKM стали комплектовать ходоуменьшителем или реверс-редуктором. В первом случае число передач переднего

хода увеличивалось до 23 (0,32–10,70 км/ч), во втором: переднего хода – до 14 (3,17–10,70 км/ч), заднего – до 7 (3,93–8,30 км/ч).

Для защиты тракториста от атмосферных осадков и солнечных лучей на тракторе устанавливалась цельнометаллическая кабина автомобильного типа с мягким сиденьем, вентиляцией, обогревом и стеклоочистителем.

Габаритные размеры трактора ДТ-75: длина 4,48 м, ширина 1,74 м, высота 2,30 м. Эксплуатационный вес равнялся 6320 кг.

Тракторы семейства ДТ-75 были поистине универсальны. Во всех почвенно-климатических зонах страны они выполняли вместе с различными машинами и орудиями (а их с трактором агрегатировалось более 200 наименований) не только работы общего назначения, но использовались и на междурядной обработке пропашных культур, уборке урожая, поливе, внесении удобрений, на транспорте в условиях бездорожья.

Широкой была география экспортных поставок этих машин: десятки стран от Финляндии на севере до стран

Африки на юге, от Вьетнама на востоке до Кубы на западе. В страны с жарким климатом тракторы поставлялись с тентом вместо кабины.

Трактор типа ДТ-75 был самым распространенным гусеничным трактором в стране. Всего Волгоградский и Павлодарский тракторные заводы выпустили более 2,7 млн машин такой марки.

Дальнейшие работы по совершенствованию конструкции трактора ДТ-75 привели к созданию новой модели трактора, которая в 1967 г. была поставлена на серийное производство под маркой ДТ-75М [5] (рис. 6).

Новый энергонасыщенный трактор предназначался для работы на повышенных скоростях в агрегате с навесными, полунавесными и прицепными гидрофицированными и негидрофицированными машинами и орудиями в сельском хозяйстве. Он мог также использоваться на строительных, мелиоративных и транспортных работах.

На тракторе устанавливался четырехтактный четырехцилиндровый дизельный двигатель А-41 жидкостного охлаждения мощностью 90 л.с. при 1750 оборотах коленчатого вала в минуту. Диаметр цилиндра равнялся 130 мм, ход поршня – 140 мм.

Конструкция трансмиссии предусматривала двадцать три передачи вперед (базовая модель), а с ходоуменьшителем (модель ДТ-75М-ХС4) – девятнадцать передач

вперед (0,33; 0,36; 0,41; 0,45; 0,70; 0,73; 0,86; 0,94; 1,61; 1,81; 2,00; 2,24; 3,44; 3,84; 4,27; 4,74; 5,30; 5,91; 6,58; 7,31; 8,16; 9,05; 11,18 км/ч) и одну назад (4,54 км/ч).

На тракторе ДТ-75М устанавливалась цельнометаллическая кабина автомобильного типа с вентиляцией, обогревом и стеклоочистителем. В кабине устанавливалось два сиденья: для водителя и пассажира. Сиденье пассажира было мягким и состояло из двух одинаковых подушек. Сиденье водителя было пружинным, регулировалось по высоте, продольному расположению и массе водителя.

Габаритные размеры трактора ДТ-75М: длина 4,58 м, ширина 1,74 м, высота 2,30 м. Эксплуатационный вес равнялся 6560 кг.

Тракторы ДТ-75М изготавливались не только на Волгоградском тракторном заводе, но и на вновь введенном в строй Павлодарском тракторном заводе в Казахстане вплоть до 1995 г. В конце 70-х годов XX века на Волгоградском тракторном заводе было создано специализированное дизайн-бюро, благодаря работе которого строение трактора ДТ-75 в верхней части коренным образом изменилось. Новая кабина прямоугольной формы была смещена вправо, что значительно улучшило условия работы тракториста: ему не надо наклоняться, чтобы следить за бороздой при пахоте. На освободившееся место с левой стороны конструкторы предложили установить топливный бак. Эти и многие другие изменения были воплощены в конструкции гусеничного трактора ДТ-75В [5], который был поставлен на серийное производство в 1979 году (рис. 7).

Этот гусеничный трактор общего назначения тягового класса 3 предназначался для пахоты, дискования, сплошной культивации, боронования, посева, уборки и выполнения плантажных работ в агрегате с навесными, полунавесными и прицепными машинами и орудиями.

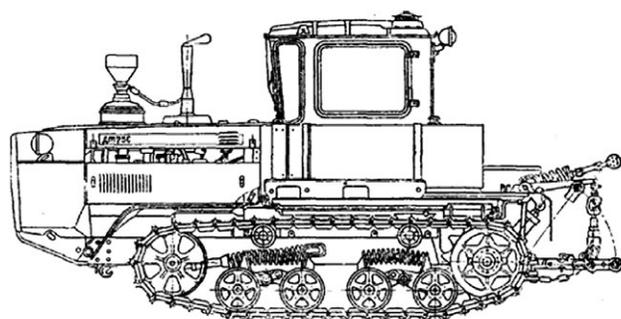
На тракторе был установлен четырехтактный четырехцилиндровый дизельный двигатель СМД-14НГ жидкостного охлаждения мощностью 80 л.с. при 1800 оборотах коленчатого вала в минуту. Диаметр цилиндра равнялся 120 мм, ход поршня составил 140 мм.



Рис. 7. Гусеничный трактор ДТ-75В, 1979 г.  
Fig. 7. The DT-75V tracked tractor, 1979.



Рис. 8. Гусеничный трактор "Волгарь" ДТ-175С, 1986 г.  
Fig. 8. The DT-175S "Volgar" tracked tractor, 1986.



В конструкции трактора были модернизированы ходовая часть, гидравлическая система, тормоза и механизмы натяжения гусениц.

Кабина трактора была выполнена цельнометаллической, двухместной, на виброизолирующих амортизаторах, оснащена герметизированной приточной вентиляционно-очистительной установкой, электрическими стеклоочистителями, омывателем переднего стекла, жидкостным обогревателем.

Конструкция трансмиссии предусматривала семь передач вперед (базовая модель), а с ходоуменьшителем (модель ДТ-75В-ХС4) – двадцать три передачи вперед (0,33; 0,36; 0,41; 0,45; 0,70; 0,73; 0,86; 0,94; 1,61; 1,81; 2,00; 2,24; 3,44; 3,84; 4,27; 4,74; 5,50; 6,10; 6,80; 7,50; 8,40; 9,30; 11,50 км/ч) и одну назад (4,70 км/ч).

Габаритные размеры трактора ДТ-75В: длина 4,67 м, ширина 1,89 м, высота 2,65 м. Эксплуатационный вес равнялся 6910 кг.

В 1986 г. ВГТЗ поставил на серийное производство новый скоростной гусеничный трактор с оригинальной гидромеханической трансмиссией, получивший название “Волгарь” ДТ-175С [7] (рис. 8).

Это был гусеничный сельскохозяйственный трактор общего назначения тягового класса 3, выполненный по классической компоновке с рамной конструкцией. Он предназначался для выполнения основных сельскохозяйственных работ в агрегате с навесными, полунавесными и прицепными гидрофицированными машинами и агрегатами (пахоты, предпосевной обработки почвы, посева, уборки урожая) и мог использоваться для выполнения дорожно-строительных и погрузочных работ.

Трактор был создан для работы на повышенных скоростях в диапазоне 9–15 км/ч. Его отличительной особенностью была установка в трансмиссии гидродинамического преобразователя крутящего момента, дающего возможность в автоматическом режиме плавно изменять скорость движения трактора с учетом тягового

усилия на крюке. Это позволило снизить динамические нагрузки на детали и агрегаты трактора, повысить их надежность и долговечность; улучшить плавность хода и условия труда тракториста; снизить буксование гусениц и уменьшить повреждение почвы; создать условия для максимальной загрузки двигателя, обеспечить стабильный и экономичный режим его работы.

На тракторе был установлен четырехтактный шестичилиндровый V-образный дизельный двигатель СМД-66 жидкостного охлаждения с турбонаддувом и промежуточным охлаждением воздуха мощностью 180 л.с. при 1900 оборотах коленчатого вала в минуту. Диаметр цилиндра равнялся 130 мм, ход поршня – 115 мм.

Кабина трактора была выполнена цельнометаллической, двухместной, подрессоренной, герметизированной. Была оборудована вентиляционной установкой, отопителем, электрическими стеклоочистителями, омывателем переднего стекла, тонированными стеклами. В кабине установлены сиденья для водителя и помощника, аптечка, осветительный плафон, термос, зеркало заднего вида, солнцезащитный козырек. Кабина устанавливалась со смещением вправо от продольной оси трактора и была оборудована дверью справа, а слева – большим окном, которое можно было использовать при необходимости как запасной выход из кабины. Сиденье водителя было подрессоренным с гидравлическим амортизатором двойного действия, которое регулировалось в зависимости от массы и роста водителя.

Конструкция трансмиссии трактора предусматривала при установке ходоуменьшителя семь передач вперед (диапазон 0,68–21,00 км/ч) и одну назад (диапазон 2,50–8,20 км/ч).

Габаритные размеры трактора ДТ-175С: длина 5,17 м, ширина 1,90 м, высота 2,90 м. Эксплуатационный вес равнялся 8030 кг.

Впервые в отечественном тракторостроении на сельскохозяйственном тракторе была применена автоматическая бесступенчатая гидромеханическая трансмиссия, что позволило создать скоростной энергонасыщенный гусеничный трактор. Его производительность по сравнению с трактором ДТ-75М увеличилась на 40–70%.

Постоянная работа волгоградских специалистов над совершенствованием конструкции трактора ДТ-175С с гидромеханической трансмиссией позволила создать новую по техническим характеристикам машину, которая в 1992 г. была поставлена на серийное производство под маркой Волгарь ДТ-175М [6] (рис. 9).

Новый трактор общего назначения относился к тяговому классу 3 и предназначался для основных сельскохозяйственных работ в агрегате с навесными, полунавесными и прицепными орудиями и машинами с активными и пассивными рабочими органами. С соответствующим оборудованием трактор мог использоваться на дорожно-строительных, мелиоративных, погрузочно-разгрузочных и транспортных работах.



**Рис. 9.** Гусеничный трактор Волгарь ДТ-175М, 1992 г.  
**Fig. 9.** The DT-175M “Volgar” tracked tractor, 1992.

На тракторе устанавливался четырехтактный шестицилиндровый V-образный дизельный двигатель СМД-62А жидкостного охлаждения с турбонаддувом и промежуточным охлаждением воздуха мощностью 175 л.с. при 2100 оборотах коленчатого вала в минуту. Диаметр цилиндра равнялся 130 мм, ход поршня составил 115 мм.

Основным отличием новой конструкции от предыдущей стало изменение передаточного числа главной и конечной передач в сторону увеличения. Это позволило более равномерно перераспределить доли работ на I и II рабочих передачах, увеличив тем самым срок службы коробки передач, повысить тяговые, эксплуатационные и топливно-экономические показатели машины. Если у трактора ДТ-175С до модернизации доли работ на I и II рабочих передачах составляли, соответственно, 89 и 11%, то после изменения главной и конечной передач это соотношение составило 42 и 58%. Скорость трактора на II рабочей передаче составляла 8,7–9,3 км/ч. При этом максимальная транспортная скорость несколько снизилась (с 21 до 18 км/ч), что было достаточно для безопасного перемещения трактора по грунтовым дорогам.

Конструкция трансмиссии трактора предусматривала при установке ходоуменьшителя шесть передач вперед (диапазон 0,40–18,00 км/ч) и одну назад (диапазон 1,47–4,82 км/ч).

Габаритные размеры трактора ДТ-175М: длина 5,31 м, ширина 1,85 м, высота 2,79 м. Эксплуатационный вес равнялся 8030 кг.

В 1994 г. на ВгТЗ был поставлен на серийное производство трактор ВТ-100Д. Это был гусеничный сельскохозяйственный трактор общего назначения класса тяги 4. Он предназначался для выполнения основных сельскохозяйственных работ в агрегате с навесными, полунавесными и прицепными агрегатами и машинами с пассивными и активными рабочими органами.

ВТ-100Д – трактор нового поколения: более экономичный, повышенной надежности, с улучшенным комфортом для водителя. С него началось производство семейства новой тракторной техники Волгоградского завода, пришедшей на смену легендарному трактору ДТ-75 [8] (рис.10).

Трактор комплектовался четырехцилиндровым четырехтактным дизельным двигателем Д-442-24 с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха (с бензиновым пусковым двигателем) или Д-442-25 (с прямым стартерным пуском) Алтайского моторного завода (АМЗ). Основная особенность дизельного двигателя Д-442-24/25 Д-442-24 – это возможность работы на двух уровнях мощности:

- 88,3 кВт (120 л.с.) при работе в тяговом режиме;
- 103–107 кВт (140–145 л.с.) при работе с энергоемкими приводными от ВОМ трактора машинами.

Кабина трактора, параметры которой соответствовали мировым стандартам по безопасности и условиям труда, устанавливалась на раме на резиновых амортизаторах отдельно от топливного бака. Кабину отличала большая площадь ее остекления двухслойными герметизированными стеклопакетами, термоизолирующая крыша с люком и встроенным в нее воздухоохладителем испарительного типа с фильтром большой емкости, усовершенствованные шумопоглощающие панели на стенках и потолке, отопитель калориферного типа, электрические стеклоочистители, пневмофиксаторы дверей.

Управление сцеплением и механизмом поворота обеспечивалось при помощи пневмопривода.

Благодаря большому запасу крутящего момента двигателя (30–35%) конструкция трансмиссии трактора предусматривала в базовой комплектации всего пять передач вперед, с диапазоном 4,5–14,2 км/ч и одну назад – 4,8 км/ч. С ходоуменьшителем количество передач вперед возрастает до 25, диапазон 0,36–14,2 км/ч,



**Рис. 10.** Гусеничный трактор ВТ-100Д, ВгТЗ, 1994 г.  
**Fig. 10.** The VT-100D tracked tractor, VgtZ, 1994.



**Рис. 11.** Гусеничный трактор ВТ-100Н, 1994 г.  
**Fig. 11.** The VT-100N tracked tractor, 1994.

назад – до 5, диапазон 0,3–4,8 км/ч; с реверс-редуктором соответственно до 10 передач вперед и 5 назад. Коробка передач была выполнена с шестернями постоянного зацепления на передачах переднего хода.

Габаритные размеры трактора ВТ-100Д: длина 5,40 м, ширина 1,85 м, высота 3,12 м. Эксплуатационный вес равнялся 7720 кг.

В 1994 г. на Волгоградском тракторном заводе стала выпускаться еще одна модель трактора – ВТ-100Н [7] (рис. 11).

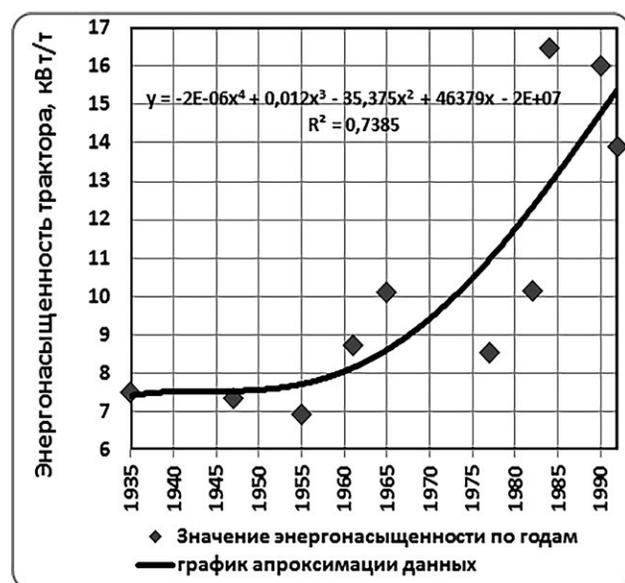
Этот гусеничный трактор общего назначения класса тяги 4 предназначался для выполнения сельскохозяйственных работ в агрегате с навесными, полунавесными и прицепными агрегатами и машинами с пассивными и активными рабочими органами.

На тракторе ВТ-100Н устанавливался дизельный четырехцилиндровый двигатель СМД-20ТА Харьковского завода «Серп и Молот» с турбонаддувом водяного охлаждения. Основная особенность двигателя СМД-20ТА – это возможность работы на двух уровнях мощности:

- 88,3 кВт (120 л.с.) при работе в тяговом режиме;
- 103–107 кВт (140–145 л.с.) при работе с энергоемкими приводными от ВОМ трактора машинами.

Конструкция трансмиссии трактора предусматривала в базовой комплектации пять передач вперед, с диапазоном 4,5–14,2 км/ч и одну передачу назад – 4,8 км/ч. С ходоуменьшителем количество передач вперед возрастает до 25, диапазон скоростей 0,36–14,2 км/ч, назад – до 5, диапазон 0,3–4,8 км/ч.

Габаритные размеры трактора ВТ-100Н: длина 5,33 м, ширина 1,85 м, высота 3,12 м. Эксплуатационный вес равнялся 7620 кг.



**Рис. 12.** Изменение энергонасыщенности гусеничных тракторов ВгТЗ (СТЗ) по годам выпуска.

**Fig. 12.** The behavior of the VgTZ (STZ) tracked tractors energy saturation depending on production year.

В статье рассмотрены 10 основных моделей гусеничных сельскохозяйственных тракторов, выпускаемых на ВгТЗ (СТЗ). Однако завод выпускал гораздо больше моделей тракторов. Он производил промышленные модификации крутосклонных, свекловичных, рисовых, болотоходных, газогенераторных и других тракторов. Продолжалось создание новой тракторной техники и в начале XXI века вплоть до 2010 года.

Вызывает интерес анализ изменения одного из основных показателей технического уровня – энергонасыщенности тракторов ВгТЗ (СТЗ) за период деятельности завода. Применительно к тракторной технике энергонасыщенность является определяющим фактором при осуществлении работ на повышенных скоростях, обеспечивая высокую производительность сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов [9, 10].

Проведенные исследования показывают, что энергонасыщенность гусеничных сельскохозяйственных тракторов производства ВгТЗ с течением времени неуклонно возрастала (рис. 12).

Так, в 1937 г. энергонасыщенность трактора «СТЗ-НАТИ» составляла 7,50 кВт/т, а в 1992 г. этот показатель достиг величины в 13,90 кВт/т (ВТ-100Д/Н), то есть энергонасыщенность увеличилась в 1,85 раз. В 80-х годах XX века создавались модели тракторов (ДТ-175С) с энергонасыщенностью более 16 кВт/т.

Если исходить из того, что ход развития процессов в технике, а значит, и в истории техники описывается интегральной кривой [11, 12], то можно заключить, что полученная линия тренда (рис. 12) свидетельствует о незаконченности эволюционного процесса повышения энергонасыщения конструкций гусеничных сельскохозяйственных тракторов. Исходя из анализа тенденций развития гусеничной техники и экспертных оценок можно предположить, что перспективные образцы сельскохозяйственных гусеничных тракторов будут иметь в ближнесрочной перспективе уровень энергонасыщенности в пределах 15,0–16,0 кВт/т.

## ВЫВОДЫ

С началом серийного производства в 1930 году гусеничного трактора СТЗ-НАТИ начинается эпоха развития отечественной научно-технической школы в тракторостроении.

За годы своей деятельности коллектив ВгТЗ (СТЗ) на протяжении 55 лет XX века были созданы десятки инновационных моделей гусеничных сельскохозяйственных тракторов. Каждая новая модель являлась значительным вкладом в мировой технический прогресс в области тракторостроения. По уникальности созданных конструкций, по количеству выпускаемой продукции и регионов ее распространения, по профессионализму инженерно-конструкторского состава Волгоградский (Сталинградский) тракторный

завод являлся одним из лидеров мирового тракторостроения.

Анализ изменения энергонасыщенности тракторной техники, созданной на протяжении 55-летнего периода XX века на ВГТЗ (СТЗ), показал, что она возросла в 1,85 раз с 7,50 до 13,91 кВт/т.

Опыт волгоградских тракторостроителей должен быть проанализирован и использован с целью выявления закономерностей, тенденций и современных направлений развития тракторной техники.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Ю.С. Ценч – обобщение материала, построение графика энергонасыщенности, редактирование текста, утверждение финальной версии; В.В. Косенко – подбор исходных материалов по теме статьи; В.В. Шаров – анализ и систематизация материалов статьи, написание текста рукописи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tsench Y.S. The main stages of agriculture mechanization in Russia // *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020. Vol. 51, N 3. P. 69–73.
2. Ценч Ю.С. Научно-технический потенциал как главный фактор развития механизации сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16, № 2. С. 4–13. doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13
3. Хрулькевич О.А., Шаров В.В. “СТЗ-НАТИ” – гусеничный трактор по имени «НАТИК» // *Сельский механизатор*. 2008. № 12. С. 16–17.
4. Косенко В.В., Шаров В.В., Герасимов Е.О., Тюбаев А.И. Юбилей “железного коня” // *Сельский механизатор*. 2017. № 7. С. 24–25.
5. НАТИ. Отечественные сельскохозяйственные тракторы. Иллюстрированная история развития за 100 лет. 1896–1996. Москва: Внешторгиздат, 1996.
6. Косенко В.В., Шаров В.В., Ценч Ю.С. 70 лет легендарному трактору ДТ-54 // *Технический сервис машин*. 2019. № 3. С. 196–209.
7. Косенко В.В., Шаров В.В., Ценч Ю.С. Трактор ДТ-75. Знаменитый долгожитель // *Технический сервис машин*. 2019. № 1. С. 216–226.

## REFERENCES

1. Tsench YS. The main stages of agriculture mechanization in Russia. *AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2020;51(3):69-73.
2. Tsench YS. Scientific and Technological Potential as the Main Factor for Agricultural Mechanization Development. *Agricultural*

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** Yu.S. Tsench — generalization of the material, plotting the energy saturation graph, editing the text of the manuscript, approval of the final version; V.V. Kosenko – search for publications and background materials on the topic of the article; V.V. Sharov – analysis and systematization of the article materials, writing the text of the manuscript. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

8. Косенко В.В., Шаров В.В., Ценч Ю.С. К 35-летию начала производства трактора ДТ-175С «Волгарь» // *Технический сервис машин*. 2021. № 1. С. 163–177. doi: 10.22314/2618-8287-2021-59-1-163-177
9. Косенко В.В. ВТ-100 – первый в новом семействе тракторов ВГТЗ [интернет]. Доступ по ссылке: [https://techstory.ru/fin/85\\_vt100\\_2020.htm](https://techstory.ru/fin/85_vt100_2020.htm) Дата обращения: 13.09.2022.
10. Ценч Ю.С. Становление и развитие научно-технического потенциала механизации сельского хозяйства России: дисс. докт. техн. наук. Москва: Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 2021. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49209607> Дата обращения: 13.09.2022.
11. Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Лавров А.В., и др. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. № 4. С. 220–229.
12. Шаров В.В., Ценч Ю.С. Приоритеты России в мировом тракторостроении // *Доклады ТСХА. Международная научная конференция, посвященной 175-летию К.А. Тимирязева; Декабрь 06–08, 2018*; Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019.
13. Косенко В.В., Шаров В.В., Ценч Ю.С. Главные конструкторы волгоградских тракторов. К 90-летию СТЗ-ВГТЗ // *История науки и техники*. 2020. № 8. С. 85–97.

*Machinery and Technologies*. 2022;16(2):4-13. (In Russ). doi: 10.22314/2073-7599-2022-16-2-4-13

3. Khurulkevich OA, Sharov VV. “STZ-NATI” – gusenichnyj traktor po imeni “NATIK”. *Selskiy Mechanizator*. 2008;(12):16–17. (In Russ).

4. Kosenko VV, Sharov VV, Gerasimov EO, Tjubaev AI. Jubilej "zheleznogo konja". *Selskiy Mehanizator*. 2017;(7):24–25. (In Russ).
5. NATI. *Otechestvennye sel'skhozjajstvennye traktory. Illjustrirovannaja istorija razvitija za 100 let. 1896–1996*. Moscow: Vneshtorgizdat; 1996. (In Russ).
6. Kosenko VV, Sharov VV, Tsench YS. 70 years of the legendary DT-54 tractor. *Machinery Technical Service*. 2019;(3):196–209. (In Russ).
7. Kosenko VV, Sharov VV, Tsench YS. Tractor DT-75. Famous pendant. *Machinery Technical Service*. 2019(1): 216–226. (In Russ).
8. Kosenko VV, Sharov VV, Tsench YS. The 35th Anniversary of Production of the Dt-175s "Vol-Gar" Tractor. *Machinery Technical Service*. 2021;(1):163–177. (In Russ). doi: 10.22314/2618-8287-2021-59-1-163-177
9. Kosenko VV. *VT-100 – pervyj v novom semejstve traktorov VgTZ* [Internet]. Available from: [https://techstory.ru/fin/85\\_vt100\\_2020.htm](https://techstory.ru/fin/85_vt100_2020.htm)
10. Tsench YS. *Stanovlenie i razvitie nauchno-tehnicheskogo potentsiala mekhanizatsii sel'skogo khozyajstva Rossii* [dissertation]. Moscow: Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 2021. Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49209607> (In Russ).
11. Godzhaev ZA, Shevtsov VG, Lavrov AV, et al. Strategy of russian agricultural machinery modernization until 2030 (forecast). *Machinery Technical Service*. 2019;(4):220–229. (In Russ).
12. Sharov VV, Tsench YS. Prioritety Rossii v mirovom traktorostroenii. Proceedings of the International science conference "Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya, posvyashchennoi 175-letiyu K.A. Timiryazeva"; 2018 Dec 06–08; Moscow: Rossiiskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet - MSKhA im. K.A. Timiryazeva; 2019. (In Russ).
13. Kosenko VV, Sharov VV, Trench YS. Main designers of the volgogradsky tractors. to the 90th anniversary of STZ-VGTZ. *The History of Science and Engineering*. 2020;(8):85–97. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

### \*Ценч Юлия Сергеевна,

доцент, д.т.н.,  
 профессор кафедры общенаучных и специальных дисциплин;  
 заместитель директора по образовательной и редакционно-  
 издательской деятельности;  
 адрес: Россия, 109428, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5;  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3214-4725>;  
 eLibrary SPIN: 5379-6131;  
 e-mail: vimasp@mail.ru

### Косенко Вячеслав Владимирович,

к.т.н.,  
 старший преподаватель кафедры «Техническая эксплуатация  
 и ремонт автомобилей»;  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3996-6414>;  
 eLibrary SPIN: 3616-4401;  
 e-mail: kosenko46@gmail.com

### Шаров Владимир Васильевич,

к.т.н.,  
 методист;  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7659-9978>;  
 eLibrary SPIN: 5601-0079;  
 e-mail: sharov\_vv56@mail.ru

\*Автор для переписки

## AUTHORS' INFO

### \*Yuliya S. Tsench,

Associate Professor, Dr. Sci. (Engin.),  
 Professor of the General Science and Special Disciplines  
 Department, Deputy Director for Educational and Editorial-  
 Publishing Activity;  
 address: 5 build, 1st Institutsky proezd, Moscow, 109428, Russia;  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3214-4725>;  
 eLibrary SPIN: 5379-6131;  
 e-mail: vimasp@mail.ru

### Vyacheslav V. Kosenko,

Cand. Sci. (Engin.),  
 Senior Lecturer of the Technical Operation and Maintenance  
 of Vehicles Department;  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3996-6414>;  
 eLibrary SPIN: 3616-4401;  
 e-mail: kosenko46@gmail.com

### Vladimir V. Sharov,

Cand. Sci. (Engin.),  
 Methodist;  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7659-9978>;  
 eLibrary SPIN: 5601-0079;  
 e-mail: sharov\_vv56@mail.ru

\*Corresponding author

УДК 621.43.057.2:006.07

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106047>

Оригинальное исследование

# О новых требованиях к экологическим показателям сельскохозяйственных тракторов в Таможенном союзе

А.Р. Кульчицкий<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> АО «Камешковский механический завод», Камешково, Россия<sup>2</sup> Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Согласно Решению Совета Евразийской экономической комиссии (ЕЭК) от 29.10.2021 № 127 [1] в Технический регламент Таможенного союза «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» (ТР ТС 031/2012) [2] внесены существенные изменения, касающиеся требований к экологическому уровню двигателей, работающих как на дизельном топливе, так и на газовом.

**Цель исследования.** Анализ современных требований к экологическому уровню сельскохозяйственных тракторов в Таможенном союзе.

**Метод исследования.** Аналитический.

**Результаты и их применение.** Изменения касаются, во-первых, уточнения требований к эмиссии вредных веществ с отработавшими газами дизельных двигателей, устанавливаемых на указанные трактора, во-вторых, введения (впервые) требований к выбросам вредных веществ к двухтопливным двигателям (т.е. работающим по газодизельному процессу), и в-третьих, уточнения аналогичных требований к двигателям с искровым зажиганием, работающих на газовом топливе. Под газовым топливом понимается сжатый природный газ и сжиженный нефтяной газ. Экологические требования к дизельным двигателям на период до 01.09.2022. соответствуют европейскому уровню Stage IIA, а после указанного срока – уровню Stage IIIA. В отношении двухтопливных и газовых двигателей: до 01.09.2022. требования к выбросам вредных веществ – согласно указанным в технической документации, а после указанного срока – согласно указанным в ТР ТС 031/2012.

**Заключение.** Уточнение в Техническом регламенте таможенного союза 031/2012 нормативных требований к эмиссии вредных веществ с отработавшими газами сельскохозяйственных тракторов (согласно Решению Совета Евразийской экономической комиссии от 29.10.2021.) устраняет неоднозначность понимания этих требований по сравнению с действующей редакцией ТР ТС 031/2012.

Замена традиционного топлива на газовое топливо теоретически обеспечивает снижение эмиссии вредных веществ с отработавшими газами двигателей.

Замена дизельного топлива на природный газ (метан) позволяет, теоретически, снизить на 15% эмиссию диоксида углерода, который считают одним из газов, ответственных за создание парникового эффекта. Снижение эмиссии диоксида углерода может повысить конкурентоспособность сельскохозяйственной продукции при ее экспорте за рубеж в связи с возможным введением в перспективе трансграничного углеродного налога.

С целью обеспечения развития российской экономики в условиях санкций целесообразно отменить введение в действие с 01.09.2022 экологических норм уровня Stage 3A для сельскохозяйственных тракторов, что прописано в ТР ТС 031/2012.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные трактора; мощность; дизельное топливо; газодизельный процесс; сжатый природный газ; сжиженный нефтяной газ; выбросы вредных веществ.

## Для цитирования:

Кульчицкий А.Р. О новых требованиях к экологическим показателям сельскохозяйственных тракторов в таможенном союзе // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 3. С. 167–174. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106047>

Рукопись получена: 10.04.2022

Рукопись одобрена: 22.05.2022

Опубликована: 15.07.2022

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106047>

Original study article

# On new requirements for the environmental indicators of agricultural tractors in the Customs Union

Alexey R. Kulchitskiy<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> JSC Kameshkovsky Mechanical Plant, Kameshkovo, Russia<sup>2</sup> Vladimir State University named after of A.G. and N.G. Stoletovs, Vladimir, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Decisions of the Council of the Eurasian Economic Commission No. 127 of October 29, 2021. and No. 89 dated 04/15/2022. amendments have been made to the Technical Regulations of the Customs Union "On the safety of agricultural and forestry tractors and trailers for them" (TR CU 031/2012).

**AIMS:** Analysis of modern requirements for the environmental indicators of agricultural tractors in the Customs Union.

**METHOD:** Analytical.

**RESULTS:** By the decision of the Council of the Eurasian Economic Commission (October 29, 2021.) amendments have been made to the Technical Regulations of the Customs Union 031/2012, which cover the issues as follows: clarification of the requirements for the emission of harmful substances with exhaust gases from diesel engines, installed on mentioned tractors; introduction (for the first time) of requirements for emissions of harmful substances to dual-fuel engines (i.e. on the gas-diesel process); clarification of similar requirements for spark-ignition engines, operating on gaseous fuel. Environmental requirements for diesel engines correspond to the European level of Stage IIA level for the period up to 09/01/2022 and to the Stage IIIA after the specified period. The requirements for dual-fuel and gas engines are in accordance with those, specified in the technical documentation, until 09/01/2022 and in accordance with those, specified in TR CU 031/2012, after this date.

**CONCLUSIONS:** Clarification in the Technical Regulations 031/2012 of the regulatory requirements for the emission level of agricultural tractors eliminates the ambiguity in understanding of these requirements.

The replacement of conventional fuel with gaseous fuel theoretically provides a reduction in the emission of harmful substances from the exhaust gases of engines.

The replacement of diesel fuel with natural gas (methane) allows, theoretically, to reduce the emission of carbon dioxide, considered as one of the gases, contributing to the greenhouse effect, by 15%.

In order to ensure the development of the Russian economy in the context of sanctions, it is advisable to cancel the coming into force the Stage IIIA level environmental standards for agricultural tractors from 09/01/2022, which is given in the TR CU 031/2012.

These changes concern relate, firstly, to the clarification of the requirements for the emission of harmful substances with exhaust gases from diesel engines installed on these tractors, and secondly, the introduction (for the first time) of the requirements for emissions of harmful substances to dual-fuel engines (i.e. on the gas-diesel process), and thirdly, clarification of similar requirements for spark ignition engines running on gas fuel. Fuel gas refers to compressed natural gas and liquefied petroleum gas. Environmental requirements for diesel engines for the period up to 09/01/2023. correspond to the European level of Stage II, and after the specified period – to the level of Stage IIIA. For dual-fuel and gas engines. requirements for emissions of harmful substances: until 09/01/2023 – in accordance with those specified in the technical documentation, and after the specified period – in accordance with those specified in TR CU 031/2012.

**Keywords:** agricultural tractors; power; diesel fuel; gas-diesel process; compressed natural gas; liquefied petroleum gas; emissions of harmful substances.

## Cite as:

Kulchitskiy AR. On new requirements for the environmental indicators of agricultural tractors in the Customs Union // *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):167–174. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106047>

Received: 10.04.2022

Accepted: 22.05.2022

Published: 15.07.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно Решению Совета Евразийской экономической комиссии (ЕЭК) от 29.10.2021 № 127 [1] в Технический регламент Таможенного союза «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» (ТР ТС 031/2012) [2] внесены существенные изменения, касающиеся требований к экологическому уровню двигателей, работающих как на дизельном топливе, так и на газовом. Также введены (впервые) требования к двухтопливным двигателям, работающим по газодизельному процессу. При этом под газовым топливом в ТР ТС 031/2012 понимается сжиженный нефтяной газ (СНГ) – пропан-бутановая смесь и природный газ (метан). Причем в последнем случае речь идет только о сжиженном природном газе (СПГ); применение сжиженного природного газа (СПГ) в регламенте не отражено. Кроме того, 15.04.2022 ЕЭК приняла Решение № 89 [3], уточняющее некоторые формулировки вышеуказанного Решения № 127.

Согласно этим Решениям все дизельные двигатели указанного назначения подразделяются по диапазонам мощности, что определяет перечень нормируемых параметров, предельные значения нормируемых параметров и сроки введения этих требований в действие. Так, срок действия требований для двигателей диапазонов мощности E1, E2, F, G и D – до 01.09.2023, а для двигателей диапазонов мощности H, I, J и K – с 01.09.2023 (табл. 1). Таким образом, в ТР ТС 031/2012 уточнено, что до 01.09.2023 действуют экологические нормы уровня Stage II (что определяется по численным

значениям нормативов), а с 01.09.2023 – уровня Stage IIIA (также, согласно численным значениям нормативов).

Что касается газовых и двухтопливных двигателей, то до 1 сентября 2023 г. значения выбросов вредных веществ (ВВ), содержащихся в отработавших газах (ОГ) двигателей указанного назначения не должны превышать значений, указанных в документах на двигатель и трактор (в Руководстве по эксплуатации) и полученных при испытаниях по методике Правил ООН № 96 (02) «Единые предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной мобильной технике в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями» (табл. 2). А с 1 сентября 2023 г. значения выбросов вредных веществ, полученные при испытаниях по методике Правил ООН № 96 (02), не должны превышать значений, приведенных в табл. 3 и 4.

Требования по допустимому уровню дымности отработавших газов дизельных двигателей присутствовали в ТР ТС 031/2012 до введения в действие изменений, и оценка данного параметра должна была производиться согласно Правилам ООН № 24(03) [4]. Однако, согласно Решению № 127, требования по допустимому уровню дымности ОГ будут применяться только для условий эксплуатации (п. 10 Изменений) и только для двигателей экологического класса «0», «1» и «2» (соответственно, Stage 0, Stage I и Stage II), поставляемых в качестве запасных частей (для класса «2» – с 1 января 2024 г.). Причем требования к условиям испытаний и нормативные требования – согласно ГОСТ 17.2.2.02-98 «Нормы

**Таблица 1.** Двигатели, работающие на дизельном топливе

**Table 1.** The diesel engines

Диапазон мощности	Полезная мощность двигателя Р, кВт	Удельный выброс, г/(кВт·ч)			
		оксида углерода CO	углеводородов HC	оксидов азота NOx	твердых частиц PT
E1	130 ≤ P ≤ 156	3,5	1,0	6,0	0,2
E2	156 < P ≤ 560	3,5		4,0	0,2
F	75 ≤ P < 130	5,0	1,0	6,0	0,3
G	37 ≤ P < 75	5,0	1,3	7,0	0,4
D	19 ≤ P < 37	5,5	1,5	8,0	0,8
H	130 ≤ P ≤ 560	3,5		4,0	0,2
I	75 ≤ P < 130	5,0		4,0	0,3
J	37 ≤ P < 75	5,0		4,7	0,4
K	19 ≤ P < 37	5,5		7,5	0,6

**Примечание:** полезная мощность двигателя – мощность двигателя (определенная на тормозном стенде), оснащенного всем необходимым для работы оборудованием; оборудование, установленное на двигателе, но не необходимое для работы двигателя, должно быть отключено или работать без нагрузки; если вентилятор отсутствует, то величина мощности, затрачиваемая на привод вентилятора, должна быть вычтена из измеренной мощности; значения сопротивления воздуха на впуске в двигатель и отработавших газов на выпуске из двигателя устанавливаются максимально допустимыми.

**Таблица 2.** Испытательный цикл согласно Правилам ООН № 96(02)**Table 2.** The testing cycle according to UN Regulation No. 96(02)

Номер режима	Скоростной режим двигателя	Крутящий момент, % от наибольшего на данном скоростном режиме
1	номинальный	100
2	номинальный	75
3	номинальный	50
4	номинальный	10
5	промежуточный	100
6	промежуточный	75
7	промежуточный	50
8	соответствующий минимальным оборотам холостого хода	0

**Примечание:** время выдержки на каждом режиме – 10 мин, время перехода с режима на режим не лимитируется, «промежуточный» скоростной режим – соответствует режиму максимального крутящего момента, если лежит в диапазоне 60...75% от «номинального» скоростного режима, в противном случае – ближайшему граничному значению (60% или 75% от «номинального»).

**Таблица 3.** Двигатели с принудительным зажиганием, работающие на КПГ или СНГ**Table 3.** The engines with forced ignition and operating with CNG or LPG

Полезная мощность двигателя P, кВт	Удельный выброс вредных веществ, г/(кВт·ч)	
	оксида углерода CO	несодержащих метан углеводородов и оксидов азота, в сумме NMHC +NOx
$130 \leq P \leq 560$	3,5	4,0
$75 \leq P < 130$	5,0	4,0
$37 \leq P < 75$	5,0	4,7
$19 \leq P < 37$	5,0	7,5

**Таблица 4.** Двигатели двухтопливные с воспламенением от сжатия**Table 4.** The dual-fuel engines with compression ignition

Полезная мощность газодизеля P, кВт	Удельный выброс вредных веществ, г/(кВт·ч)			
	оксида углерода CO	не содержащих метан углеводородов NMHC	оксидов азота NOx	Твердых частиц PT
$130 \leq P \leq 560$	3,5	1,0	6,0	0,2
$75 \leq P < 130$	5,0	1,0	6,0	0,3
$7 \leq P < 75$	5,0	1,3	7,0	0,4
$19 \leq P < 37$	5,0	1,5	8,0	0,8

**Примечание:** двухтопливный двигатель – двигатель, который предназначен для одновременной работы на дизельном и газовом топливе, причем потребляемое количество одного вида топлива по отношению к другому может варьироваться в зависимости от режима работы и типа двигателя; также двигатель способен работать только на одном дизельном топливе.

и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин» [5]. Для двигателей экологического класса «3А» (т.е. Stage IIIA) требования по оценке дымности ОГ отсутствуют.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ современных требований к экологическому уровню сельскохозяйственных тракторов в Таможенном союзе.

## МЕТОДЫ

Метод исследования – аналитический.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В отношении двигателей, работающих только на дизельном топливе, изменения коснулись уточнения экологических требований. А именно: до принятия указанного Решения существовала неоднозначность понимания: кто-то считал, что действуют нормы уровня Stage II, а кто-то – Stage IIIA. Подобная ситуация была обусловлена тем, что в тексте TP TC 031/2012 (п. 14.1) была ссылка на «Правила ЕЭК ООН № 96(02)/Пересмотр 1», что соответствовало уровню Stage II [6]. В то же время к моменту введения в РФ в действие TP TC 031/2012 (с 15.02.2015.) в Европе на аналогичные трактора действовали требования уровня Stage IIIA, согласно «Правилам ЕЭК ООН № 96(02)/Пересмотр 1/Поправка 1» [7]. Однако, поскольку официального изменения на уровне Таможенного союза (т.е. должно было бы быть Решение Совета ЕЭК) в текст п. 14.1 TP TC 031/2012 внесено не было, то и применять требования уровня Stage IIIA было необосновано.

Кроме того, в п. 14.2 ранее действующей редакции TP TC 031/2012 было указано, что с 15 февраля 2017 г. действуют более жесткие требования, которые по численному значению (указанному в тексте Регламента) соответствовали экологическому уровню Stage IIIB. Но Решением Совета ЕЭК от 30.11.2016 № 126 подобное требование было аннулировано [8]. В результате упомянутое Решение № 127 официально утвердило, что, во-первых, с момента введения TP TC 031/2012 в действие до 01.09.2023 действуют нормы уровня Stage II, а с 01.09.2023 – Stage IIIA, а во-вторых, что введение в России в действие экологических норм уровня Stage IIIB нецелесообразно. Последнее подтверждается информацией Министерства сельского хозяйства РФ: в России в период с 2009 по 2013 годы на 1000 га пашни приходилось по 4 трактора, а с 2014 – по 3 трактора; в то же время в Канаде, схожей с Россией по почвенно-климатическим условиям, урожайности и контурности полей, – 16. Если сравнить с рядом других стран, то ситуация в России смотрится еще хуже: в ФРГ и Франции – 65 тракторов на 1000 га

пашни, в Китае – 28, США – 26, в Белоруссии – 9, Аргентине – 8, Казахстане – 6 [9]. Подобное обстоятельство указывает на то, что даже если выброс ВВ с отработавшими газами дизелей сельскохозяйственных тракторов в России будет в несколько раз выше, чем в перечисленных странах, то концентрация вредных веществ в воздухе будет все равно меньше (а именно эта концентрация, а не концентрация вредных веществ в ОГ оказывает влияние на животный и растительный мир). И наоборот, принятие действующих европейских норм в России будет означать фактически добровольное возложение на себя обязанности обеспечить чистоту воздуха в районе работы сельскохозяйственных тракторов в несколько раз выше, чем в зарубежных странах. Подобная ситуация явно экономически нецелесообразна, поскольку обеспечение более жестких экологических норм требует дополнительных высоких затрат как при производстве, так и в случае закупки иностранной техники с подобными показателями.

Введение европейских нормативов в Регламенты Таможенного союза было вызвано желанием обеспечить возможность поставлять свою технику на зарубежные рынки, для чего Россия в течение 18 лет (с 1993 по 2011 годы) добивалась вступления в ВТО. Однако результат оказался иной: доступ на зарубежные рынки блокировался различными санкциями, а вот внутренний рынок оказался открытым для иностранной техники. И хотя, в частности, экологический уровень экспортируемой в РФ техники был выше, чем отечественной, но никакого влияния на экологическую ситуацию в стране (по вышеприведенным причинам) это оказать не могло. Влияние сказывалось только на увеличение затрат со стороны российских производителей по обеспечению более строгих (и бессмысленных для России) экологических нормативов. В этом плане более реальными были нормативы по ГОСТ 17.2.2.5-97 и ГОСТ 17.2.2.02-98, разработанные Рабочей группой Госстандарта в 1996 г.: эти стандарты учитывали реальную ситуацию в отношении необходимого и достаточного экологического уровня отечественных дизелей тракторного назначения как в отношении уровня выброса ВВ в атмосферу, так и технического уровня в производстве [10, 11]. Также стоит отметить и такой факт, что, согласно требованиям Правил ООН № 96, для подтверждения норм уровня Stage (любой степени жесткости) необходимо измерений эмиссии твердых (точнее – дисперсных) частиц. В России ни одна машиноиспытательная станция в системе Минсельхоза, проводящая испытания сельскохозяйственной техники, не оснащена соответствующим оборудованием (так называемым «туннелем»), которое производится только за рубежом; в лучшем случае эти станции имеют газоанализаторы (для измерения концентрации газообразных ВВ: оксида углерода, суммарных углеводородов и оксидов азота) и дымомеры (для определения непрозрачности потока отработавших газов).

ГОСТ 17.2.2.05-96 не предусматривает измерения эмиссии твердых частиц.

Что касается требований, предъявляемых к двухтопливным двигателям с 01.09.2023, то следует отметить следующее. Замещение дизельного топлива (ДТ) на природный газ (ПГ) выполняется с целью не только экономии более дорогого традиционного ДТ, но и для сокращения выброса ВВ в атмосферу. Однако принятые нормативы соответствуют нормативам для чисто дизельных двигателей, действующим до 01.09.2023, т.е. уровню Stage 2. Учитывая, что двухтопливный двигатель может работать и только на чистом ДТ, то это значит, что допускается с 01.09.2023 выброс ВВ с ОГ двухтопливных двигателей в режиме работы только на ДТ на уровне Stage 2. Тогда возникает вопрос, зачем нужна организация двухтопливного режима работы, если никакого экологического эффекта это не производит, тем более что стоимость такого двигателя выше, чем чисто дизельного варианта.

Переход на газовое топливо – природный газ или СНГ – взамен дизельного топлива позволяет решать и такую современную проблему, как снижение эмиссии в атмосферу диоксида углерода  $CO_2$  – одного из газов, который считают ответственным за создание парникового эффекта, обуславливающего повышение температуры атмосферы. Источником образования  $CO_2$  является углерод, входящий в состав любого углеводородного топлива: в ДТ содержание углерода составляет 86–87% по массе, в СНГ – 82%, в ПГ – 75%. Таким образом, теоретически, если при полном сгорании СНГ образование  $CO_2$  по сравнению со сгоранием ДТ снижается только на 4–5%, то при сгорании ПГ – уже на 15%. В настоящее время нормирование эмиссии  $CO_2$  с ОГ двигателей сельскохозяйственных тракторов не производится. Но в Европе уже рассматривается вопрос о введении пограничного углеродного налога на импортируемые товары. Этот налог должен стать чем-то вроде пошлины, которая будет взиматься с ввозимых в Европу товаров в зависимости от объема парниковых газов, выброшенных в атмосферу в процессе производства этого товара. Пока, правда, в первую очередь рассматривается такая продукция, как металлы и минеральные удобрения [12]. Но нет гарантий, что этот налог не будет распространен и на другие виды продукции. И в случае введения такого налога на сельскохозяйственную продукцию обеспечение снижения эмиссии диоксида углерода в ходе сельскохозяйственных работ за счет перехода с традиционного ДТ на газовое повысит конкурентоспособность такой продукции. Тем более, что в Европе на ближайшую перспективу признали природный газ экологически чистым топливом (в связи с тем, что европейская программа перехода от ископаемых видов топлива на возобновляемые источники энергии – ветровую и солнечную, по данным за 2020 г., оказалась неэффективной) [13].

Однако в связи с настоящей геополитической ситуацией, вызванной наложением на Россию необоснованных

и необъективных санкций со стороны ряда государств, следует обратить внимание на прекращение поставок в Россию зарубежной продукции, в том числе и агрегатов, используемых для комплектации сельскохозяйственных тракторов. При этом неважно, что уровень локализации техники в РФ может быть хоть 90%, но если нет, например, двигателя, то и всей техники тоже не будет: в частности, в России не производятся тракторные двигатели мощностью менее 90 л.с. В связи с этим с целью обеспечения продовольственной независимости страны в условиях санкций целесообразно отменить введение в действие с 01.09.2023 экологических норм уровня Stage IIIA для сельскохозяйственных тракторов. Здесь стоит указать, что Совет Евразийской экономической комиссии 05.04.2022 принял решение о внесении изменения в технический регламент «О безопасности колесных транспортных средств» (ТР ТС 018/2011), с вступлением в силу 25 апреля 2022 г. Документ прописывает требования к автомобилям на территории стран Евразийского экономического союза (ЕАЭС), а именно – до февраля 2023 г. каждое государство-член ЕАЭС вправе устанавливать собственные требования к машинам, которые выпускаются в обращение на территории страны. Эти изменения фактически узаконили производство упрощенных моделей с более низкими нормами экологии и безопасности [14, 15, 16]. Но проблема производства деталей для иностранной техники для обеспечения ее ремонта не исчезает [17].

В отношении выполнения европейских стандартов стоит обратить внимание не только на то, что для России неактуально введение норм уровня Stage IIIA в связи с крайне низким количеством тракторов на единицу пахотных площадей (как было отмечено выше). Следует принять во внимание прецедент по преждевременному прекращению европейских сертификатов в отношении производителей пеллет, брикетов и щепы. А именно: с 8 апреля перестали действовать российские и белорусские сертификаты FSC (Лесной попечительский совет) и SBP (программа устойчивой биомассы) на указанную продукцию, которая применяется на крупных электростанциях и котельных Европы; с 15 апреля 2022 г. прекращено действие сертификатов ENplus, применяемых на потребительском рынке; новые заявки не рассматриваются, запланированные контрольные аудиты действующих сертификатов пока проводиться не будут, хотя российское твердое биотопливо (в виде пеллет, брикетов, топливной щепы) выведено из-под санкций, поставляется в Европу без пошлин и реально востребовано на рынке ЕС: ежегодно на европейский рынок их поставлялось порядка 3 млн тонн, чтобы обеспечить теплом и электричеством дома жителей Европы [18]. Подобная ситуация может произойти и с другими видами экспортируемой за рубеж продукции независимо от наличия европейских сертификатов и отсутствия в санкционных списках. Соответственно,

все затраты, связанные с подготовкой и проведением процедуры подтверждения соответствия европейским стандартам, окажутся бесполезными.

## ВЫВОДЫ

Уточнение в Техническом регламенте таможенно-го союза 031/2012 нормативных требований к эмиссии вредных веществ с отработавшими газами сельскохозяйственных тракторов устраняет неоднозначность понимания этих требований по сравнению с ранее действующей редакцией ТР ТС 031/2012.

Замена традиционного топлива на газовое топливо теоретически обеспечивает снижение эмиссии вредных веществ с отработавшими газами двигателей.

Замена дизельного топлива на природный газ (метан) позволяет, теоретически, снизить на 15% эмиссию диоксида углерода, который считают одним из газов, ответственным за создание парникового эффекта. Снижение эмиссии диоксида углерода может повысить конкурентоспособность сельскохозяйственной продукции при ее экспорте за рубеж в связи с возможным введением (в перспективе) трансграничного углеродного налога.

С целью обеспечения продовольственной безопасности страны в условиях санкций со стороны зарубежных

стран, целесообразно отменить введение в действие с 01.09.2023 экологических норм уровня Stage IIIA для сельскохозяйственных тракторов, что прописано в ТР ТС 031/2012.

С учетом реального уровня загрязнения окружающей среды работающей в РФ сельскохозяйственной техники целесообразно заменить в ТР ТС 031/2012 методику оценки выброса вредных веществ с отработавшими газами в окружающую среду согласно Правилам ООН №96 (02) на методику согласно ГОСТ 17.2.2.05-97.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Конфликт интересов.** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Исследование было осуществлено за счет собственных средств.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Competing interests.** The author declares no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** The study was conducted at the author's own expense.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Совет Евразийской экономической комиссии. О внесении изменений в технический регламент Таможенного союза «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» (ТР ТС 031/2012). Решение от 29 октября 2021 г. № 127. Москва: ЕЭК, 2021.
2. Совет Евразийской экономической комиссии. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» (ТР ТС 031/2012). Решение от 20 июля 2012 г. № 60. Москва: ЕЭК, 2012.
3. Совет Евразийской экономической комиссии. О внесении изменений в технический регламент Таможенного союза «О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» (ТР ТС 031/2012). Решение от 15 апреля 2022 г. № 127. Москва: ЕЭК, 2022.
4. The United Nations Economic Commission for Europe. Regulation No. 24. E/ECE/TRANS/505-Rev.1/Add.23/Rev.2/Amend.1/Amend.2/Amend.3. 5 April 2007.
5. ГОСТ 17.2.2.02-98 98 Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. Минск: МССМС, 1997.
6. The United Nations Economic Commission for Europe. Regulation No. 96. E/ECE/TRANS/505-Rev.1/Add.95/Rev.1. / 2 November 2006.
7. The United Nations Economic Commission for Europe. Regulation No. 96. E/ECE/TRANS/505-Rev.1/Add.95/Rev.1. Amend.1 / 8 April 2008.
8. Совет Евразийской экономической комиссии. О внесении изменений в технический регламент Таможенного союза

«О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним» (ТР ТС 031/2012). Решение от 30 ноября 2016 г. № 126. Москва: ЕЭК, 2016.

9. Бурак П.И., Голубев И.Г., Федоренко В.Ф., и др. Состояние и перспективы обновления парка сельскохозяйственной техники. Научный аналитический обзор. Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2019.

10. ГОСТ 17.2.2.05-96 Нормы и методы определения выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. Минск: МССМС, 1997.

11. ГОСТ 17.2.2.02-97 Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. Минск: МССМС, 1997.

12. trends.rbc.ru [интернет]. Пограничный углеродный налог ЕС: сколько заплатит Россия [дата обращения 20.08.2022]. Доступ по ссылке: <https://trends.rbc.ru/trends/green/60e2cbb79a79471e5f514818https>

13. news.mail.ru [интернет]. Европа признала газ и атом чистой энергией [дата обращения 20.08.2022]. Доступ по ссылке: <https://news.mail.ru/economics/49522620/?frommail=1>

14. Совет Евразийской экономической комиссии. О внесении изменений в Решение Комиссии Таможенного союза от 9 декабря 2011 г. N 877. Решение от 05 апреля 2022 г. № 45. Москва: ЕЭК, 2022.

15. zr-ru.turbopages.org [интернет]. Отход от Евро-5 вызван нехваткой компонентов для производства современных двигателей [дата обращения 20.08.2022]. Доступ по ссылке: <https://zr-ru.turbopages.org/zr.ru/s/content/news/933947-kamaz-vozvrashchaetsya-k-evro-2/>

16. kommersant.ru [интернет]. У машин обнуляется экология [дата обращения 20.08.2022]. Доступ по ссылке: <https://www.kommersant.ru/doc/5316400>

17. news.mail.ru [интернет]. В РФ задумались над выпуском деталей для иностранных лайнеров [дата обращения 20.08.2022]. Доступ по ссылке: <https://news.mail.ru/economics/50941028/?frommail=1>

18. infobio.ru [интернет]. Российские пеллеты и брикеты лишились европейской сертификации [дата обращения 20.08.2022]. Доступ по ссылке: <https://www.infobio.ru/analytics/5230.html>

## REFERENCES

1. Sovet Evraziiskoi ekonomicheskoi komissii. *O vnesenii izmenenii v tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti sel'skokhozyaistvennykh i lesokhozyaistvennykh traktorov i pritsepov k nim» (TR TS 031/2012)*. Decision from Oct 29, 2021. № 127. Moscow: EEK; 2021. (In Russ).

2. Sovet Evraziiskoi ekonomicheskoi komissii. *Tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti sel'skokhozyaistvennykh i lesokhozyaistvennykh traktorov i pritsepov k nim» (TR TS 031/2012)*. Decision from Jul 20, 2012. № 60. Moscow: EEK; 2012. (In Russ).

3. Sovet Evraziiskoi ekonomicheskoi komissii. *O vnesenii izmenenii v tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti sel'skokhozyaistvennykh i lesokhozyaistvennykh traktorov i pritsepov k nim» (TR TS 031/2012)*. Decision from Apr 15, 2022. № 127. Moscow: EEK; 2022. (In Russ).

4. The United Nations Economic Commission for Europe. *Regulation No. 24. E/ECE/TRANS/505-Rev.1/Add.23/Rev.2/Amend.1/Amend.2/Amend.3*. 5 April 2007.

5. GOST 17.2.2.02-98 98 *Normy i metody opredeleniya dymnosti otrabotavshikh gazov dizelei, traktorov i samokhodnykh sel'skokhozyaistvennykh mashin*. Minsk: MSSMS; 1997. (In Russ).

6. The United Nations Economic Commission for Europe. *Regulation No. 96. E/ECE/TRANS/505-Rev.1/Add.95/Rev.1. / 2 November 2006*.

7. The United Nations Economic Commission for Europe. *Regulation No. 96. E/ECE/TRANS/505-Rev.1/Add.95/Rev.1. Amend.1 / 8 April 2008*.

8. Sovet Evraziiskoi ekonomicheskoi komissii. *O vnesenii izmenenii v tekhnicheskii reglament Tamozhennogo soyuza «O bezopasnosti sel'skokhozyaistvennykh i lesokhozyaistvennykh traktorov i pritsepov k nim» (TR TS 031/2012)*. Decision from Nov 30, 2016. № 126. Moscow: EEK; 2016. (In Russ).

9. Burak PI, Golubev IG, Fedorenko VF, et al. *The state and prospects of updating the fleet of agricultural machinery*. Moscow: Russian Research Institute of Information and Technical and

Economic Studies on Engineering and Technical Provision of Agro-Industrial Complex; 2019. (In Russ).

10. GOST 17.2.2.05-96 *Normy i metody opredeleniya vybrosov vrednykh veshchestv s otrabotavshimi gazami dizelei, traktorov i samokhodnykh sel'skokhozyaistvennykh mashin*. Minsk: MSSMS; 1997.

11. GOST 17.2.2.02-97 *Normy i metody opredeleniya dymnosti otrabotavshikh gazov dizelei, traktorov i samokhodnykh sel'skokhozyaistvennykh mashin*. Minsk: MSSMS; 1997.

12. trends.rbc.ru [Internet]. Pogranichnyi uglerodnyi nalog ES: skol'ko zaplatit Rossiya [cited 20.08.2022]. Available from: <https://trends.rbc.ru/trends/green/60e2cbb79a79471e5f514818http> ps (In Russ).

13. news.mail.ru [Internet]. Evropa priznala gaz i atom chistoi energiei [cited 20.08.2022]. Available from: <https://news.mail.ru/economics/49522620/?frommail=1> (In Russ).

14. Sovet Evraziiskoi ekonomicheskoi komissii. *O vnesenii izmenenii v Reshenie Komissii Tamozhennogo soyuza ot 9 dekabrya 2011 g. N 877*. Decision from Apr 05, 2022. № 45. Moscow: EEK; 2022. (In Russ).

15. zr-ru.turbopages.org [Internet]. Otkhod ot Evro-5 vyzvan nekhvatkoi komponentov dlya proizvodstva so-vremennykh dvigatelei [cited 20.08.2022]. Available from: <https://zr-ru.turbopages.org/zr.ru/s/content/news/933947-kamaz-vozvrashchaetsya-k-evro-2/> (In Russ).

16. kommersant.ru [Internet]. U mashin obnulyaetsya ekologiya [cited 20.08.2022]. Available from: <https://www.kommersant.ru/doc/5316400> (In Russ).

17. news.mail.ru [Internet]. V RF zadumalis' nad vypuskom detalei dlya inostrannykh lainerov [cited 20.08.2022]. Available from: <https://news.mail.ru/economics/50941028/?frommail=1> (In Russ).

18. infobio.ru [Internet]. Rossiiskie pellety i brikety lishilis' evropeiskoi sertifikatsii [cited 20.08.2022]. Available from: <https://www.infobio.ru/analytics/5230.html> (In Russ).

## ОБ АВТОРЕ

**Кульчицкий Алексей Рэмович**, д.т.н.,  
специалист по сертификации конструкторского подразделения;  
адрес: Россия, 601301, Владимирская область,  
Камешковский р-н, г. Камешково, ул. Дорожная, 14;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9609-0829>;  
eLibrary SPIN: 6807-8316;  
E-mail: [ark6975@mail.ru](mailto:ark6975@mail.ru)

## AUTHOR'S INFO

**Alexey R. Kulchitskiy**, Dr. Sci. (Engin.),  
Certification Specialist of the Design Department;  
address: 14 Dorozhnaya street, Kameshkov, Vladimir Oblast,  
601301, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9609-0829>;  
eLibrary SPIN: 6807-8316;  
E-mail: [ark6975@mail.ru](mailto:ark6975@mail.ru)

УДК 621.43+629.3.05+004.9

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106169>

Оригинальное исследование

# Оценка возможности применения искусственных нейронных сетей для самодиагностики двигателя внутреннего сгорания с отключением цилиндров

А.В. Химченко, Н.И. Мищенко, О.В. Савчук

Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», Горловка, ДНР, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Системы управления двигателями и автомобилями должны иметь средства объективного контроля в виде самодиагностики. В особенности это актуально для новых конструкций и технологий управления бензиновым двигателем внутреннего сгорания, таких как отключение цилиндров на режиме частичной нагрузки. В работе дана оценка возможности самодиагностики отключения цилиндров в автомобильном бесшатунном двигателе с кривошипно-кулисным механизмом с помощью искусственных нейронных сетей.

**Целью** являлось определение возможности создания искусственной нейронной сети, распознающей по характеру изменения сигналов с датчиков, установленных на опорах двигателя: какие цилиндры в данный момент находятся в работе, а какие отключены независимо от частоты вращения коленчатого вала.

**Методы.** В исследовании рассматривались искусственные нейронные сети топологии LSTM и BiLSTM. Для получения сигналов датчиков использовалась имитационная модель двигателя, выполненная в Simulink. Проведенные численные эксперименты позволили получить данные, имитирующие показания датчиков, и обучить искусственные нейронные сети для определения номеров и количества отключенных цилиндров. Численные эксперименты проводились на основе полнофакторного планирования. Для обучения и тестирования искусственных нейронных сетей использовались различные планы, что позволило тестировать сеть на данных, существенно отличающихся от данных обучения. Тестирование проходило на большом количестве случайных последовательностей режимов отключения цилиндров.

**Результаты.** Полученные результаты показывают высокую степень распознавания номеров отключенных цилиндров уже за несколько десятков градусов поворота коленчатого вала при переходе на соответствующий режим. Для сети LSTM точность определения режима составила выше 99% как в режиме передачи последовательности данных, так и в потоковом режиме. Топология BiLSTM показала точность при определении режима в виде последовательности выше 99,9%, но при потоковой передаче данных она существенно снижалась.

**Заключение.** Применение рассмотренных типов сетей перспективно в системах управления двигателями и автомобилями.

**Ключевые слова:** искусственные нейронные сети; самодиагностика; двигатель внутреннего сгорания; кривошипно-кулисный механизм; отключение цилиндров.

## Для цитирования:

Химченко А.В., Мищенко Н.И., Савчук О.В. Оценка возможности применения искусственных нейронных сетей для самодиагностики двигателя внутреннего сгорания с отключением цилиндров // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 3. С. 175–186. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106169>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106169>

Original study article

# Evaluation of the possibility of using artificial neural networks for self-diagnosis of an internal combustion engine with cylinder deactivation

Arkady V. Khimchenko, Nicolay I. Mishchenko, Oleg V. Savchuk

Automobile and Road Institute of the Donetsk National Technical University, Gorlovka, DPR, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Engine and vehicle control systems must have means of objective control in the form of self-diagnosis. This is especially true for new designs and technologies for controlling a gasoline internal combustion engine, such as deactivating cylinders in partial load mode. The paper gives an assessment of the possibility of self-diagnosis of cylinder shutdown in an automobile crank-guide engine without connecting rods using artificial neural networks.

**AIMS:** Determination of the possibility of creating an artificial neural network that recognizes which cylinders are currently in operation and which are disabled, based on the nature of the change in the signals from the sensors installed on the engine mounts and independent on the crankshaft speed.

**METHODS:** The study considered artificial neural networks of the LSTM and BiLSTM topology. An engine simulation model made in Simulink was used in order to obtain sensor signals. The conducted numerical experiments made it possible to obtain data, which simulates the sensors readings, and to train artificial neural networks to determine the order numbers and quantity of deactivated cylinders. Numerical experiments were carried out on the basis of full-factorial design. Various designs of experiments were used for training and testing of artificial neural networks, which made it possible to test the network on data that differed from the training data significantly. Testing took place on a large number of random sequences of cylinder deactivation modes.

**RESULTS:** The obtained results show a high degree of recognition of the order numbers of deactivated cylinders just after several tens of degrees of the crankshaft rotation while switching to the corresponding mode. For the LSTM network, mode detection accuracy was above 99% in both the data sequence transfer mode and the data streaming mode. Accuracy of the BiLSTM topology was over 99.9% in the data sequence transfer mode, but significantly decreased in the data streaming mode.

**CONCLUSIONS:** The use of considered types of networks in engine and car control systems is promising.

**Keywords:** *artificial neural networks; self-diagnostics; internal combustion engine; crank-guide mechanism; cylinder deactivation.*

## Cite as:

Khimchenko AV, Mishchenko NI, Savchuk OV. Evaluation of the possibility of using artificial neural networks for self-diagnosis of an internal combustion engine with cylinder deactivation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):175–186. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106169>

Received: 11.04.2022

Accepted: 05.06.2022

Published: 15.07.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Энергетический кризис в Евросоюзе и Соединенных Штатах Америки в 2021–2022 годах показал, что в ближайшее время двигатели внутреннего сгорания (ДВС) продолжат занимать свою нишу в числе силовых агрегатов на автомобильном транспорте. Более того, в связи с недостаточным количеством тяжелой нефти в ряде стран большую долю рынка будут продолжать занимать бензиновые автомобильные двигатели. По крайней мере, для легковых автомобилей они имеют преимущества, так как позволяют получить соответствие автомобиля ужесточающимся нормам в отношении токсичности отработавших газов.

Как известно, одним из перспективных путей повышения топливной экономичности и снижения токсичности отработавших газов является регулирование степени сжатия [1] и отключение части цилиндров [2–4], в том числе, путем остановки поршней [3]. Эти способы хорошо реализуются в двигателе с кривошипно-кулисным механизмом (ККМ) [5].

Технология отключения цилиндров в автомобильном бензиновом двигателе с ККМ, предлагаемая в Автомобильно-дорожном институте ДОННТУ, отличается от существующих тем, что позволяет останавливать поршни при вращающемся коленчатом вале в любом количестве и с любым заданным алгоритмом отключения цилиндров.

При работе любой системы управления необходимо иметь объективный независимый контроль выполнения подаваемых команд. В частности, при отключении цилиндров необходимо иметь точную информацию о том, что тот или иной цилиндр действительно отключен и остановлен. Особенно, если процесс отключения не может произойти мгновенно, а требует определенных затрат времени [6]. Информацию можно получать по показаниям отдельных внешних датчиков или их совокупности. В случае, если команда на отключение не поступала, а оно произошло, такую работу нельзя считать удовлетворительной. Необходима диагностическая система, которая будет выявлять подобные режимы работы. Они могут быть как штатными, так и являться неисправностью.

Современное развитие искусственных нейронных сетей [7], в особенности опыт применения их в вопросах классификации [8], позволяет предположить, что именно этот математический метод позволяет реализовать функцию самодиагностики в ДВС. Естественно, применение не ограничивается только системами управления двигателями, а может быть расширено для оценки работы других узлов и агрегатов автомобилей [9, 10].

На практике система самодиагностирования двигателя или автомобиля может представлять собой набор нейронных сетей, каждая из которых отвечает за выполнение определенных функций [11–14]. Центральная

диагностическая нейронная сеть, обрабатывая информацию с отдельно взятых сетей, обобщает и принимает общее решение. Очевидно, в такой ситуации необходимо создание искусственных нейронных сетей, которые могут диагностировать отдельные проблемы в работе двигателя или определять его режимы работы.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

При работе двигателя в случае отключения одного или нескольких цилиндров изменяется воздействие двигателя на кузов автомобиля [15]. Информацию об этом воздействии можно получить с помощью датчиков силы или датчиков ускорения, установленных на опорах двигателя. Естественно, на величину усилий будет влиять не только инерционная составляющая, но и нагрузочный режим работы двигателя.

Имеющиеся в наличии на данный момент времени у авторов отлаженные имитационные модели [16] позволяют получать значения сил, действующих в шарнирах крепления двигателя.

Как показали исследования, характер изменения сил существенно зависит от того, какие из цилиндров на данный момент отключены, а следовательно, с высокой вероятностью они могут быть распознаны искусственной нейронной сетью. В данном исследовании мы ограничились только оценкой изменения силы инерции при отключении цилиндров и ее воздействия на опоры двигателя.

При разных частотах вращения коленчатого вала воздействие на опоры двигателя будет различным.

В этом случае *целью работы* является определение возможности создания искусственной нейронной сети, распознающей по характеру изменения сигналов с датчиков, установленных на опорах двигателя, какие цилиндры в данный момент находятся в работе, а какие отключены независимо от частоты вращения коленчатого вала.

Для реализации поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- выбрать тип искусственной нейронной сети;
- получить данные для обучения и тестирования нейронной сети;
- создать и обучить диагностическую нейронную сеть;
- оценить точность определения работающих цилиндров в различных условиях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выбор сети, учитывая требования к ней, был практически очевиден. Искусственная нейронная сеть должна распознавать характерные особенности сигнала как некоторых данных, поступающих в определенной последовательности. Кроме того, желательно, чтобы нейронная сеть могла обрабатывать данные в потоке,

непосредственно поступающие с датчиков в системе самодиагностики. Очевидно, что это должна быть рекуррентная нейронная сеть.

Простейшие рекуррентные нейронные сети прямого распространения были отброшены как недостаточно точные. На сегодняшний день хорошо известны искусственные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью LSTM. Они прекрасно себя показали в классификации последовательностей данных, например, в распознавании речи. Поэтому выбор был остановлен именно на этом типе сети.

В некоторой степени выбор стоял между однонаправленной или двунаправленной архитектурой. Хотя желание получать информацию для системы диагностики в потоке данных и ставит под сомнение применение iLSTM, окончательный ответ на этот вопрос может дать только эксперимент с двумя типами искусственных нейронных сетей.

Отдельно стоит вопрос о количестве нейронов и (или) скрытых слоев (модулей LSTM). Не без оснований считается, что ответ на данный вопрос может дать только экспериментальный подбор параметров нейронной сети. Однако, как показывает опыт применения сетей прямого распространения [17], связь между задачей, ожидаемым результатом и размером сети имеется. Логические рассуждения при понимании функций определенных блоков или нейронов позволяют, по крайней мере, оценить границы будущего выбора или экспериментов с параметрами искусственной нейронной сети. Так, в сети LSTM каждый скрытый модуль имеет свою память, а их количество определяет глубину сигнала, который может храниться.

Так как на установленном режиме картина изменения сигнала с датчиков должна меняться с периодом в 2 оборота ( $720^\circ$  п.к.в.), то количество нейронов определяется частотой подачи сигнала на сеть. В условиях проведения исследования при отсутствии процессов сгорания и газообмена в двигателе период сигналов датчиков составляет один оборот коленчатого вала. Таким образом, для качественного определения режима отключения цилиндров при регистрации сигналов через  $2^\circ$  п.к.в. может быть достаточно 180 скрытых модулей, а количество нейронов в слое определяется количеством сигналов на входе.

#### ***Получение и подготовка данных для обучения диагностирующей сети***

Создание и обучение искусственной нейронной сети, подготовка данных и их обработка проводились с использованием программных продуктов компании Mathworks: Matlab и Simulink. В этой статье мы опустим вопросы, связанные с применением технологии в данных программных продуктах, за исключением тех, которые требуются для пояснения особенностей полученного результата.

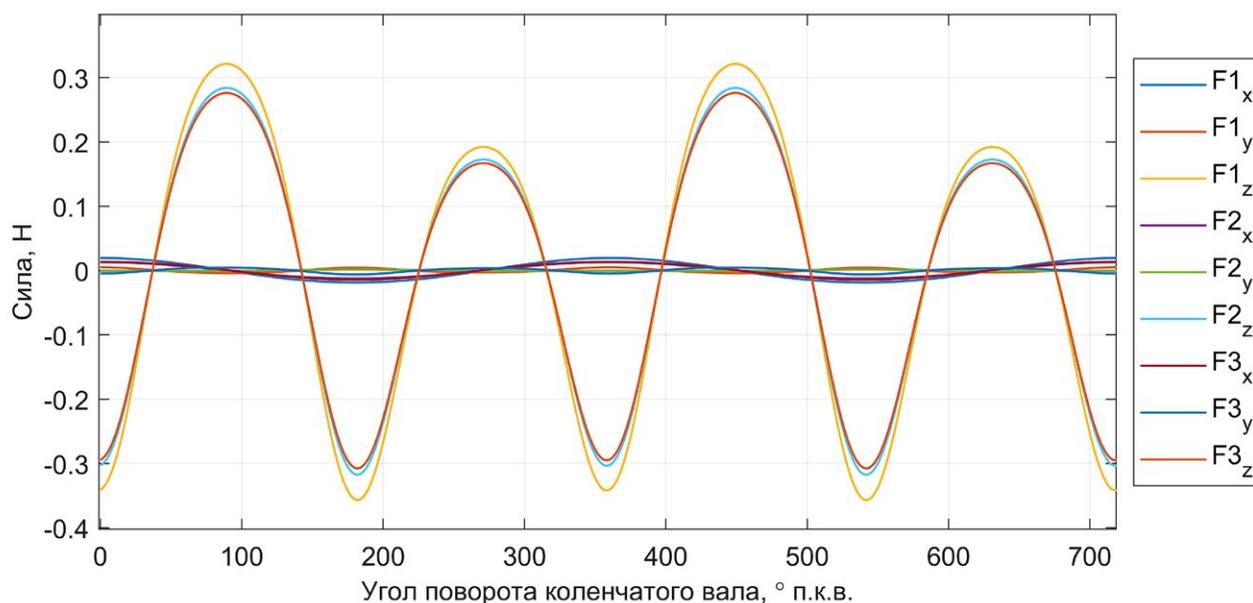
Исследуемый двигатель с кривошипно-кулисным механизмом имеет три точки крепления. На имитационной модели в Simulink были предусмотрены датчики, снимающие показания силы, действующей на кузов автомобиля, в местах крепления двигателя. Таким образом, имеется возможность регистрировать на каждом датчике три сигнала по соответствующим осям. Общее количество регистрируемых сигналов – 9. Для будущей нейронной сети это 9 входов, по которым она должна определять режим работы. Имитационная модель предусматривала возможность изменять частоту вращения коленчатого вала и отключать каждый цилиндр при необходимости.

При вращении коленчатых валов и возвратно-поступательном движении кривошипно-кулисного механизма с поршнями на опоры двигателя будут передаваться силы инерции. Очевидно, что амплитуда сил будет зависеть от частоты вращения коленчатого вала. Форму сигнала будет определять количество остановленных поршней и номера отключенных цилиндров. Это связано с тем, что форма сигнала зависит от того, какой конкретно цилиндр отключен в данный момент времени: первый, второй или, например, четвертый. Данные выводы были сделаны при предварительных исследованиях [15] на неравновешенном образце экспериментального двигателя. После проведения уравнивания на этапе моделирования с использованием предлагаемой в работе [18] методики суммарные силы при работе всех цилиндров 4-цилиндрового двигателя с кривошипно-кулисным механизмом становятся ничтожно малы даже на жестких опорах. Это хорошо видно на рис. 1. В двигателе с кривошипно-кулисным механизмом такая же картина будет наблюдаться при любом количестве цилиндров, так как теоретически этот двигатель может быть полностью уравновешен даже в одноцилиндровом варианте.

Изменение формы сигнала при отключении одного или нескольких цилиндров связано с появлением неравновешенности двигателя из-за остановки части поступательно движущихся масс. Этот эффект также легко определяется визуально на графиках, показанных на рис. 2. Необходимо, чтобы этот эффект увидела и искусственная нейронная сеть.

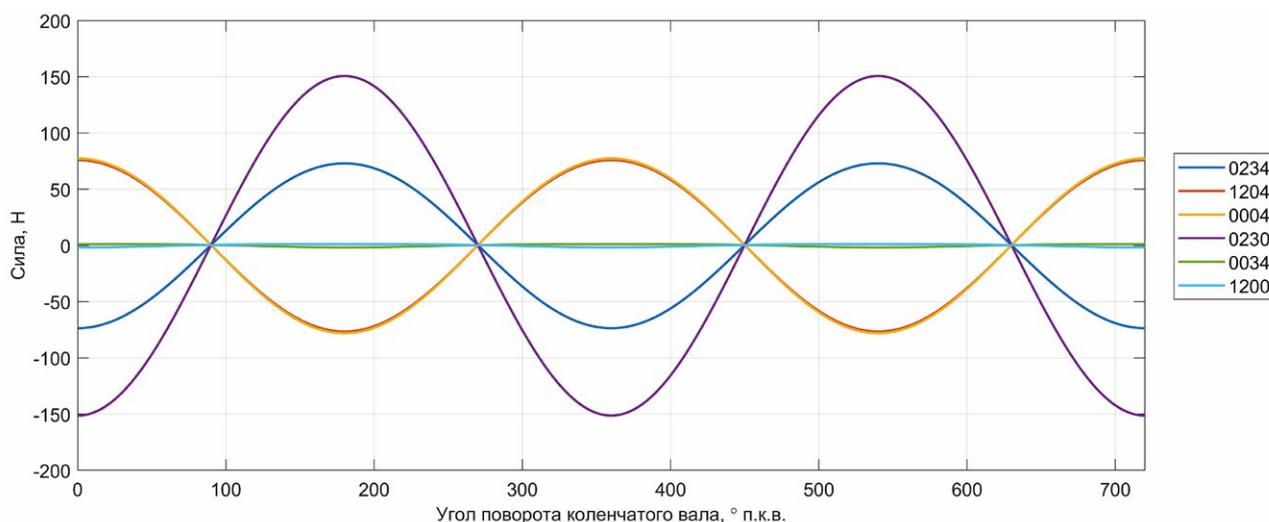
Приведенные выше графики были получены в результате подготовки данных для обучения искусственной нейронной сети. Для этого был проведен численный модельный эксперимент в соответствии с разработанным планом полного факторного эксперимента. На рис. 2 в легенде указаны номера отключенных цилиндров. Если цилиндр не отключен, на месте его номера стоит цифра 0.

При планировании экспериментов в качестве факторов были приняты 5 независимых переменных: частота вращения коленчатого вала и 4 категориальные переменные – это состояния включения цилиндров в работу. Для каждого из цилиндров в имитационную модель подавалось значение фактора «0», соответствующее



**Рис. 1.** Графики сил, действующих на кузов автомобиля в жестких опорах двигателя, при частоте вращения коленчатого вала  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ .

**Fig. 1.** Graphs of forces acting on the vehicle body at rigid engine mounts at crankshaft speed  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ .



**Рис. 2.** Пример изменения графика силы, действующей на кузов автомобиля в одной из опор, при отключении цилиндров и частоте вращения коленчатого вала  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ .

**Fig. 2.** An example of a change in the graph of the force acting on the vehicle body at one of the mounts, when cylinder deactivation is on and the crankshaft speed  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ .

включенному состоянию или «-1» – выключенному. При выключенном цилиндре происходил разрыв кинематической связи поршня и штока с кулисой, а поршневая группа удерживалась в положении, соответствующем нижней мертвой точке. Частота вращения коленчатого вала непрерывна во всей области определения. Интервал изменения в данном эксперименте был принят от 800 до 6000  $\text{мин}^{-1}$ .

Так как целью исследования является получение данных для обучения сети, желательно иметь максимальное заполнение факторного пространства. Учитывая

существенные затраты времени на проведение моделирования и возможные большие объемы информации с регистрационными данными, количество уровней варьирования частоты вращения коленчатого вала было ограничено числом 9. Промежуточные значения были равномерно распределены во всем диапазоне варьирования (рис. 3).

В соответствии с планом был проведен эксперимент. Сигналы, соответствующие силам, передающимся через опоры двигателя, регистрировались в течение 3 оборотов коленчатого вала. Максимальный шаг моделирования был установлен на уровне 2° п.к.в.

После проведения эксперимента для обучения сети сигналы были предварительно обработаны. Обработка данных и обучение нейронных сетей проходили в несколько этапов. При этом выявлялась оптимальная технология, которая позволяет получить возможность быстро определять новый режим при изменении количества работающих цилиндров. Так как LSTM сети обрабатывают последовательности данных, необходимо, чтобы эти последовательности шли с одинаковым временным шагом или в качестве отдельного входа в сеть надо отправлять информацию о времени между шагами данных в сигнале. Для упрощения задачи на этом этапе исследований все сигналы были приведены к одинаковому шагу 2 ° п.к.в., независимо от частоты вращения коленчатого вала. Это позволило получить одинаковое количество точек для каждого сигнала на один оборот. Неравномерные во времени сигналы приведут, естественно, к усложнению задачи. Однако этот вариант в данной работе не рассматривался.

На начальном этапе обучения сигналы были сформированы в пакеты, соответствующие одному опыту. То есть в пакете имелось 9 сигналов с 3-х датчиков по трем осям, каждый длиной 540° п.к.в. Были проведены пробные обучения на необработанных значениях сигналов и на нормированных. Необработанные значения имеют большую разницу в амплитудах при одинаковых работающих цилиндрах и разных частотах вращения коленчатого вала. Нормирование

несколько выравнивало амплитуды. Оно осуществлялось по формуле:

$$h_i = m_\lambda \cdot (m_l - m_a) \quad (1)$$

где  $F_{xyz i}$  – сигналы проекций сил на соответствующую ось для  $i$ -го режима (опыта);  $n_{кв i}$  – частота вращения коленчатого вала на  $i$ -м режиме.

Таким образом, силы приводились к частоте вращения коленчатого вала 1000 мин<sup>-1</sup>.

Обучение на нормированных значениях происходило быстрее, что позволило при меньшем числе нейронов получить максимальную точность. В первичном варианте полученные в 144 опытах сигналы в виде 9 рядов данных рассматривались как отдельные пакеты по 9 рядов, соответствующих 540° п.к.в. В таком случае обучение проходило качественно со 100% распознаванием тестовых данных. Однако при тестировании сети на сигналах, полученных соединением нескольких в один с последовательными переходами, определение работающих цилиндров нельзя было считать успешным. Поэтому в дальнейшем каждый набор сигналов с одинаковой частотой вращения коленчатого вала случайным образом соединялся в последовательный пакет. В процессе обучения пакет переформировывался и последовательность включения и отключения цилиндров менялась случайным образом.

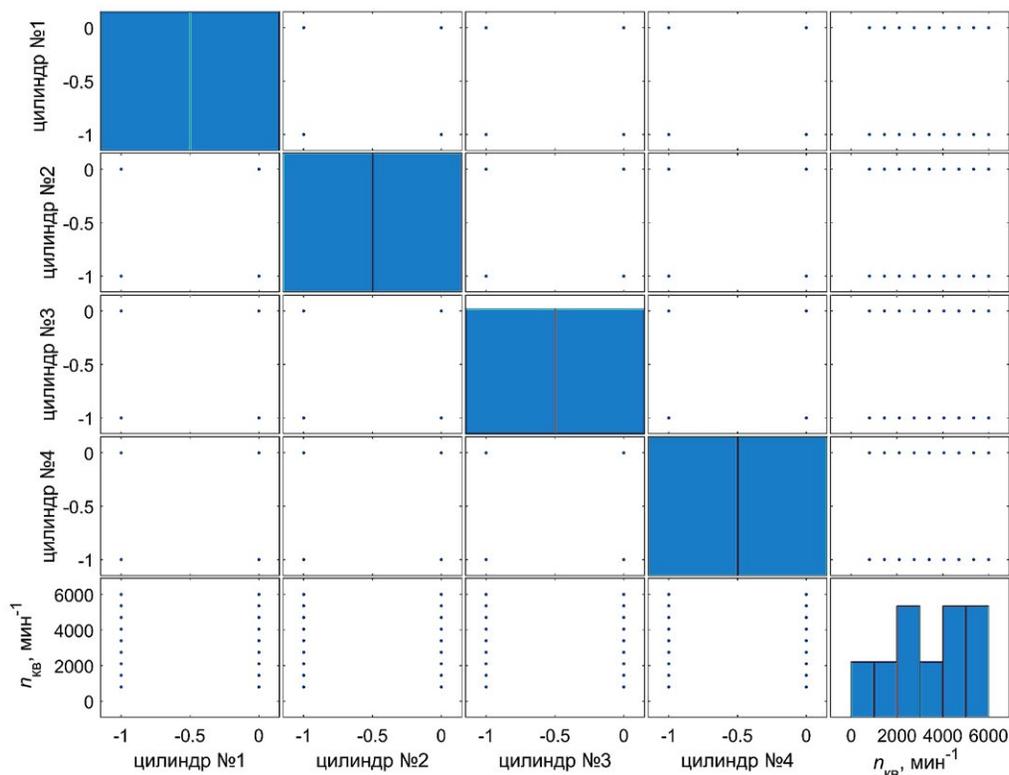


Рис. 3. Диаграмма рассеивания факторов в плане эксперимента.

Fig. 3. Scatterplot of factors distribution in the design of the experiment.

Данные для тестирования были получены аналогичным образом. Эксперименты проводились по 2-м независимым планам, но с меньшим количеством значений частот вращения – по 4 и 5 точек соответственно. Это позволило получить результаты моделирования сигналов датчиков на частотах вращения, не совпадающих с данными обучения.

**Обучение искусственных нейронных сетей и анализ результатов**

Создание искусственной нейронной сети, как и ее обучение, выполнялось с использованием Deep Learning Toolbox, входящего в состав пакета Matlab компании Mathworks. После создания предварительных тестовых сетей и их обучения решено было остановиться на архитектуре сетей со 180-ю и 360-ю скрытыми модулями LSTM (рис. 4).

Обучение происходило поэтапно. При достижении достаточно высокого результата, более 95%, обучение останавливалось. После повторной переподготовки пакетов обучение продолжалось с новым случайным порядком следования режимов отключения цилиндров. Такая технология позволила избежать переобучение сети и исключить из памяти порядок следования сигналов. В итоге удалось добиться точности, близкой к 100%.

При подготовке тестовых данных в первом плане эксперимента присутствовали 2 частоты вращения, при которых проводилось обучение. Это минимальное значение 800 мин<sup>-1</sup> и максимальное 6000 мин<sup>-1</sup>. Длина сигнала при регистрации была сокращена до 2 оборотов коленчатого вала.

Определение количества и номеров работающих цилиндров осуществлялось в двух режимах работы сети:

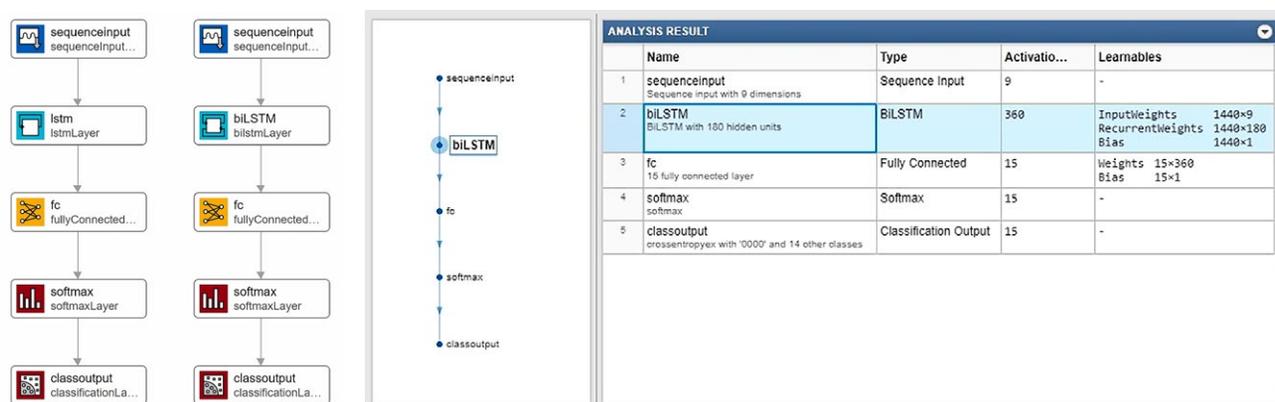


Рис. 4. Архитектура сравниваемых сетей.  
Fig. 4. Architecture of compared networks.

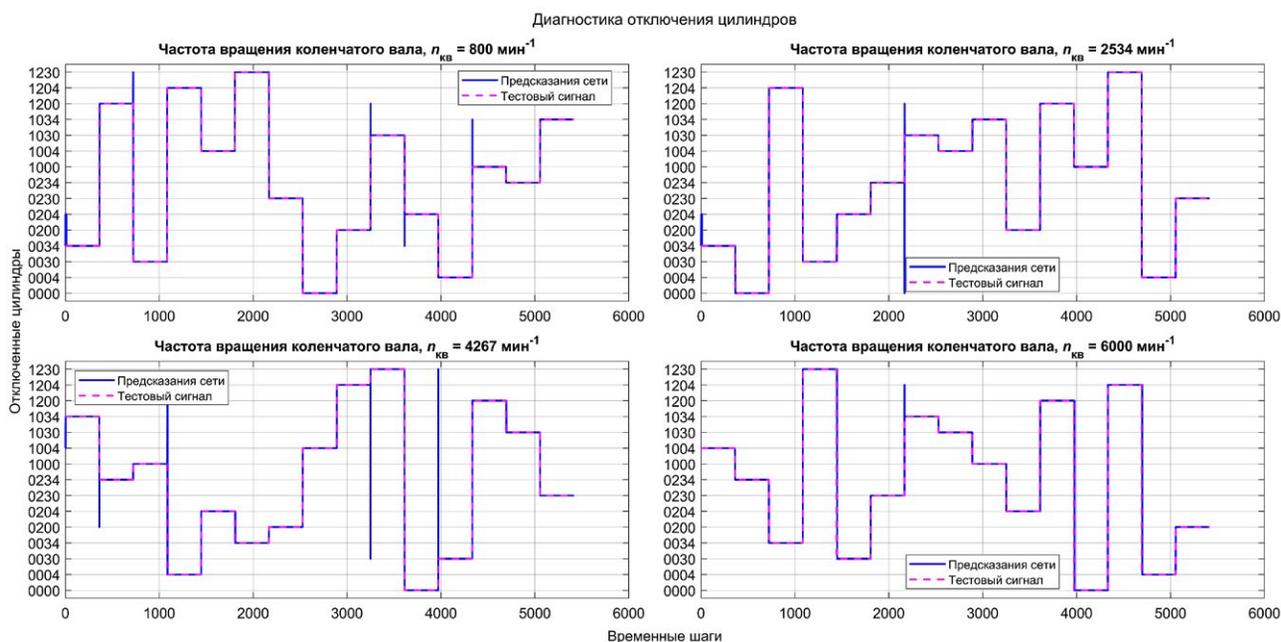
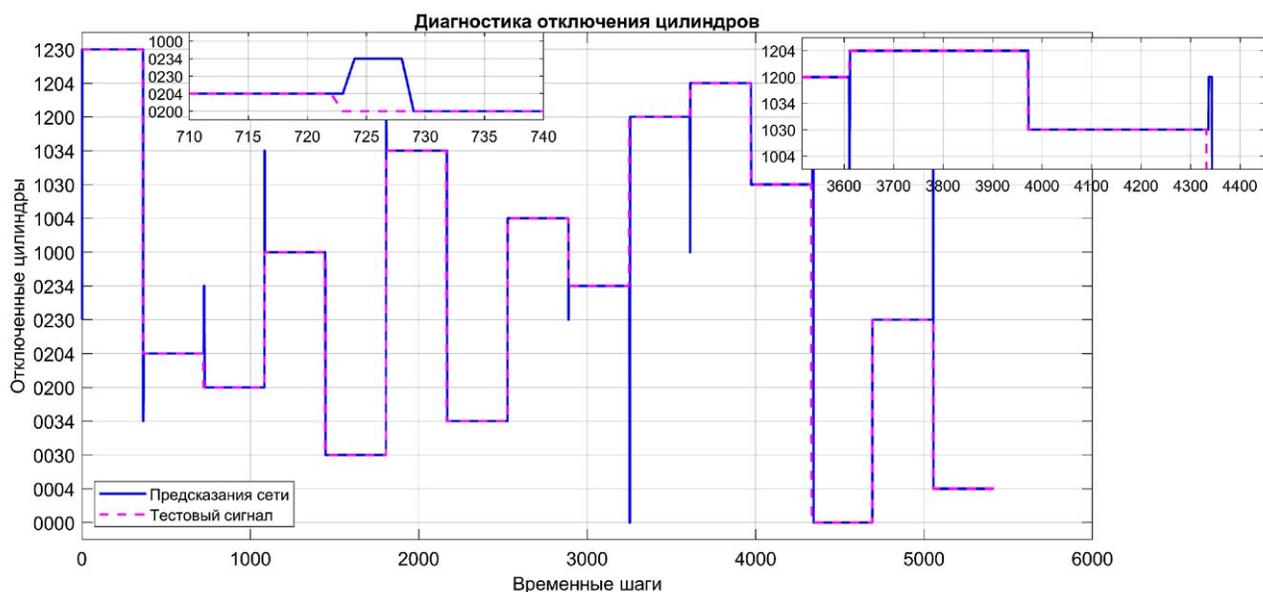
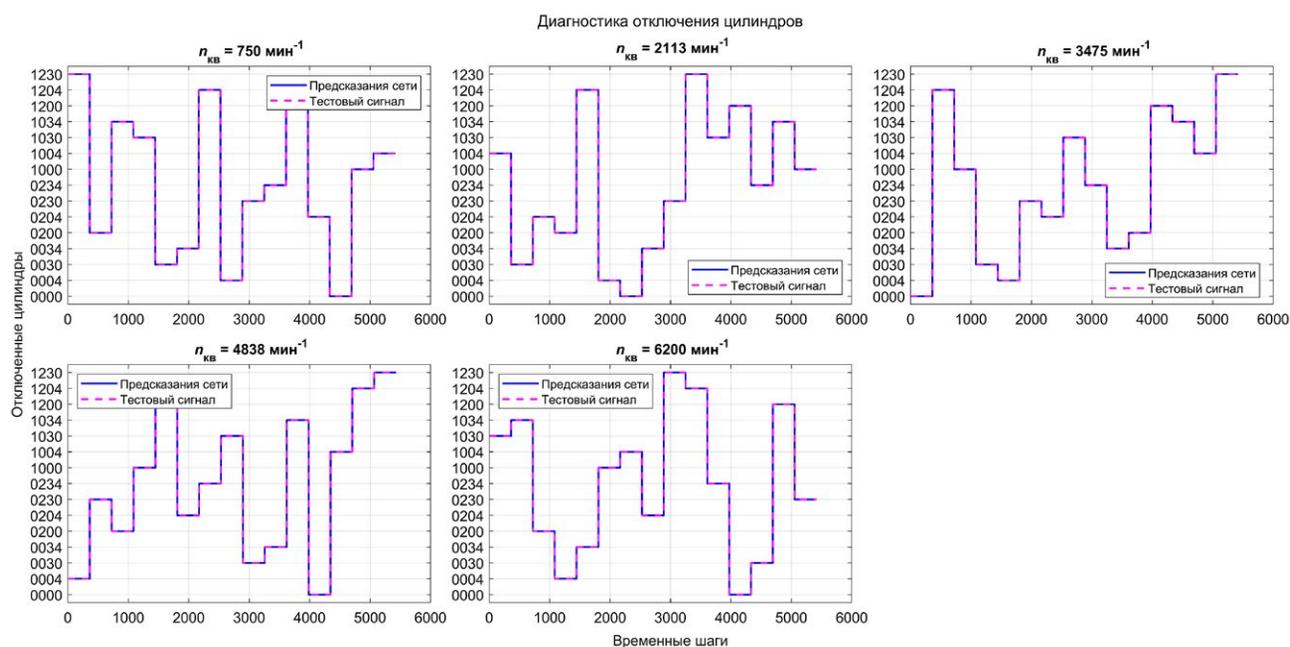


Рис. 5. Тестовая диагностика отключения цилиндров при разных частотах вращения коленчатого вала при оценке сигнала LSTM сетью.  
Fig. 5. Test diagnostics of cylinder deactivation at different crankshaft speeds while evaluating the signal by the LSTM network.



**Рис. 6.** Пример ошибок при диагностике отключения цилиндров.

**Fig. 6.** Example of errors appearing during diagnostics of cylinder deactivation.



**Рис. 7.** Тестовая диагностика отключения цилиндров при разных частотах вращения коленчатого вала при оценке BiLSTM сетью сигнала в виде последовательности.

**Fig. 7.** Test diagnostics of cylinder deactivation at different crankshaft speeds while evaluating the signal, given as a sequence, by the BiLSTM network.

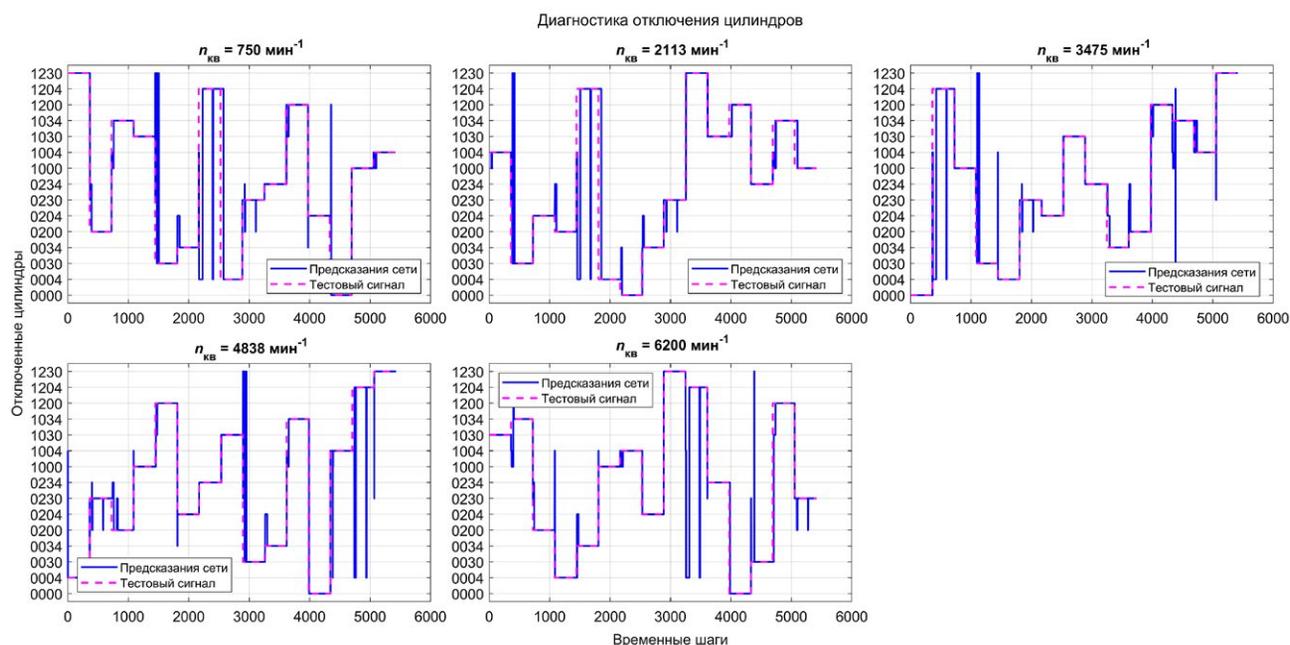
передачей сети полной последовательности данных и последовательной (поточковой) передачей каждой отдельной точки с обновлением состояния сети.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для топологии LSTM точность была выше 99% во всех случаях, а при передаче последовательностей различными способами на одних и тех же данных сеть LSTM

показывала одинаковый результат. Как видно на из графиков на рис. 5, количество ошибок примерно одинаковое как при частотах вращения, на которых искусственная нейронная сеть проходила обучение, так и на тех, которые видела впервые. Очевидно, ошибки появляются только в момент изменения количества работающих цилиндров.

На рис. 6 представлены графики, соответствующие скоростному режиму с наихудшими результатами



**Рис. 8.** Тестовая диагностика отключения цилиндров при разных частотах вращения коленчатого вала при потоковой оценке сигнала BiLSTM сетью.

**Fig. 8.** Test diagnostics of cylinder deactivation at different crankshaft speeds while streaming evaluation of the signal by the BiLSTM network.

распознавания. Видно, что критичными являются первые не более 10 точек, то есть 20° п.к.в. Очевидно, данных просто недостаточно для определения характера сигнала. Такое положение можно считать вполне приемлемым и, на наш взгляд, отнести к достаточно высокой точности распознавания перехода на следующий режим.

Полученные дополнительные тестовые данные при расширенном диапазоне частот вращения от 750 до 6200 мин<sup>-1</sup> показали ту же точность распознавания на всех режимах.

Несколько другие результаты были получены при использовании архитектуры BiLSTM. Точность обучения сети составила 100%. На тех же тестовых данных она показала фактически 100% распознавание в режиме передачи сети последовательности, то есть всей длины сигналов датчиков (рис. 7). В различных случаях ошибка не превышала 0,05%.

С другой стороны, данную сеть нельзя считать переученной, так как случайные изменения режимов отключения цилиндров, их последовательностей и частот вращения не приводили к ухудшению точности распознавания. Впрочем, этот результат был ожидаемым. Архитектура BiLSTM позволяет оценивать предыдущие данные на основе последующих. Это привело к проблемам в распознавании режимов в случае последовательной передачи данных сети (рис. 8). Оценка режима работы на основе потоковой передачи данных, как видно из графиков, имеет гораздо меньшую точность распознавания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показали, что технология глубокого обучения позволяет обучать искусственные нейронные сети для распознавания режимов работы двигателя на основе данных различных датчиков. Это может быть использовано в системах управления автомобилями и двигателями внутреннего сгорания и представлять собой часть системы самодиагностики.

Точность определения режима работы двигателя может быть достаточно высокой. В зависимости от применяемой сети и способов передачи данных погрешность определения составляет от сотых до десятых долей процента. В случае двунаправленной искусственной нейронной сети долгой краткосрочной памяти (BiLSTM) высокая точность 99,9% обеспечивается при передаче всей последовательности. Сетью LSTM с точностью более 99% определяются номера отключенных цилиндров как в режиме передачи последовательности данных, так и в режиме потоковой передачи. Для применения в автомобильных системах управления искусственные нейронные сети с архитектурой LSTM кажутся более предпочтительными, так как позволяют не хранить в памяти набор данных для распознавания режима.

Полученные результаты показывают перспективу широкого применения искусственных нейронных сетей в системах управления двигателями и автомобилями в качестве инструмента контроля и самодиагностики. В перспективе они могут заменить и существующие

системы, которые не в состоянии определить некоторые неисправности, например, связанные с временными изменениями характеристик датчиков в процессе эксплуатации.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

**Вклад распределен следующим образом:** *А.В. Химченко* – обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, создание моделей и обучение нейронных сетей, написание текста статьи; *Н.И. Мищенко* – обзор литературы, анализ литературных источников, анализ результатов, подготовка и редактирование статьи; *О.В. Савчук* – подготовка модели, проведение численного эксперимента, написание текста статьи.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мищенко Н.И., Химченко А.В., Крамарь С.Н., Супрун В.Л. Влияние силового механизма на работу двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой при регулировании степени сжатия // Двигатели внутреннего сгорания. 2004. № 1. С. 56–60.
2. Ying L., Kuznetsov A.G. The Effect of Cylinder Deactivation on Engine Performance. Proceedings of the 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)2020. 2020 October 06–09; Vladivostok, Russia. IEEE, 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/fareastcon50210.2020.9271303
3. Мищенко Н.И., Шляхов В.С., Супрун В.Л., и др. Автомобильные двигатели с отключением цилиндров, конструкции, анализ // ВІСНИК СЕВНТУ. 2011. № 122. С. 163–166.
4. Марков В.А., Варченко Ф.Б., Лотфуллин Ш.П. Метод улучшения эксплуатационных показателей автомобильного газового двигателя // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 705. С. 38–44. doi:10.18698/0536-1044-2018-12-38-44
5. Мищенко Н.И., Химченко А.В., Юрченко Ю.В., и др. Новый бесшатунный двигатель для автомобиля // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса; Январь 31, 2019; Москва. МАДИ, 2019. С. 383–396.
6. Химченко А.В., Мищенко Н.И., Дрючин Д.А., и др. Предварительная оценка возможности использования системы смазки серийного двигателя для питания гидропривода механизма остановки поршня // Вести Автомобильно-дорожного института. 2021. № 1. С. 15–26.
7. Ren J., Man Y., Shen W., Dong L. Applications of Artificial Intelligence in Process Systems Engineering. Elsevier, 2021.
8. Chigateri K.B., Suryavamshi S., Rajendra S. System for detecting car models based on machine learning // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 52. P. 1697–1701. doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.335
9. Altun O., Zhang D., Siqueira R., et al. Identification of dynamic loads on structural component with artificial neural networks // Procedia Manufacturing. 2020. Vol. 52. P. 181–186. doi: 10.1016/j.promfg.2020.11.032
10. Ghoniem M., Awad T., Mokhiamar O. Control of a new low-cost semi-active vehicle suspension system using artificial neural networks // Alexandria Engineering Journal. 2020. Vol. 59, N 5. P. 4013–4025. doi: 10.1016/j.aej.2020.07.007
11. Gonera J., Vrublevskiy O., Napiórkowski J. Modelling of floorpan wear in passenger vehicles using artificial neural networks // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 127. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105482
12. Bonfitto A., Feraco S., Tonoli A., Amati N. Combined regression and classification artificial neural networks for sideslip angle estimation and road condition identification // Vehicle System Dynamics. 2019. Vol. 58, N 11. P. 1766–1787. doi: 10.1080/00423114.2019.1645860
13. Velten K., Reinicke R., Friedrich K. Wear volume prediction with artificial neural networks // Tribology International. 2000. Vol. 33, N 10. P. 731–736. doi: 10.1016/s0301-679x(00)00115-8
14. Jones S.P., Jansen R., Fusaro R.L. Preliminary Investigation of Neural Network Techniques to Predict Tribological Properties // Tribology Transactions. 1997. Vol. 40, N 2. P. 312–320. doi: 10.1080/10402009708983660

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** All authors confirm the compliance of their authorship with the international criteria *ICMJE* (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, conduct research and preparation of the article).

**The contribution is distributed as follows:** *A.V. Khimchenko* – a review of literature, collecting and analyzing literary sources, creating models and training neural networks, writing the text of the article; *N.I. Mishchenko* – a review of literature, analysis of literary sources, analysis of results, preparation and editing of an article; *O.V. Savchuk* – preparation of the model, conducting a numerical experiment, writing the text of the article.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

15. Химченко А.В., Мищенко Н.И. Воздействие сил инерции на кузов автомобиля при отключении цилиндров остановкой поршня в экспериментальном двигателе // 9-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сборник докладов Международной научно-технической конференции; Январь 29, 2021; Москва. МАДИ, 2021, С. 442–456.

16. Химченко А.В., Мищенко Н.И., Петров А.И., и др. Модель четырехцилиндрового бесшатунного двигателя для исследования вибрации при отключении цилиндров // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2020»; Май 29, 2020; Горловка. АДИ ГОУ ВПО «ДОННТУ», 2020, С. 72–77.

## REFERENCES

1. Mishchenko NI, Khimchenko AV, Kramar' SN, Suprun VL. Vliyanie silovogo mekhanizma na rabotu dvukhtaktnogo dvigatelya s krivoshipno-kamernoi produvkoi pri regulirovanii stepeni szhatiya. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. 2004;(1):56–60. (In Russ).

2. Ying L, Kuznetsov AG. The Effect of Cylinder Deactivation on Engine Performance. Proceedings of the 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)2020. 2020 October 06–09; Vladivostok, Russia. IEEE; 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/foreastcon50210.2020.9271303

3. Mishchenko NI, Shlyakhov VS, Suprun VL, et al. Avtomobil'nye dvigateli s otklyucheniem tsilindrov, konstruksii, analiz. VISHIK SEVNTU. 2011;(122):163–166. (In Russ).

4. Markov VA, Barchenko FB, Lotfullin SR. Method of Improving Performance of Automobile Gas Engine A Technique for Improving the Performance of a Gas Engine. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2018;(705):38–44. (In Russ). doi: 10.18698/0536-1044-2018-12-38-44

5. Mishchenko NI, Khimchenko AV, Yurchenko YV, et al. Novyi besshatunnyi dvigatel' dlya avtomobilya. Proceedings of the 8th Lukanijskie chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya avtotransportnogo kompleksa; January 31, 2019; Moscow. MADI; 2019, pp. 383–396. (In Russ).

6. Khimchenko AV, Mishchenko NI, Driuchin DA. Possibility preliminary assessment of using the lubrication system of a serial engine to power the hydraulic drive of the piston stopping mechanism. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. 2021;(1):15–26. (In Russ).

7. Ren J, Man Y, Shen W, Dong L. *Applications of Artificial Intelligence in Process Systems Engineering*. Elsevier; 2021.

8. Chigateri KB, Suryavamshi S, Rajendra S. System for detecting car models based on machine learning. *Materials Today: Proceedings*. 2022;52:1697–1701. doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.335

9. Altun O, Zhang D, Siqueira R, et al. Identification of dynamic loads on structural component with artificial neural networks. *Procedia Manufacturing*. 2020;52:181–186. doi: 10.1016/j.promfg.2020.11.032

10. Ghoniem M, Awad T, Mokhiamar O. Control of a new low-cost semi-active vehicle suspension system using artificial neural networks. *Alexandria Engineering Journal*. 2020;59(5):4013–4025. doi: 10.1016/j.aej.2020.07.007

17. Химченко А. В., Мищенко Н. И. Составление ездового цикла автомобиля путем аппроксимации отфильтрованных экспериментальных данных с помощью нейронных сетей // Вести Автомобильно-дорожного института. 2018. № 4. С. 3–13.

18. Химченко А.В., Мищенко Н.И., Пузаков А.В., Петров А.И. Методика уравнивания бесшатунного двигателя на этапе проектирования с использованием имитационного моделирования // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2021»; Май 25, 2021; Горловка. АДИ ГОУ ВПО «ДОННТУ», 2021, С. 89–94.

11. Gonera J, Vrublevskiy O, Napiórkowski J. Modelling of floorpan wear in passenger vehicles using artificial neural networks. *Engineering Failure Analysis*. 2021;127:105482. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105482

12. Bonfitto A, Feraco S, Tonoli A, Amati N. Combined regression and classification artificial neural networks for sideslip angle estimation and road condition identification. *Vehicle System Dynamics*. 2019;58(11):1766–1787. doi: 10.1080/00423114.2019.1645860

13. Velten K, Reinicke R, Friedrich K. Wear volume prediction with artificial neural networks. *Tribology International*. 2000;33(10):731–736. doi: 10.1016/s0301-679x(00)00115-8

14. Jones SP, Jansen R, Fusaro RL. Preliminary Investigation of Neural Network Techniques to Predict Tribological Properties. *Tribology Transactions*. 1997;40(2):312–320. doi: 10.1080/10402009708983660

15. Khimchenko AV, Mishchenko NI. Vozdeistvie sil inertsi na kuzov avtomobilya pri otklyuchenii tsilin-drov ostanovkoi porshnya v eksperimental'nom dvigatele. Proceedings of the 9th Lukanijskie chteniya. Problemy i perspektivy razvitiya avtotransportnogo kompleksa: sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhneskoi konferentsii; January 29, 2021; Moscow. MADI; 2021, pp. 442–456. (In Russ).

16. Khimchenko AV, Mishchenko NI, Petrov AI, et al. Model' chetyrekhtsilindrovogo besshatunnogo dviga-telya dlya issledovaniya vibratsii pri otklyuchenii tsilindrov. Proceedings of the 6th International science conference «Nauchno-tekhneskie aspekty razvitiya avtotransportnogo kompleksa 2020»; May 29, 2020; Gorlovka. ADI GOU VPO «DONNTU»; 2020, pp. 72–77. (In Russ).

17. Khimchenko AV, Mishchenko NI. Formation of the automobile driving cycle by the approximation of experimental data using neural network. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. 2018;(4):3–13. (In Russ).

18. Khimchenko AV, Mishchenko NI, Puzakov AV, Petrov AI. Metodika uravnovesivaniya besshatunnogo dvigatelya na etape proektirovaniya s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya. Proceedings of the 7th International science conference «Nauchno-tekhneskie aspekty razvitiya avtotransportnogo kompleksa 2021»; May 25, 2021; Gorlovka. ADI GOU VPO «DONNTU»; 2021, pp. 89–94. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

**\*Химченко Аркадий Васильевич,**

доцент, к.т.н.,  
доцент кафедры автомобильного транспорта, начальник  
научно-исследовательской части;  
адрес: Россия, Донецкая Народная Республика, 84646,  
г. Горловка, ул. Кирова 51;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>;  
eLibrary SPIN: 4568-1757;  
e-mail: himch.arkady@yandex.ru

**Мищенко Николай Иванович,**

профессор, д.т.н.,  
заведующий кафедрой автомобильного транспорта;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0390-1563>;  
eLibrary SPIN: 6604-8459;  
e-mail: mim2802@mail.ru

**Савчук Олег Вячеславович,**

бакалавр, магистрант;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-4407>;  
eLibrary SPIN: 4178-1038;  
e-mail: piligrimx2@gmail.com

\*Автор для переписки

## AUTHORS' INFO

**\*Arkady V. Khimchenko,**

Associate Professor, Cand. Sci. (Engin.),  
Associate Professor of the Automotive Transport Department,  
Head of the Research Department;  
address: 51 st. Kirova, Gorlovka, 84646,  
Donetsk People's Republic, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9340-4252>;  
eLibrary SPIN: 4568-1757;  
e-mail: himch.arkady@yandex.ru

**Nikolay I. Mishchenko,**

Professor, Dr. Sci. (Engin.),  
Head of the Automotive Transport Department;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0390-1563>;  
eLibrary SPIN: 6604-8459;  
e-mail: mim2802@mail.ru

**Oleg V. Savchuk,**

Bachelor Graduate student;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7295-4407>;  
eLibrary SPIN: 4178-1038;  
e-mail: piligrimx2@gmail.com

\*Corresponding author

УДК 621.436

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106271>

Оригинальное исследование

## Экспериментальное исследование механических потерь современного дизеля

М.Д. Ханнанов<sup>1,2</sup>, И.Ф. Гумеров<sup>2</sup>, Л.И. Фардеев<sup>2</sup>, А.С. Куликов<sup>2</sup>, Э.Р. Алимгулов<sup>2</sup><sup>1</sup> Набережночелнинский институт Казанского федерального университета, Набережные Челны, Россия<sup>2</sup> Научно-технический центр ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** В условиях ужесточения требований по выбросам CO<sub>2</sub>, а также высокого уровня конкуренции на рынке коммерческих грузовых автомобилей для двигателей внутреннего сгорания (ДВС) становятся приоритетными следующие направления развития: высокая эффективность и топливная экономичность, минимизация внутренних потерь и оптимизация рабочего процесса на всех режимах работы. Эффективные показатели имеющихся на мировом рынке современных дизельных двигателей в классе 12–13 литров таковы: минимальный удельный расход топлива 179–182 г/кВт·ч, эффективный КПД 46–48%. Достичь данных показателей удалось в том числе за счет снижения механических потерь. Актуальной задачей при выборе стратегии снижения механических потерь является формирование баланса с распределением потерь по основным группам компонентов ДВС. Кроме этого, учитывая зависимость механических потерь от рабочих оборотов двигателя, параметров рабочего процесса и конструктивных особенностей двигателя, важно определить характер их изменения.

**Цель работы** – экспериментальным путем оценить механические потери современного дизельного двигателя с высоким эффективным КПД, сформировать баланс механических потерь.

**Материалы и методы.** Объектом исследования является рядный шестицилиндровый дизель 6ЧН 13/15 рабочим объемом 11,95 литров. Оценка механических потерь проводилась на двигателе, прокручиваемом динамометрической машиной на испытательном стенде при полностью стабилизированных условиях, методом последовательного демонтажа основных групп компонентов.

**Результаты.** Получены актуальные данные по уровню механических потерь современного дизельного двигателя с распределением по основным группам компонентов. Сформированы зависимости механических потерь от частоты вращения, от температур масла и охлаждающей жидкости.

**Заключение.** Практическая ценность исследования заключается в оценке вклада каждой группы компонентов в общее трение, а также в оценке степени конструкторского и технологического развития ДВС. По результатам данного исследования будут сформированы области потенциального улучшения трения для каждой компонентной группы и двигателя в целом.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель; эффективный КПД; топливная экономичность; механические потери; среднее эффективное давление потерь на трение; баланс механических потерь.

### Для цитирования:

Ханнанов М.Д., Гумеров И.Ф., Фардеев Л.И., Куликов А.С., Алимгулов Э.Р. Экспериментальное исследование механических потерь современного дизеля // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 3. С. 187–195. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106271>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106271>

Original study article

# The experimental study of mechanical losses in the modern diesel engine

Marat D. Khannanov<sup>1,2</sup>, Irek F. Gumerov<sup>2</sup>, Lenar I. Fardeev<sup>2</sup>,  
Andrey S. Kulikov<sup>2</sup>, Eduard R. Alimgulov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Naberezhnye Chelny Institute of the Kazan Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

<sup>2</sup> Research and Development Center of PJSC "KAMAZ", Naberezhnye Chelny, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Amid the tightening of the CO<sub>2</sub> emission requirements as well as high level of competition on the commercial truck market, the focus area of the internal combustion engine (ICE) development is as follows: high engine efficiency and fuel economy, minimization of internal losses and engine cycle optimization for all operation modes. Engine performance factors of modern 12–13-liter diesel engines, existing on the global market, are as follows: the minimal specific fuel consumption is 179–182 g/kWh, effective efficiency is 46–48%. Decreasing of mechanical losses is one of the features that made the achievement of such factors possible. The relevant issue for choosing the strategy of mechanical losses decreasing is formation of balance in losses distribution between main ICE groups of components. Moreover, considering the mechanical losses dependence on engine operating speed, engine cycle parameters and engine design features, it is important to determine the pattern of change in mechanical losses.

**AIMS:** Assessment of mechanical losses of modern diesel engine with high effective efficiency in an experimental way. Formation of mechanical losses balance.

**METHODS:** The study object is the 6ChN 13/15 inline six-cylinder diesel engine with the operation volume of 11.95 liters. The mechanical losses assessment was performed with the engine, propelled by a dynamometric machine on a testing facility with fully stabilized conditions, with the method of sequential disassemble of main groups of components.

**RESULTS:** Relevant data of mechanical losses level of the modern diesel engine with the distribution between main groups of components is obtained. Mechanical losses dependence on operation speed, oil and coolant liquid temperatures is formed.

**CONCLUSIONS:** Practical value of the study lies in assessment of contribution of each group of components in the total friction as well as in assessment of the degree of design and technological development of ICEs. According to the study results, areas of possible improvement of friction for each group of components and engine as a whole will be formed.

**Keywords:** diesel engine; effective efficiency; fuel economy; mechanical losses; average effective pressure of friction losses; mechanical losses balance.

## Cite as:

Khannanov MD, Gumerov IF, Fardeev LI, Kulikov AS, Alimgulov ER. The experimental study of mechanical losses in the modern diesel engine. // *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):187–195. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106271>

Received: 14.04.2022

Accepted: 25.05.2022

Published: 15.07.2022

## ВВЕДЕНИЕ

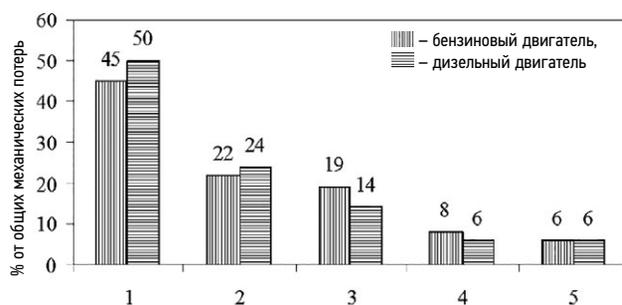
Прогресс в теории ДВС и новые перспективные технологии обеспечивают возможность экономии топлива путем целевого сокращения потерь энергии. При этом резервы энергосбережения ДВС заключены не только в снижении потерь тепловой энергии, но и в повышении эффективной работы, в том числе и за счет снижения механических потерь.

Механические потери – следствие потерь энергии на преодоление трения движущихся частей (например, поршень в сборе, шатун, коленчатый вал и клапанный механизм), систем нагнетания, насосных систем и энергии, необходимой для движения компонентов двигателя.

По различным оценкам, выполненным для конкретных типов и комплектаций поршневых ДВС, отнесенная к индикаторной мощности доля механических потерь на номинальном режиме работы бензиновых автомобильных двигателей и автотракторных дизелей без наддува составляет величину от 15 до 25%. Это говорит о том, что около четверти располагаемой энергии газов в поршневом двигателе безвозвратно теряется на преодоление трения [1].

В свое время Рикардо [2], анализируя динамику показателей карбюраторных двигателей 1924–1948 годов выпуска, отметил отсутствие роста механического КПД за указанный период и объяснил этот факт тем, что повышение индикаторных показателей одновременно сопровождалось практически пропорциональным ростом затрат энергии на газообмен и преодоление механического трения. Сравнение аналогичных параметров современных ДВС автотракторного типа, обладающих значительно большим уровнем форсирования как по нагрузке, так и по скоростному режиму, свидетельствует о сохранении этой тенденции и в наши дни: величина механического КПД на номинальном режиме безнаддувных вариантов двигателей, как и тогда, не превышает значений 0,74–0,78 (уменьшаясь при снижении нагрузки). Все это свидетельствует не только о сложности решений по сокращению механических потерь, но и (несмотря на очевидные успехи в области триботехники и триботехнологии) о недостаточном внимании, которое уделяется применению трибологических методов в ДВС.

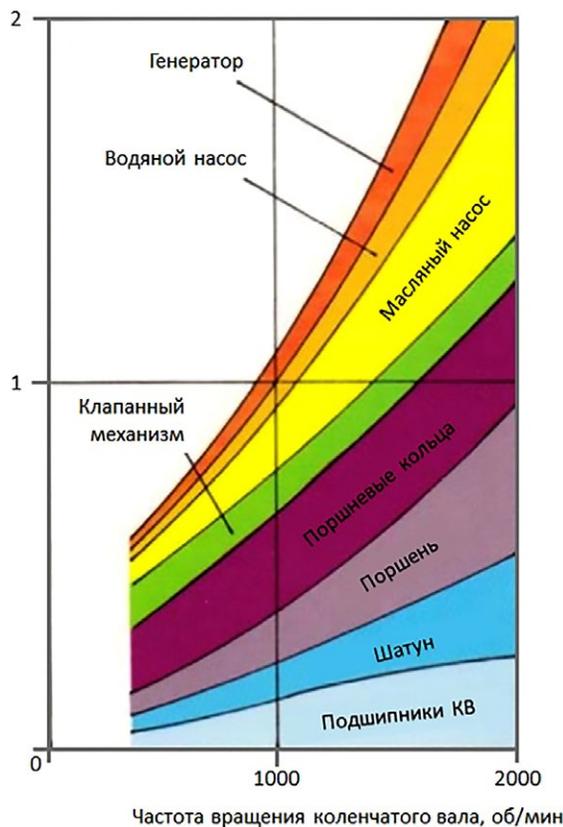
С целью формирования стратегии по повышению энергоэффективности и топливной экономичности конкретного ДВС важно оценить актуальный баланс механических потерь с распределением по основным группам компонентов [3, 4]. Для примера, на рис. 1 представлено среднестатистическое распределение механических потерь по механизмам, узлам и агрегатам ДВС, из которого следует, что максимальный вклад в общие механические потери вносит трение деталей цилиндропоршневой группы ЦПГ: в среднем 45 и 50% для бензиновых ДВС и дизелей. Следующую по удельному весу долю составляют потери в подшипниках кривошипно-шатунного механизма (КШМ):



**Рис. 1.** Распределение составляющих механических потерь по узлам и агрегатам ДВС: 1 – цилиндропоршневая группа (ЦПГ); 2 – кривошипно-шатунный механизм (КШМ); 3 – газообмен (насосные потери); 4 – газораспределительный механизм (ГРМ); 5 – навесные агрегаты.

**Fig. 1.** Distribution of mechanical losses shares between units and assemblies of an ICE: 1 – cylinder-piston group (CPG); 2 – crank gear assembly (CGA); 3 – gases exchange (pumping losses); 4 – valve gear assembly (VGA); 5 – accessories.

Среднее эффективное давление трения, бар



**Рис. 2.** Схематичное представление распределения трения по различным диапазонам оборотов двигателя.

**Fig. 2.** The sketch of losses distribution depending on engine operation speed.

22–24% при полной нагрузке. Примерно пятая часть всех механических потерь приходится на работу, затрачиваемую на газообмен (аэродинамические потери). Формирование баланса механических потерь позволяет определить основные приоритеты и резервы энергосбережения.

В то же время механические потери не являются постоянными по всему диапазону рабочих оборотов двигателя; скорее даже они растут с увеличением оборотов двигателя, как показано на рис. 2 [5]. С целью обеспечения более глубокого понимания относительно дальнейшего улучшения эффективного КПД важно определить характер изменения механических потерь.

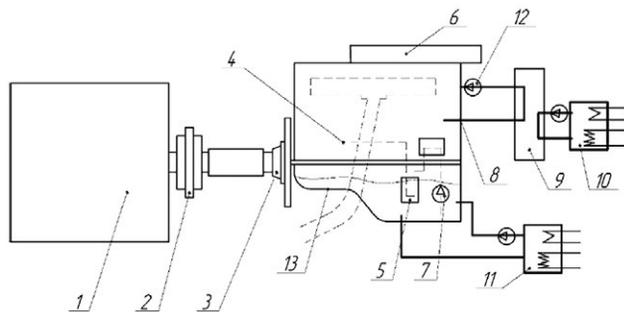
## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальным путем оценить механические потери современного дизельного двигателя с высоким эффективным КПД. Сформировать баланс механических потерь с распределением по основным группам компонентов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является рядный шестицилиндровый дизель 6ЧН 13/15 рабочим объемом 11,95 литров. Основные характеристики двигателя:

- номинальная мощность  $N_e=404$  кВт при частоте вращения коленчатого вала  $n_{ном}=1900$  мин<sup>-1</sup>;
- максимальный крутящий момент  $M_e=2550$  Н·м при частоте вращения коленчатого вала от  $n_M=900-1400$  мин<sup>-1</sup>;
- эффективный КПД 46%;
- минимальный удельный расход топлива  $g_e=182$  г/кВтч.



**Рис. 3.** Упрощенная схема испытательного стенда: 1 – приводная динамометрическая машина; 2 – датчик крутящего момента; 3 – шарнирный вал с переходным фланцем; 4 – главная масляная магистраль, датчик температуры и давления; 5 – масляный фильтр; 6 – система впуска воздуха; 7 – масляный насос; 8 – датчик давления и температуры ОЖ на выходе; 9 – теплообменник; 10 – устройство кондиционирования охлаждающей жидкости; 11 – устройство кондиционирования масла; 12 – водяной насос, датчик давления и температуры ОЖ на входе; 13 – масляный поддон.

**Fig. 3.** The simplified scheme of the testing facility: 1 – a driving dynamometric machine; 2 – a torque sensor; 3 – a jointed shaft with an adapter flange; 4 – main oil distributing passage, oil and pressure gauge; 5 – an oil filter; 6 – an air intake system; 7 – an oil pump; 8 – a coolant liquid pressure and temperature gauge at the outlet; 9 – a heat exchanger; 10 – a coolant liquid conditioning unit; 11 – an oil conditioning unit; 12 – a water pump, a coolant liquid pressure and temperature gauge at the inlet; 13 – an oil pan.

Отечественные стандарты (ГОСТ 18509-85 для тракторных и комбайновых двигателей, ГОСТ 14846-80 для автомобильных двигателей) предусматривают различные методы определения механических потерь двигателя: прокручивание коленчатого вала ДВС; последовательное отключение цилиндров ДВС; экстраполяция нагрузочной характеристики; индцирование давления в цилиндрах ДВС; метод одиночного и/или двойного выбега; измерение расхода топлива на холостом ходу. В работах [6, 7, 8] приведен более подробный анализ данных методов, включая анализ погрешностей при измерениях механических потерь; также рассматривается трудоемкость и применимость методов для различных типов ДВС (с различной тактностью, одно-, двухцилиндровых и др.). Данный анализ и сравнение методов определения механических потерь показывает, что каждый из способов – достаточно трудоемкий процесс, требующий времени и специального оборудования.

С целью формирования актуального баланса механических потерь принято решение провести экспериментальные исследования двигателя 6ЧН 13/15 методом прокрутки на испытательном стенде с последовательным демонтажем основных групп компонентов. Из всех известных методов определения интегральных (суммарных) механических потерь данный метод обладает наилучшим сочетанием показателей. Недостаток метода состоит в очень высокой (до 30%) систематической погрешности, поэтому эффективное использование данного метода требует компенсации искажений, вносимых отсутствием сгорания в цилиндрах при прокрутке (повышение вязкости моторного масла, снижение нагрузки на детали, разжижение масла топливом). Один из путей компенсации этих искажений является обеспечение оптимальных рабочих условий (температура масла и охлаждающей жидкости), ведущих к приближению условий смазки и трения к существующим при сгорании. В то же время данный метод позволяет оценить конструкторско-технологический уровень компонентов и развитие ДВС в целом.

Исследование проводилось на специально оборудованном испытательном стенде при полностью стабилизированных условиях трения. На рис. 3 представлена упрощенная схема испытательного стенда.

На первом этапе исследований определяется среднее давление механических потерь укомплектованного двигателя. Прокруткой от привода электродвигателя на каждой установившейся частоте вращения коленчатого вала датчиком крутящего момента фиксируется прокручиваемый крутящий момент двигателя и среднее индикаторное давление.

Среднее эффективное давление прокрутки двигателя на стенде ( $P_{пр}$ ) получено из прокручивающего крутящего момента, измеряемого датчиком крутящего момента:

$$P_{пр} = \frac{2\pi \cdot M_{пр} \cdot n_{ц}}{iVh},$$

где  $M_{пр}$  – прокручивающий крутящий момент;  $iVh$  – рабочий объем двигателя;  $n_{ц}$  – количество оборотов за цикл, для четырехтактного двигателя  $n_{ц}=2$ .

Среднее эффективное давление потерь  $P_M$  на трение вычисляется по формуле:

$$P_M = P_{пр} - P_i,$$

где  $P_i$  – среднее индикаторное давление, полученное от сжатия газов и насосных потерь в цилиндре, через впускную и выпускную системы, соответственно.

Для определения среднего индикаторного давления для определенной частоты вращения измеряется давление в цилиндре за весь термодинамический цикл (впуск, сжатие, рабочий ход, выпуск). С целью повышения точности измерений вначале требуется определить верхнюю мертвую точку (ВМТ). Далее проводится калибровка кривой давления и определяется угол потерь. По результатам измерения динамических давлений в цилиндре может быть построена P-V диаграмма. Площадь внутри кривой P-V определяет индикаторную работу. Делением этой величины на рабочий объем цилиндра получаем величину среднего индикаторного давления для целого цикла (рис. 2).

Далее вычисляются крутящий момент ( $M_M$ ) и мощность потерь ( $N_M$ ) на трение:

$$M_M = \frac{iVh \cdot P_M}{2\pi}; \quad N_M = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \frac{M_M}{1000}.$$

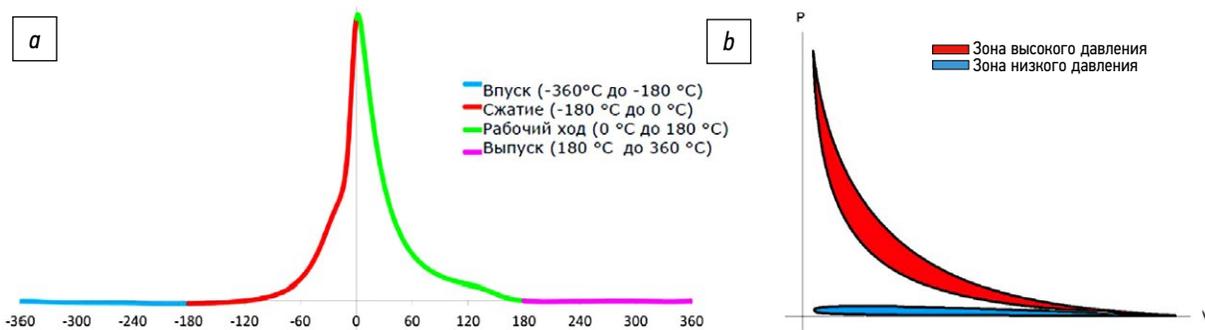
После прокрутки на испытательном стенде укомплектованного двигателя в программе исследования предусмотрен последовательный демонтаж следующих групп компонентов: масляный насос, поршень в сборе, насос охлаждающей жидкости, ременный привод агрегатов, воздушный компрессор тормозов, топливный насос высокого давления, клапаны и толкатели, распределительный вал с приводом. На финальном этапе проводится оценка механических потерь коленчатого вала. Таким образом, данный эксперимент позволяет оценить, как основные компоненты влияют на силы трения, и сформировать актуальный баланс механических потерь.

На каждом последовательном этапе двигатель работает с постоянными частотами коленчатого вала от 500

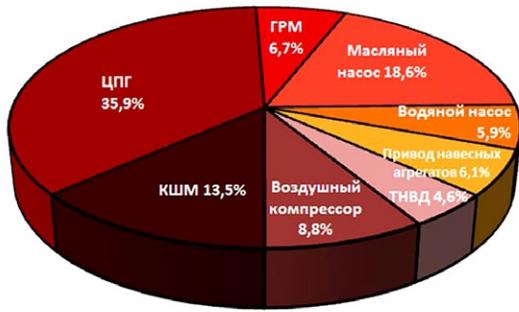
до 1900 об/мин с установленными температурами масла в главной масляной магистрали и температурами охлаждающей жидкости на выходе двигателя: 60 и 90 °С. Это позволяет дополнительно проанализировать зависимость силы трения от температуры масла и охлаждающей жидкости.

Испытываемый двигатель Р6 установлен на испытательный стенд по исследованию трения со следующими граничными условиями:

- 1) система впуска (впускной трубопровод без дроссельной заслонки, воздушный фильтр от испытательного стенда) и система выпуска изменены для режима прокрутки двигателя;
- 2) система смазки находится в исходном конструкторском состоянии; в дополнении установлено внешнее устройство кондиционирования и подготовки масла. Система кондиционирования масла включает в себя электрический нагреватель, водомасляный теплообменник и прокачивающий насос. Когда работает масляный насос двигателя, внешняя система кондиционирования только прокачивает масло через масляный поддон двигателя и управляет температурой масла. При деактивации масляного насоса циркуляция масла обеспечивается внешним устройством кондиционирования. Дополнительно устанавливается технологическая заглушка на выходе из серийного масляного насоса, которая препятствует прямому попаданию масла в масляный поддон;
- 3) температура охлаждающей жидкости (ОЖ) на выходе из двигателя управляется внешним устройством кондиционирования. Для обеспечения удовлетворительного управления температурой ОЖ на выходе из двигателя термостат заблокирован в открытом положении. Водяной насос двигателя обеспечивает циркуляцию ОЖ. При деактивации водяного насоса циркуляция ОЖ обеспечивается внешним устройством кондиционирования;
- 4) охлаждающая жидкость с 50% этиленгликоля класса G12+;
- 5) моторное масло 5W-30.



**Рис. 4.** Определение среднего индикаторного давления: а) калибровка индикаторной диаграммы; б) построение P-V диаграммы.  
**Fig. 4.** Evaluation of average indicator pressure: a) the indicator diagram calibration; b) the P-V diagram plotting.



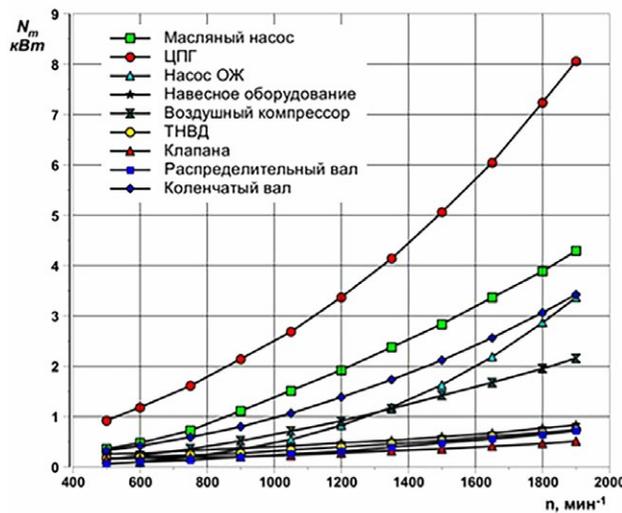
При частоте вращения коленчатого вала 900 об/мин



При частоте вращения коленчатого вала 1900 об/мин

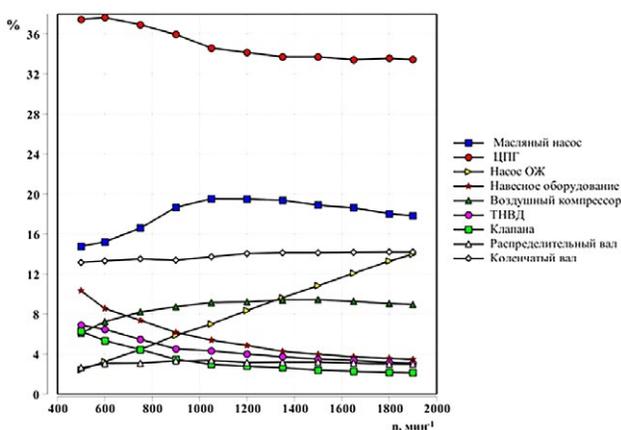
**Рис. 5.** Доля групп компонентов от суммарных потерь ДВС при температуре масла, ОЖ 90 °С и частотах вращения коленчатого вала 900 и 1900 об/мин.

**Fig. 5.** Shares of groups of components from ICE total losses for oil and coolant liquid temperatures of 90 °C and crankshaft rotation speed of 900 and 1900 rev/min.



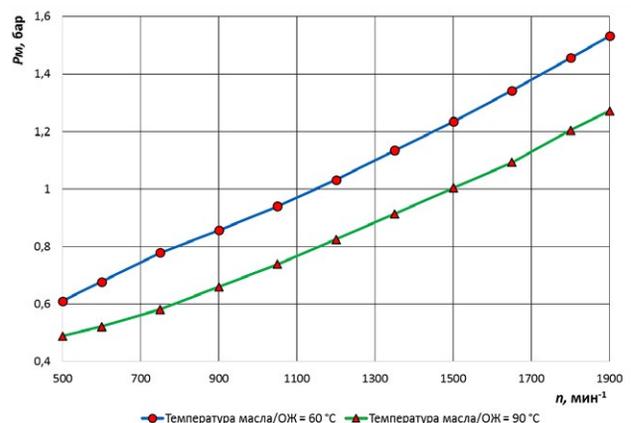
**Рис. 6.** График изменения мощности механических потерь основных групп компонентов от частоты вращения коленчатого вала.

**Fig. 6.** The graph of mechanical losses power of main groups of components depending on crankshaft rotation speed.



**Рис. 7.** График изменения процентной доли механических потерь основных групп компонентов от частоты вращения коленчатого вала.

**Fig. 7.** The graph of mechanical losses percentage of main groups of components depending on crankshaft rotation speed.



**Рис. 8.** График изменения механических потерь укомплектованного двигателя в зависимости от температуры масла и ОЖ.

**Fig. 8.** The graph of mechanical losses of the assembled engine depending on temperatures of oil and coolant liquid

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам исследований сформированы данные по среднему эффективному давлению потерь на трение, а также значения мощностных показателей потерь на трение. На рис. 5 приведено процентное распределение потерь каждой группы компонентов в общих механических потерях исследуемого двигателя при частоте вращения коленчатого вала 900 об/мин и 1900 об/мин, температурах масла и охлаждающей жидкости 90 °С / 90 °С.

Также сформированы следующие показатели:

- зависимость мощности механических потерь основных групп компонентов исследуемого двигателя от частоты вращения коленчатого вала (рис. 6);
- зависимость доли механических потерь основных групп компонентов исследуемого двигателя от частоты вращения коленчатого вала (рис. 7);
- зависимость среднего эффективного давления механических потерь исследуемого двигателя от температуры масла, ОЖ (рис. 8).

## ВЫВОДЫ

По результатам проведенных экспериментальных исследований получены актуальные данные по уровню механических потерь современного дизельного двигателя с высоким эффективным КПД. Измерение механических потерь по методике прокрутки с последовательным демонтажем основных групп компонентов позволило получить актуальное распределение и вклад каждой группы компонентов в общее трение. Значительная часть потерь приходится на ЦПГ – от 33% до 37%; на привод масляного насоса – от 14 до 17%; привод насоса охлаждающей жидкости – от 2,5 до 14%; на привод коленчатого вала – от 13 до 14%.

Исходя из полученного баланса механических потерь можно проследить основные направления развития современного дизеля в классе 12–13 литров. Значительно сократились потери на трение в ЦПГ (более 10%). В ходе решения задачи по оптимизации рабочего процесса (основной акцент в последние десятилетия ставился именно на эту задачу), в сочетании с изучением различных явлений смазки и трения движущихся частей, изменялась конструкция, материалы и структура поверхности. Все это позволило снизить коэффициент трения и повысить износостойкость компонентов ЦПГ. Также стоит отметить успехи в развитии антифрикционных покрытий вкладышей коленчатого вала (сокращение потерь на 5–8%). С развитием и совершенствованием конструкции основных узлов и агрегатов двигателей наблюдается существенное снижение уровня механических потерь, даже при агрессивных рабочих процессах ДВС, сопровождающихся высокими давлениями сгорания.

На основании проведенного экспериментального исследования будут сформированы области

потенциального улучшения трения для каждой компонентной группы. Полученные данные по механическим потерям будут учтены в расчетной математической модели исследуемого двигателя, а также при проектировании нового поколения энергоэффективных ДВС.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** *М.Д. Ханнанов* – поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, проведение исследований, анализ и оформление результатов исследований; *И.Ф. Гумеров* – определение приоритетных направлений исследований, экспертная оценка исследований, утверждение финальной версии; *Л.И. Фардеев* – организация проведения исследований, анализ результатов исследований, редактирование текста рукописи; *А.С. Куликов* – организация проведения исследований, анализ результатов исследований, редактирование текста рукописи; *Э.Р. Алимгулов* – проведение исследований, анализ результатов исследований, редактирование текста рукописи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** *M.D. Khannanov* – search for publications on the topic of the article, writing the text of the manuscript, conducting research, analyzing and formalizing research results; *I.F. Gumerov* – determination of priority areas of research, expert evaluation of research, approval of the final version; *L.I. Fardeev* – organization of research, analysis of research results, editing the text of the manuscript; *A.S. Kulikov* – organization of research, analysis of research results, editing the text of the manuscript; selection of source materials on the topic of the article; *E.R. Alimgulov* – conducting research, analyzing research results, editing the text of the manuscript.

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях. Учебное пособие по дисциплине «Специальные главы конструирования и САПР». Москва: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
2. Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания / под ред. М.Г. Круглова. Москва: ГНТИ, 1960.
3. Wang Z., Shuai S., Li Z., Yu W. A Review of Energy Loss Reduction Technologies for Internal Combustion Engines to Improve Brake Thermal Efficiency // *Energies*. 2021. Vol. 14, N 20. doi: 10.3390/en14206656
4. Mihara Y. Research Trend of Friction Loss Reduction in Internal Combustion Engines // *Tribology Online*. 2017. Vol. 12, N 3. P. 82–88. Available from: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/trol/12/3/12\\_82/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/trol/12/3/12_82/_article) Accessed: 20.08.2022. doi: 10.2474/trol.12.82
5. x-engineer.org [Internet]. Mechanical efficiency and friction mean effective pressure (FMEP). Available from: <https://x-engineer.org/mechanical-efficiency-friction-mean-effective-pressure-fmep/> Accessed 20.08.2022.
6. Александров И.К., Раков В.А., Дымов Н.Э. Определение механических потерь в ДВС // *Вестник Машиностроения*. 2020. № 3. С. 37–38.
7. Щукина В.Н. Анализ методов определения механических потерь для их последующего применения в процессе эксплуатации // *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина»*. 2016. № 5. С. 18–21.
8. Берг С.И., Загайко С.А. Методы измерения механических потерь // *Мавлютовские чтения: материалы XIV Всероссийской молодежной научной конференции; Ноябрь 01–03, 2020; Уфа*. Уфа: УГАТУ, 2020.

## REFERENCES

1. Putintsev SV. *Mekhanicheskie poteri v porshnevyykh dvigatelyakh. Uchebnoye posobie po distsipline «Spetsial'nye glavy konstruirovaniya i SAPR»*. Moscow: izd-vo MGTU im. N.E. Bauman; 2011. (In Russ).
2. Ricardo HR. *High-Speed internal-combustion engines*. Kruglov MG, editor. Mosow: GNTI; 1960. (In Russ).
3. Wang Z, Shuai S, Li Z, Yu W. A Review of Energy Loss Reduction Technologies for Internal Combustion Engines to Improve Brake Thermal Efficiency. *Energies*. 2021;14(20). doi: 10.3390/en14206656
4. Mihara Y. Research Trend of Friction Loss Reduction in Internal Combustion Engines. *Tribology Online*. Available from: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/trol/12/3/12\\_82/\\_article](https://www.jstage.jst.go.jp/article/trol/12/3/12_82/_article) 2017;12(3):82–88. doi: 10.2474/trol.12.82
5. x-engineer.org [Internet]. Mechanical efficiency and friction mean effective pressure (FMEP). Available from: <https://x-engineer.org/mechanical-efficiency-friction-mean-effective-pressure-fmep/>
6. Aleksandrov IK, Rakov VA, Dymov NE. Determination of mechanical losses in internal combustion engines. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;(3):37–38. (In Russ).
7. Shchukina VN. Analysing methods of determining mechanical losses for their subsequent use in operation process. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"* 2016;(5):18–21. (In Russ).
8. Berg SI, Zagaiko SA. Metody izmereniya mekhanicheskikh poter'. *Mavlyutovskie chteniya: Proceedings of the 14th Russian junior science conference; November 01–03, 2020; Ufa*. Ufa: UGATU; 2020. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

### \*Ханнанов Марат Дамирович,

аспирант кафедры «Автомобили, автомобильные двигатели и дизайн»;  
адрес: 423812, Российская Федерация, республика Татарстан, г. Набережные Челны, Проспект Мира, д. 68/19;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9816-0691>;  
eLibrary SPIN: 9825-8736;  
e-mail: marhan87@mail.ru

### Гумеров Ирек Флорович, к.т.н.;

заместитель генерального директора – директор по развитию;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5538-8693>;  
eLibrary SPIN: 3475-4219;  
e-mail: gumerov@kamaz.ru

### Фардеев Ленар Ильдарович,

заместитель главного конструктора по перспективным двигателям;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2508-5915>;  
eLibrary SPIN: 4034-8695;  
e-mail: Lenar.Fardeev@kamaz.ru

## AUTHORS' INFO

### \*Marat D. Khannanov,

Postgraduate of the Automobiles, Automobile Engines and Design Department;  
address: 68/19 Prospekt Mira, Naberezhnye Chelny, 423812, Russian Federation;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9816-0691>;  
eLibrary SPIN: 9825-8736;  
e-mail: marhan87@mail.ru

### Irek F. Gumerov, Cand. Sci. (Engin.);

Deputy General Director - Development Director;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5538-8693>;  
eLibrary SPIN: 3475-4219;  
e-mail: gumerov@kamaz.ru

### Lenar I. Fardeev,

Deputy Chief Engine Designer for Advanced Engines;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2508-5915>;  
eLibrary SPIN: 4034-8695;  
e-mail: Lenar.Fardeev@kamaz.ru

**Куликов Андрей Сергеевич,**

главный конструктор по двигателям;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4005-1112>;  
eLibrary SPIN: 1525-7860;  
e-mail: [Andrey.Kulikov@kamaz.ru](mailto:Andrey.Kulikov@kamaz.ru)

**Алимгулов Эдуард Радиевич,**

руководитель группы перспективных двигателей;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7808-8327>;  
eLibrary SPIN: 8738-3647;  
e-mail: [Eduard.Alimgulov@kamaz.ru](mailto:Eduard.Alimgulov@kamaz.ru)

\*Автор для переписки

**Andrey S. Kulikov,**

Chief Engine Designer of R&D Center;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4005-1112>;  
eLibrary SPIN: 1525-7860;  
e-mail: [Andrey.Kulikov@kamaz.ru](mailto:Andrey.Kulikov@kamaz.ru)

**Eduard R. Alimgulov,**

Head of the Design Group of Advanced Engines, R&D Center;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7808-8327>;  
eLibrary SPIN: 8738-3647;  
e-mail: [Eduard.Alimgulov@kamaz.ru](mailto:Eduard.Alimgulov@kamaz.ru)

\*Corresponding author

УДК 629.3.027.3

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106855>

Оригинальное исследование

## К вопросу вторичного использования эксергии выпускных газов в автотракторных силовых установках

Г.М. Крохта<sup>1</sup>, Е.Н. Хомченко<sup>1</sup>, Н.А. Усатых<sup>1</sup>, А.Б. Иванников<sup>2</sup><sup>1</sup> Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Россия<sup>2</sup> Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства СФНЦА РАН, Краснообск, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Коэффициент полезного действия современных двигателей внутреннего сгорания не превышает 40%, при этом значительная часть эксергии, выделившейся при сгорании топлива, рассеивается в окружающую среду с отработавшими газами, охлаждающей жидкостью и нагретыми деталями. В то же время при эксплуатации тракторов в условиях низких температур окружающего воздуха очень остро стоит проблема поддержания оптимального теплового режима для снижения потерь, увеличения полноты сгорания топлива и как следствие повышения эксплуатационной экономичности.

**Цель работы** – оценка эффективности применения комплексной системы утилизации термомеханической эксергии выхлопных газов дизеля. Обоснование вида и количества ступеней утилизации эксергии выхлопных газов на автотракторных дизелях в широком диапазоне температур окружающей среды и нагрузочных режимов.

**Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели были проведены теоретические и экспериментальные исследования для оценки эксергетического потенциала выпускных газов в зависимости от степени загрузки двигателя и температуры окружающей среды. Проведены сравнительные исследования двигателей Д-440 и СМД-62, позволяющие оценить влияние конструктивных особенностей системы выпуска отработавших газов на величину потерь эксергии.

**Результаты.** Потери работоспособности ВГ двигателя СМД-62 с ТКР-11Н-1 на номинальном режиме составили 0,8. При этом максимальные потери работоспособности ВГ на холостом ходу составляют 0,92. Авторами предложена частная методика анализа отдельных составляющих эксергии выпускных газов, позволяющая анализировать возможные пути ее вторичного использования. Полученные уравнения определяют количественное и качественное соотношения между составляющими эксергии выхлопных газов относительно их максимального эксергетического потенциала, подлежащего утилизации.

**Заключение.** На основании анализа экспериментальных данных и их статистической обработки можно сделать вывод, что двигатели средней мощности имеют ограниченные ресурсы бросовой теплоты. Теоретически ее должно хватить для обеспечения работы ТКР и поддержания теплового режима в коробке передач и в системе охлаждения двигателя в зимний период.

**Ключевые слова:** утилизация; бросовая теплота; выхлопные газы; эксергия; эксергетический потенциал; потери; дизель; рекуператор; турбокомпрессор.

### Для цитирования:

Крохта Г.М., Хомченко Е.Н., Усатых Н.А., Иванников А.Б. К вопросу вторичного использования эксергии выпускных газов в автотракторных силовых установках // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 3. С. 197–205. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106855>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106855>

Original study article

# On the question of secondary use of exhaust exergy in power units of vehicles and tractors

Gennady M. Krokhta<sup>1</sup>, Egor N. Khomchenko<sup>1</sup>, Nikolai A. Usatykh<sup>1</sup>, Alexey B. Ivannikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Siberian Scientific and Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, Krasnoobsk, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Efficiency of modern internal combustion engines is no more than 40%, while the significant part of exergy, released during fuel combustion, dissipates in the environment through exhaust, coolant liquid and heated details. Meanwhile, the urgent problem of operating a tractor in low ambient temperature conditions is sustaining of optimal thermal condition for the sake of decreasing of losses, increasing of combustion efficiency and, as a consequence, increasing of operating efficiency.

**AIMS:** Efficiency assessment of use of the complex system of utilization of thermomechanical exergy of diesel engine exhaust. Justification of type and number of stages of exhaust exergy utilization for diesel engines of vehicles and tractors for a wide range of ambient temperatures and loading conditions.

**METHODS:** To accomplish given aims, theoretical and experimental studies were carried out in order to assess exhaust exergy potential in dependence on engine loading conditions and ambient temperature. Comparative studies of the D-440 and the SMD-62 engines were carried out, making it possible to assess the influence of exhaust system design features on amount of exergy losses.

**RESULTS:** Exhaust performance losses of the SMD-62 engine with the TKR-11N-1 turbocharger at nominal mode were 0.8. Meanwhile, maximal exhaust performance losses at idle mode are 0.92. Authors suggested the special method of analysis of certain exhaust exergy components, which allows analyzing possible ways of its secondary use. The obtained equations determine quantitative and qualitative ratios between exhaust exergy components in comparison to maximal exhaust exergy potential to be utilized.

**CONCLUSIONS:** Based on experimental data analysis and its statistical processing, it follows that middle powered engines have limited resources of waste heat. Theoretically, it should be enough for ensuring the turbocharger operation and sustaining of thermal condition in a gearbox and a cooling system in winter.

**Keywords:** utilization; waste heat; exhaust; exergy; exergy potential; losses; diesel engine; recuperative heat exchanger; turbocharger.

## Cite as:

Krokhta GM, Khomchenko EN, Usatykh NA, Ivannikov AB. On the question of secondary use of exhaust exergy in power units of vehicles and tractors. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):197–205. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106855>

Received: 28.04.2022

Accepted: 01.07.2022

Published: 15.07.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что с выхлопными газами (ВГ) автотракторный дизель выбрасывает в окружающую среду (ОС) сравнительно большое количество энергии, величина которой может достигать 35–40% и более общего количества теплоты, выделившейся от сгоревшего в двигателе топлива. Кроме того, до 28% теплоты может рассеиваться в ОС системой охлаждения двигателя. При этом КПД двигателей не превышает 40% при условии полной и равномерной загрузки [1]. В то же время известно, что средняя нагрузка тракторного двигателя в течение года находится в пределах 60–70% [2]. По этой причине реальный КПД двигателя будет еще ниже.

Вопросу вторичного использования эксергии мощных силовых установок в настоящее время уделяется большое внимание. Анализ литературных источников показал, что эксергия выхлопных газов может трансформироваться в электроэнергию, теплоту или холод [3, 4, 5]. Холод производится с помощью абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин.

Процесс, когда в результате утилизации ВГ вторично используется эксергия в виде электроэнергии и теплоты называется когенерацией. Тригенерацией называют процесс, когда эксергия ВГ используется для производства электроэнергии, теплоты и холода.

При применении тригенерации совместно с силовыми турбинами или двигателями Стирлинга удается повысить КПД судовых силовых установок до 80%. При этом нельзя забывать, что мощность главных судовых двигателей достигает 20,0 МВт и более.

Автотракторные двигатели по сравнению с судовыми, тепловозными, стационарными и тому подобными двигателями развивают намного меньшую мощность (до 600–650 кВт).

Наличие низкопотенциальной эксергии, непредсказуемые колебания ее амплитуды и частоты, а также недостаточный уровень технологической и конструкторской проработки систем утилизации эксергии ВГ способствует снижению эффективности при их использовании. Поэтому в настоящее время на автотракторных двигателях эксергия ВГ в основном используется для работы турбокомпрессоров (волновые обменники давления) и в редких случаях – силовых турбин.

Максимальный эксергетический потенциал ВГ имеет место в выпускном канале головки. Турбина может устанавливаться непосредственно на фланец коллектора (Д-440) или с помощью дополнительных выпускных патрубков (ЯМЗ-238, ЯМЗ-240, СМД-62). Из перечисленных марок самую оптимальную компоновку ТКР с коллектором имеет двигатель СМД-62. Этот двигатель изначально проектировался с газотурбинным наддувом и считался базовым для других модификаций, поэтому потери в коллекторах у него должны находиться на минимальном уровне. Разработчики других марок

за базовый принимали безнаддувный вариант. В этом случае конструкция выпускного тракта для базового варианта должна быть оптимальной, но для наддувного она не всегда может быть оптимальной, что приводит к потерям работоспособности газового потока.

Суммарный потенциал бросовой эксергии двигателей мощностью, например, 600–650 кВт, если просуммировать возможные потери системой выпуска, системой охлаждения и смазки, может достигать внушительной величины – до 1400 МДж/ч и более. Из них до 640 МДж/ч приходится на ВГ [6].

Несмотря на то, что располагаемая эксергия ВГ велика, современные технологии и конструкции газовыпускных систем автотракторных двигателей не позволяют эффективно ее использовать.

Потери работоспособности газа (диссипация) в момент выпуска из-за несовершенства газовыпускных систем достигают больших значений. В многочисленных публикациях акцентируется внимание на том, что эксергия ВГ, реализуемая в турбине, не превышает 20–25% от располагаемой [7]. Особо велики потери в момент начала открытия выпускного клапана, когда скорость газа в клапанной щели достигает критической (приближается к скорости звука или превышает его). Диссипация – это работа сил внутреннего трения, вызванная вязкостью газа [8].

Величина потерь зависит от конструктивных особенностей газовыпускного тракта, технической характеристики агрегата для утилизации бросовой эксергии. Очевидно, что больших потерь следует ожидать при утилизации ВГ по сравнению с охлаждающей жидкостью и маслом. Причина – высокая температура (до 700 °С), большая скорость истечения газов. На данный момент исключить потери (диссипацию) эксергии в момент выпуска газов из цилиндра в выпускной канал головки не представляется возможным.

Из выпускных каналов головки ВГ попадают в коллектор. С точки зрения минимизации потерь эксергии в ОС, площадь боковой поверхности коллектора должна быть минимальной и покрыта теплоизоляцией. Утилизационный агрегат желательно устанавливать непосредственно на коллектор или как можно ближе к нему.

При наддуве возрастает объем и плотность воздуха, поступающего в цилиндры двигателя, что позволяет увеличить цикловую подачу топлива и получить большую мощность и снизить удельный расход топлива. В то же время автотракторные двигатели с газотурбинным наддувом имеют ряд существенных недостатков: снижение крутящего момента, более низкую топливную экономичность на частичных нагрузочных режимах по сравнению с безнаддувным вариантом [8, 9]. Повышение плотности воздуха на впуске происходит не только путем его сжатия, но и охлаждения в специальных охладителях, а также в результате изменения климатических условий эксплуатации машин. В последнем случае затраты полезной работы, которая частично снимается с коленчатого вала

двигателя, могут быть сведены к нулю даже на частичных нагрузках. Увеличение плотности воздуха на впуске за счет снижения его температуры (климатический наддув) – процесс неуправляемый, но реальный.

В случаях, когда применяется глубокая (многоступенчатая) утилизация эксергии ВГ с использованием линейки агрегатов, например, силовая турбина, турбокомпрессор, рекуператор и т.п., то учитываются технические приоритеты впереди стоящего агрегата перед другими. Очевидно, что вначале ВГ должны проходить через силовую турбину, а затем через ТКР, потому что они имеют сравнительно большой эксергетический потенциал, что способствует максимальному росту коэффициента полезного использования теплоты ВГ. В ряде случаев турбина и турбокомпрессор могут работать параллельно. После турбины и турбокомпрессора пульсация газового потока и его температура выравниваются, в результате чего рекуператор работает более эффективно. Каждая последующая ступень утилизации эксергии ВГ должна учитывать выходные параметры предыдущей и максимально использовать имеющийся ресурс на своем уровне.

**Цель исследования** – оценка эффективности применения комплексной системы утилизации термомеханической эксергии ВГ дизельного двигателя. Обоснование вида и количества ступеней утилизации эксергии ВГ на автотракторных дизелях в широком диапазоне температур ОС и нагрузочных режимов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе аналитических и экспериментальных исследований применялись известные методы оптимизации и математической статистики. Использовались теоретические основы теплотехники и теории двигателей внутреннего сгорания. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 18509–88 «Дизели тракторные и комбайновые» и ГОСТ 24026–80 «Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения».

Экспериментальные исследования проводились на двигателях СМД–62 (6ЧН13,0/11,5) и Д–440 (ЧН13,0/14,0), которые располагались на открытой площадке и находились в полной комплектации. Тормозные стенды КИ–2118А вместе с контрольно-измерительной аппаратурой размещались в лаборатории (отапливаемое помещение). В двигатели заливалось свежее масло марки М–8Г2к ГОСТ 8581–78. Часовой расход топлива определялся весовым методом с помощью полуавтоматического прибора конструкции кафедры «Автомобили и тракторы» Новосибирского ГАУ. Температуры охлаждающей жидкости, масла, выхлопных и отработанных газов, ОС регистрировались с помощью устройства УКТ38–Щ4.ТП, адаптера АС2, преобразователя интерфейсов RS–232 USB. Давление воздуха во впускном коллекторе, выпускных

газов перед турбиной и отработанных после турбины измерялось манометрами с ценой деления 0,01 кг/см<sup>2</sup>. Температура ВГ фиксировалась в заторможенном потоке с помощью хромель–алюмелевых термопар.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

До настоящего времени глубокая (многоступенчатая система) утилизация эксергии ВГ на автотракторных двигателях не нашла применения, что прежде всего связано с малой мощностью двигателей. В то же время на двигателях устанавливаются системы газотурбинного наддува (ГТН). Турбина турбокомпрессора утилизирует самую ценную часть эксергии – механическую составляющую ВГ (давление и скорость газового потока). С увеличением мощности двигателя растет мощность газового потока, поэтому, поставив силовую турбину, можно значительно увеличить эффективность работы многоступенчатой системы утилизации.

Во время оценки термодинамического совершенства системы газотурбинного наддува на входе и выходе из системы мы встречаем потоки энергии разного качества, оценка которых возможна только при сведении всех потоков к единому масштабу. Этого можно добиться, воспользовавшись эксергетическим методом.

Общие потери работоспособности ВГ в утилизационном агрегате, газопроводе и других устройствах определялись по формуле:

$$D_{ВГ} = 1 - \frac{\Delta E_{ТК}^*}{E_{ВГ}^*}, \quad (1)$$

где  $\Delta E_{ТК}^*$  – эксергия заторможенного потока ВГ, сбрасываемая в утилизационном агрегате, с учетом потерь, МДж/ч;  $E_{ВГ}^*$  – эксергия заторможенного потока выпускных газов (по параметрам ВГ перед турбиной), МДж/ч.

В итоге достигается качественная и количественная оценка степени термодинамического совершенства системы [10, 11].

В качестве примера рассмотрим систему ГТН (первая ступень утилизации ВГ). С целью повышения эффективности вторичного использования эксергии ВГ и оценки уровня совершенства системы ГТН разделим процесс выпуска на ряд составляющих (рис. 1):

- располагаемая работа ВГ (по параметрам ВГ перед выпускным клапаном в момент его открытия и до конца такта расширения  $E_{раск}$ );
- максимальный эксергетический потенциал ВГ, подлежащий утилизации, (по параметрам ВГ перед турбиной  $E_{max}^T$ );
- механическая эксергия свободного выпуска (по параметрам ВГ перед турбиной  $E_p^{ca}$ );
- механическая эксергия принудительного выпуска (по параметрам ВГ перед турбиной  $E_p^{np}$ );
- термическая эксергия свободного выпуска (по параметрам ВГ перед турбиной  $E_T$ ).

Представим это в виде равенства (2):

$$E_{\max}^T = E_T + E_p^{c6} + E_p^{np} . \quad (2)$$

Поделив на величину  $E_{\max}^T$  получим равенство:

$$\delta_T + \delta_p^{c6} + \delta_p^{np} = , \quad (3)$$

где  $\delta_T$  – доля термической составляющей эксергии ВГ, срабатываемая в турбине;  $\delta_p^{c6}$  – доля механической составляющей эксергии ВГ в период свободного выпуска, срабатываемая в турбине;  $\delta_p^{np}$  – доля механической составляющей эксергии ВГ в период принудительного выпуска (работа, снимаемая с коленчатого вала двигателя).

Уравнение (3) определяет количественное и качественное соотношения между составляющими эксергии ВГ относительно максимального эксергетического потенциала ВГ, подлежащего утилизации. Первая составляющая  $\delta_T$  характеризует изменение скоростного напора газового потока, вторая  $\delta_p^{c6}$  – волны давления в проточной части турбины и последняя – величину полезной работы двигателя, затрачиваемую на принудительное выталкивание рабочего тела из цилиндра. Наличие последней составляющей  $\delta_{oc}^{np}$  крайне нежелательно, так как она получается в результате двойного преобразования эксергии сгоревшего топлива в полезную работу двигателя, а затем в работу выталкивания с низким общим КПД, что ухудшает экономичность двигателя.

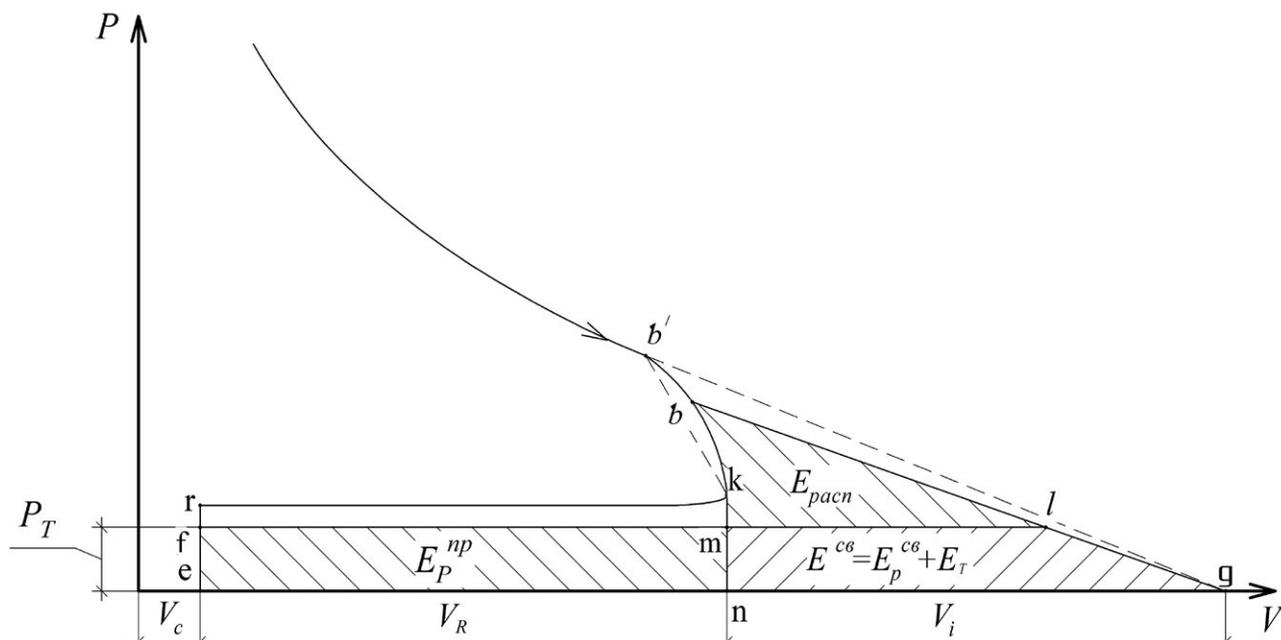
Стандовые испытания тракторного двигателя постоянной мощности 4ЧН13,0/14,0 с ТКР-8,5 показали, что на холостом ходу потери работоспособности ВГ ( $D_{ВГ}$ ) составляют 0,81. С увеличением нагрузки до номинальной

(78,7 кВт при 1750 мин<sup>-1</sup>) на регуляторной ветви внешней скоростной характеристики потери снижаются до 0,73. Дальнейшая работа двигателя на корректорном участке до максимального крутящего момента вновь сопровождается повышением работоспособности ВГ до 0,84 (рис. 2).

Потери работоспособности ВГ двигателя СМД-52 с ТКР-11Н-1 на номинальном режиме составили 0,8. При этом максимальные потери работоспособности ВГ на холостом ходу составляют 0,92 (рис. 3). Испытания подтвердили достоверность ранее полученных результатов и предположение о зависимости потерь работоспособности ВГ от конструктивных особенностей газовыпускных трактов. Результаты испытаний показали более высокую эффективность газовыпускной системы двигателя СМД-62 по сравнению с Д-440. Этого следовало ожидать, так как базовым является двигатель с ГТН.

С понижением температуры ОС с плюс 24 °С до минус 33 °С потери работоспособности газового потока незначительно снижаются. Так, на номинальном режиме снижение составило 0,03. Снижение потерь работоспособности потока можно объяснить увеличением потерь в ОС (нет теплоизоляции).

Результаты испытаний двигателей средней мощности (СМД-62 и Д-440) показали, что на частичных нагрузках, в ряде случаев вплоть до 70% от номинальной мощности, установка ТКР сопровождается снижением их экономичности. Основная причина заключается в том, что при наддуве используется часть эксергетического потенциала ВГ перед турбиной и часть механической работы двигателя, которая снимается с коленчатого вала и снижается с увеличением степени загрузки двигателя. Вследствие этого с увеличением степени загрузки двигателя эффективность

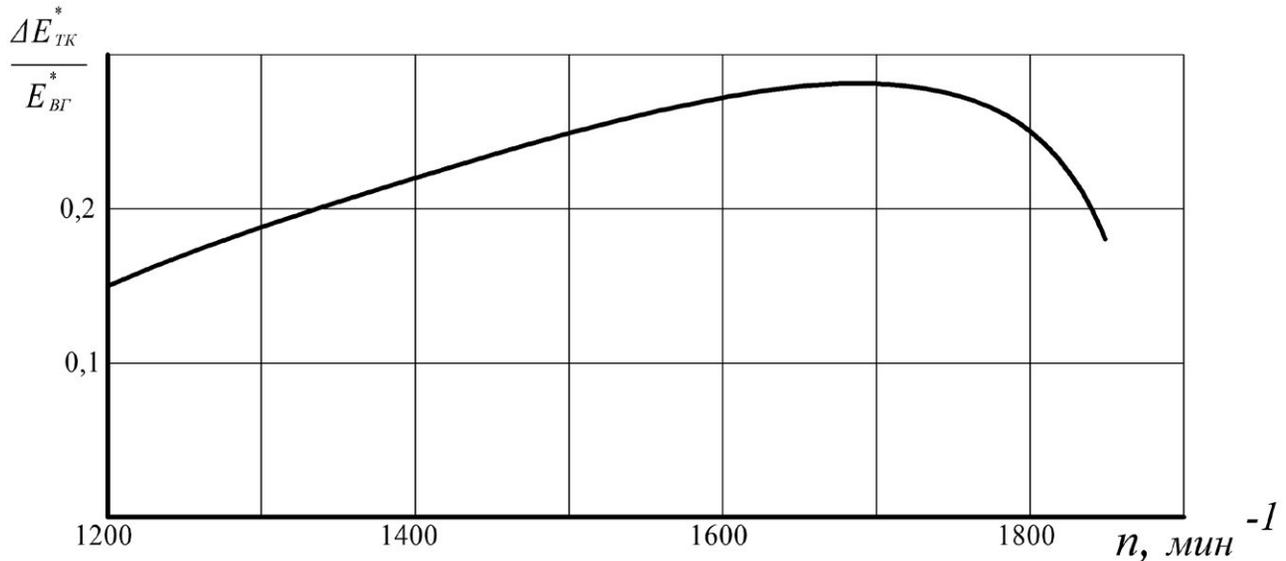


**Рис. 1.** Диаграмма эксергии, используемой в турбокомпрессоре двигателя.  
**Fig. 1.** The diagram of the exergy, used in the engine turbocharger.

работы системы ГТН повышается. Экспериментальные исследования показали, что абсолютная величина потерь на принудительное выталкивание для ТКР-11Н-1 может достигать 7,92 кВт при развиваемой турбиной мощности 21,2 кВт. Повысить эффективность работы автотракторной силовой установки, как следует из уравнения (3), можно путем изменения количества рабочего тела перед турбиной. Для регулирования количества и параметров ВГ (температуры и давления) предлагается применение

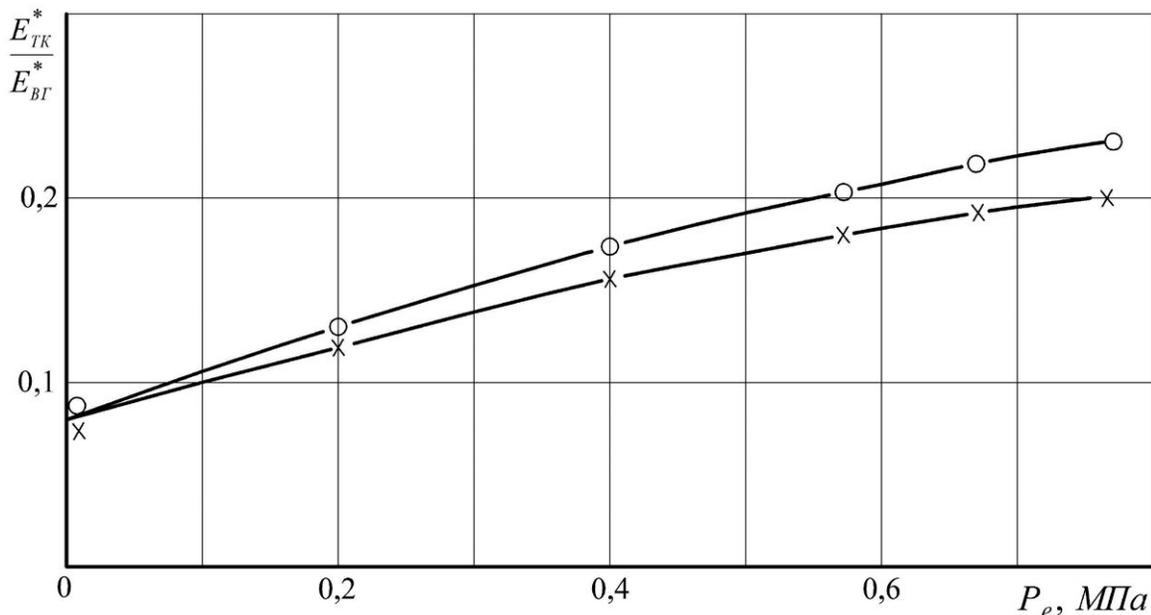
раздельного выпуска или устройства автоматического изменения угла открытия выпускного клапана в зависимости от частоты вращения коленчатого вала, нагрузки и температуры ОС [9].

На рис. 1 показана часть индикаторной диаграммы (конец расширения и выпуск свободный и принудительный). Точкой  $b$  обозначено начало открытия выпускного клапана серийного двигателя, а точкой  $b'$  – начало открытия выпускного клапана опытного. Изменяя



**Рис. 2.** Эксергетический коэффициент использования эксергии выпускных газов в турбокомпрессоре ТКР-8,5 при работе двигателя Д-440 на внешней скоростной характеристике.

**Fig. 2.** Exergy coefficient of using exhaust exergy in the TKR-8.5 turbocharger for the D-440 engine operation at the full-load curve.



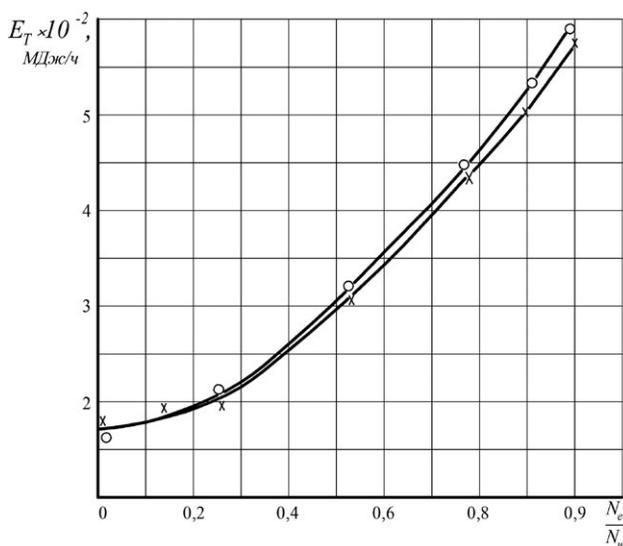
**Рис. 3.** Зависимость коэффициента использования эксергии выпускных газов двигателя СМД-62 в турбокомпрессоре ТКР-11Н-1 по нагрузочной характеристике при  $n_{дв} = 2100 \text{ мин}^{-1}$  -х-х-х- ( $t_{oc} = +24^\circ C$ ); -о-о-о- ( $t_{oc} = -33^\circ C$ ).

**Fig. 3.** Coefficient of usage of the SMD-62 engine exhaust exergy in the TKR-11N-1 turbocharger at load characteristic for  $n_{ен} = 2100 \text{ мин}^{-1}$  -х-х-х- ( $t_{oc} = +24^\circ C$ ); -о-о-о- ( $t_{oc} = -33^\circ C$ ).

положение точки *b* на индикаторной диаграмме, можно настраивать многоступенчатую систему утилизации теплоты ВГ на оптимальные показатели.

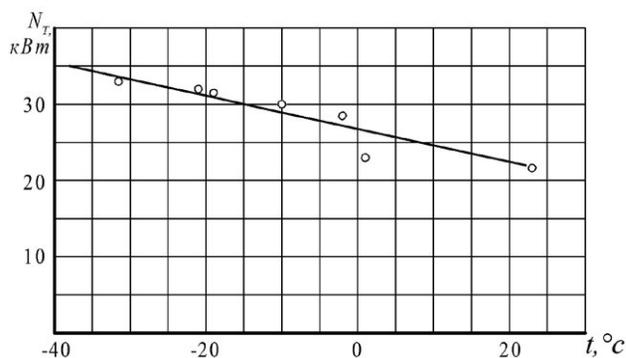
Понижение температуры ОС от плюс 24 °С до минус 33 °С вызывает падение температуры газов перед сопловым аппаратом турбины. Причем степень снижения температуры газов возрастает с увеличением нагрузки. На холостом ходу температура снизилась с 215 °С до 187 °С, а при полной нагрузке – с 680 °С до 560 °С. Причина – увеличение коэффициента избытка воздуха и, как следствие, уменьшение температуры ВГ. В то же время теплоперепад, который определяет адиабатическую работу турбины, возрастает. Например, если при температуре ОС плюс 24 °С и номинальной нагрузке  $\Delta H = 90^\circ$ , то при минус 33 °С –  $\Delta H = 120^\circ$ .

В ходе экспериментальных работ были получены зависимости максимальной потенциальной эксергии ВГ перед входом в турбину при разных нагрузках и температурах ОС (рис. 4). При температуре ОС минус 33 °С эксергия ВГ на 2–3% меньше по сравнению с результатами, которые были получены при температуре плюс 24 °С и прочих равных условиях [12]. Слабую зависимость эксергии ВГ от температуры ОС можно объяснить следующим образом. Дело в том, что с понижением температуры ОС весовое наполнение цилиндров воздухом возрастает. В то же время примерно пропорционально снижается температура ВГ. В итоге независимо от температуры ОС эксергия ВГ практически остается на прежнем уровне. Аналогичную картину можно наблюдать при повышении температуры ОС.



**Рис. 4.** Зависимость максимальной эксергии выпускных газов перед турбокомпрессором от степени загрузки двигателя СМД-62  $n_{дв} = 2100 \text{ мин}^{-1}$  -x-x-x- - ( $t_{oc} = +24^\circ \text{C}$ ); -o-o-o-o- - ( $t_{oc} = -33^\circ \text{C}$ ).

**Fig. 4.** Maximal exhaust exergy at the turbocharger inlet, depending on the load ratio of the SMD-62 engine ( $n_{en}=2100 \text{ min}^{-1}$ ) -x-x-x- - ( $t_{oc} = +24^\circ \text{C}$ ); -o-o-o-o- - ( $t_{oc} = -33^\circ \text{C}$ ).



**Рис. 5.** Зависимость мощности турбокомпрессора ТКР-11Н-1 при 100%-ной нагрузке двигателя СМД-62  $n_{дв} = 2100 \text{ мин}^{-1}$  от температуры ОС.

**Fig. 5.** The TKR-11N-1 turbocharger power at full load of the SMD-62 engine ( $n_{en}=2100 \text{ min}^{-1}$ ), depending on ambient temperature.

На рис. 5 представлена зависимость мощности, развиваемой турбиной, включающая суммарные потери турбокомпрессора ТКР-11Н-1, от температуры ОС. Из рисунка видно, что с понижением температуры ОС с плюс 24 °С до минус 33 °С мощность потока возрастает от 21,2 кВт до 32,1 кВт. Характер представленной зависимости можно объяснить таким образом: с понижением температуры ОС возрастает перепад температур ВГ до турбины и после нее и одновременно вырастает количество ВГ, проходящих через проточную часть турбины в единицу времени. Причина – увеличение плотности воздуха на линии всасывания.

Суммарные потери включают в себя потери теплоты ВГ поверхностью турбины, теплоты воздуха, сжимаемого в компрессоре, потери на трение в подшипниках турбокомпрессора, воздуха и газа о стенки, вихреобразование, потери во вторичных течениях и т.д.

Разбить долю суммарных потерь в турбокомпрессоре на составляющие и оценить каждую из них практически невозможно из-за сложности реальной картины течения газа в проточных частях турбокомпрессора. Снизить долю суммарных потерь можно путем исключения утечек в ОС теплоты ВГ, тщательного согласования характеристик двигателя и турбокомпрессора, а также совершенствованием конструкции и уровня технологии производства.

Во многих источниках по изучению проблем, относящихся к вторичному использованию эксергии ВГ, называют минимальную температуру ОГ, выбрасываемых в ОС, не менее 140 °С. В противном случае возможны нарушения в работе выпускного тракта.

Оставшаяся теплота ВГ после частичной утилизации с помощью турбокомпрессора может быть использована для сокращения времени прогрева до оптимальных рабочих температур рабочих жидкостей в основных системах самоходных машин (автотягачей).

Несложные теплотехнические расчеты показывают, что с учетом эксергии, затраченной на привод

турбокомпрессора, суммарных потерь теплоты в ОС и сохранения минимальной температуры ОГ, выбрасываемых в атмосферу, величина эксергии, которую можно дополнительно использовать в летний период, находится в пределах 330–400 МДж/ч, а в зимний – 250–330 МДж/ч, но это возможно при условии, что нагрузка двигателя находится на уровне 85–95%, что не всегда достижимо.

Там, где имеется избыток бросовой теплоты, ее можно использовать для поддержания оптимальных температур в рефрижераторах для перевозки продуктов питания, овощей и фруктов в любое время года.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрены некоторые особенности создания многоступенчатых систем утилизации эксергии ВГ авто-тракторных двигателей. Предварительные расчеты показали, что суммарные потери эксергии систем охлаждения, смазки и выпуска двигателей мощностью 600–650 кВт могут достигать 1400 МДж/ч и более. Из них до 640 МДж/ч приходится на ВГ.
2. Наиболее ценной является термомеханическая эксергия ВГ. При достаточном количестве термомеханической эксергии она может быть использована для работы силовой турбины на коленчатый вал, двигателя Стирлинга или турбокомпрессора.
3. Установлено, что при работе двигателя Д-440 на внешней скоростной характеристике (режим ДПМ) эксергетический коэффициент использования теплоты в турбокомпрессоре ТКР-8,5 находился в пределах 0,16–0,27. В то же время у турбокомпрессора ТКР-11Н-1 двигателя СМД-62, который работал по нагрузочной характеристике, коэффициент использования теплоты выпускных газов варьировался в пределах 0,08–0,23.
4. На основании анализа экспериментальных данных и их статистической обработки можно сделать вывод, что двигатели средней мощности (до 200 кВт) имеют ограниченные ресурсы бросовой теплоты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Heywood J.B. Internal combustion engine fundamentals. Mc Graw Hill Education, 2018.
2. Крохта Г.М., Хомченко Е.Н., Усатых Н.А. Основные результаты испытаний трактора ДТ-75Т, оборудованного двигателем с двумя уровнями постоянной мощности // XI региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 75-летию Инженерного института «Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования»; Ноябрь 11–12, 2019; Новосибирск. Издательский центр НГАУ «Золотой колос», 2019.
3. Мирмов Н.И., Мирмов И.Н. Абсорбционные холодильные машины для получения отрицательных температур охлаждения //

Теоретически такого показателя должно хватить для обеспечения работы ТКР и поддержания теплового режима в коробке передач и в системе охлаждения двигателя в зимний период.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Г.М. Крохта – поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Е.Н. Хомченко – написание текста рукописи, создание изображений; Н.А. Усатых – редактирование текста рукописи, проведение исследований; А.Б. Иванников – поиск публикаций по теме статьи, проведение исследований. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** G.M. Krokhta – search for publications, writing the text of the manuscript; E.N. Khomchenko – writing the text of the manuscript, creating images; N.A. Usatykh – editing the text of the manuscript, researching; A.B. Ivannikov – search for publications, researching.

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2. С. 328–341.

4. Гетман В.В., Лежнева Н.В. Методы утилизации теплоты уходящих газов от энергетических установок // Вестник Казанского технологического университета, 2013. Т. 16, № 12. С. 104–107.
5. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В., Жданов Н.В., и др. Выбор схемы утилизации тепла отработавших газов поршневых ДВС и оценка полезного теплоиспользования в составе когенерационной установки // Омский научный вестник. 2015. № 1. С. 114–119.
6. Sayin Kul B., Kahraman A. Energy and Exergy Analyses of a Diesel Engine Fuelled with Biodiesel-Diesel Blends Containing 5% Bioethanol // Entropy. 2016. Vol. 18, N 11. doi: 10.3390/e18110387

7. Белов П.Н. Бурячко В.Р., Акатов Е.И. Двигатели армейских машин, часть I. Теория. Москва: Воениздат, 1971.
8. Архаров А.М., Исаев С.И., Кожин И.А. Теплотехника: учебник для студентов вузов. Москва: Машиностроение, 1986.
9. Патент СССР на изобретение № 1590588/ 07.09.1990. Бюл. № 33. Крохта Г.М., Усатых Н.А., Романов В.И. Способ работы двигателя внутреннего сгорания. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40664264> Дата обращения: 20.08.2022.

10. Крохта Г.М., Хомченко Е.Н. Эксергетическая оценка эффективности газотурбинного наддува тракторного двигателя // Вестник НГАУ. 2013. № 1. С. 135–140.
11. Бродянский В.М. Эксергетический метод и перспективы его развития // Теплоэнергетика. 1988. № 2. С. 14–17.
12. Крохта Г.М. Особенности эксплуатации тракторов в условиях низких температур: монография. Новосибирск: «Золотой колос», 2017.

## REFERENCES

1. Heywood JB. *Internal combustion engine fundamentals*. Mc Graw Hill Education; 2018.
2. Krokhta GM, Khomchenko EN, Usatykh NA. Osnovnye rezul'taty ispytaniy traktora DT-75T, oborudo-vannogo dvigatelem s dvumya urovnyami postoyannoi moshchnosti. Proceedings of the 9th Russian regional science conference «Sostoyanie i innovatsii tekhnicheskogo servisa mashin i oborudovaniya»; 2019 Nov 11–12; Novosibirsk. Izdatel'skii tsentr NGAU «Zolotoi kolos»; 2019. (In Russ).
3. Mirmov NI, Mirmov IN. Absorbtsionnye kholodil'nye mashiny dlya polucheniya otritsatel'nykh temperatur okhlazhdeniya. *Proceedings of BTSU. Issue 1, Forestry, Nature Management, Processing of Renewable Resources*. 2017;(2):328–341. (In Russ).
4. Getman VV, Lezhneva NV. Metody utilizatsii teploty ukhodyashchikh gazov ot energeticheskikh ustanovok. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013;16(12):104–107. (In Russ).
5. Vedruchenko VR, Krainov VV, Zhdanov NV, et al. Choosing utilization scheme of free-piston engines exhaust gases and estimating engines real heat consumption in the structure of cogeneration engine. *Ornsk Scientific Bulletin*. 2015;1:114–119. (In Russ).
6. Sayin Kul B, Kahraman A. Energy and Exergy Analyses of a Diesel Engine Fuelled with Biodiesel-Diesel Blends Containing 5% Bioethanol. *Entropy*. 2016;18(11). doi: 10.3390/e18110387
7. Belov PN, Buryachko VR, Akatov EI. *Dvigateli armeiskikh mashin, chast' I. Teoriya*. Moscow: Voenizdat; 1971. (In Russ).
8. Arkharov AM, Isaev SI, Kozhinov IA. *Teplotekhnika: Uchebnik dlya studentov vtuzov*. Moscow: Mashinostroenie; 1986. (In Russ).
9. Patent SU №1590588/ 07.09.1990. Byul. №33. Krokhta GM, Usatykh NA, Romanov VI. *Method of I.C. engine operation*. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=40664264> (In Russ).
10. Krokhta GM, Khomchenko EN. Eksergeticheskaya otsenka effektivnosti gazoturbinnogo nadduva traktor-nogo dvigatelya. *Vestnik NGAU*. 2013;(1):135–140. (In Russ).
11. Brodyanskii VM. Eksergeticheskii metod i perspektivy ego razvitiya. *Teplenergetika*. 1988;(2):14–17. (In Russ).
12. Krokhta GM. *Osobennosti ekspluatatsii traktorov v usloviyakh nizkikh temperatur: monografiya*. Novosibirsk: «Zolotoi kolos»; 2017. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

**\*Крохта Геннадий Михайлович**, д.т.н., профессор кафедры «Сельскохозяйственные машины»; адрес: Россия, 630039, г. Новосибирск, ул. Добролюбова-160; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5686-0876>; eLibrary SPIN: 3324-4788; e-mail: mshipo@mail.ru

**Хомченко Егор Николаевич**, к.т.н., заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0805-9766>; eLibrary SPIN: 2632-5221; e-mail: mshipo@mail.ru

**Усатых Николай Александрович**, старший преподаватель кафедры «Сельскохозяйственные машины»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9627>; eLibrary SPIN: 9542-7408; e-mail: mshipo@mail.ru

**Иванников Алексей Борисович**, к.т.н., ведущий научный сотрудник; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-0146>; eLibrary SPIN: 2305-9701; e-mail: alekc73@rambler.ru

\*Автор для переписки

## AUTHORS' INFO

**\*Gennady M. Krokhta**, Professor, Dr. Sci. (Engin.), Professor of the Agricultural Machinery Department; address: 160 ul. Dobrolyubova, Novosibirsk, 630039, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5686-0876>; eLibrary SPIN: 3324-4788; e-mail: mshipo@mail.ru

**Egor N. Khomchenko**, Cand. Sci. (Engin.), Head of the Agricultural Machinery Department; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0805-9766>; eLibrary SPIN: 2632-5221; e-mail: mshipo@mail.ru

**Nikolai A. Usatykh**, Senior Lecturer of the Agricultural Machinery Department; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8609-9627>; eLibrary SPIN: 9542-7408; e-mail: mshipo@mail.ru

**Alexey B. Ivannikov**, Cand. Sci. (Engin.), Leading Researcher; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-0146>; eLibrary SPIN: 2305-9701; e-mail: alekc73@rambler.ru

\*Corresponding author

УДК 631.31(470.44)

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-105085>

Оригинальное исследование

## Результаты экспериментальных исследований плуга для агрегатирования с тракторами тягового класса 3

В.М. Бойков, С.В. Старцев, А.В. Павлов, Е.С. Нестеров

Саратовский государственный аграрный университет, Саратов, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Для выращивания сельскохозяйственных культур широко применяется технология основной отвальной обработки почвы. На нее затрачивается более 40% энергетических ресурсов, что обусловлено тяговым сопротивлением рабочих органов плугов общего назначения. Технологический процесс вспашки такими органами исторически не претерпел особых изменений. Подрезание почвенного пласта осуществляется лемехом, крошение и оборот отвалом, устойчивость движения корпуса обеспечивается полевой доской. При этом на долю сопротивления полевой доски приходится до 20% суммарной составляющей тягового сопротивления корпуса плуга. Для снижения тягового сопротивления в Саратовском ГАУ разработан корпус плуга, у которого полевая доска отсутствует.

**Цель работы** – определение тягово-эксплуатационных показателей лемешно-отвального плуга ПБС-5М для агрегатирования с тракторами тягового класса 3 на тяжелосуглинистых почвах.

**Материалы и методы.** Опыты проводились на дискованном поле после уборки озимого ячменя в Новокубанском районе Краснодарского края. Влажность почвы в слое от 0 до 30 см составляла от 16,4 до 19,7%, твердость почвы – от 1,86 до 2,74 МПа. Масса растительных и пожнивных остатков на участке составляла в среднем 185 г/м<sup>2</sup>, а высота сорных растений в среднем была 10,8 см.

**Результаты.** Установлены тягово-эксплуатационные показатели пахотного агрегата, состоящего из серийного трактора тягового класса 3 Т-150К и экспериментального плуга ПБС-5М. Опыты проведены в двух вариантах: в комплектации плуга из пяти корпусов при рабочей ширине захвата 2,83 м и вспашке почвы глубину 22 см; в четырехкорпусной комплектации при рабочей ширине захвата плуга 2,27 м на глубину 30 см. В первом варианте режим движения Т-150К+ПБС-5М изменялся в диапазоне рабочей скорости от 7,27 до 9,2 км/ч, во втором до 5,72 км/ч. Определена энергоемкость пятикорпусного плуга, соответствующая показателям тяговой и мощностной характеристикам трактора тягового класса 3 с небольшим запасом мощности 2,87%. Для работы четырехкорпусного плуга ПБС-5М требуется мощность практически равная эксплуатационной мощности двигателя трактора Т-150К.

**Выводы.** В результате экспериментальных исследований пахотного агрегата Т-150К+ПБС-5М при обработке дискованного поля после уборки озимого ячменя установлено, что плуг может агрегатироваться тракторами тягового класса 3. Рациональный режим работы плуга в пятикорпусном исполнении обеспечивается при скорости движения 7–8 км/ч и глубине хода рабочих органов 22–21 см. Производительность за время основной работы агрегата составила 2,1–2,3 га/ч, расход топлива 12,9–12,7 кг/га. Удельные энергозатраты агрегата 47,5–46,78 кВт·ч/га, а плуга 31,26–31,4 кВт·ч/га. Загрузка двигателя при буксовании движителей трактора 6,9–9,7% составила 78–86%. При увеличении скорости движения агрегата и увеличении глубины хода рабочих органов значения показателей удельных энергозатрат агрегата и плуга увеличиваются. В полевых исследованиях установлено, что для агрегатирования плуга при скорости до 10 км/ч и глубине вспашки до 30 см в данных агротехнических условиях необходимо применение энергосредства более высокого тягового класса.

**Ключевые слова:** плуг; трактор; агрегат; скорость; ширина захвата; глубина; мощность; тяговое усилие; производительность; расход топлива.

### Для цитирования:

Бойков В.М., Старцев С.В., Павлов А.В., Нестеров Е.С. Результаты экспериментальных исследований плуга для агрегатирования с тракторами тягового класса 3 // *Тракторы и сельхозмашины*. 2022. Т. 89, № 3. С. 207–213. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-105085>

Рукопись получена: 18.03.2022

Рукопись одобрена: 18.04.2022

Опубликована: 15.07.2022

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-105085>

Original study article

# Results of experimental studies of the plow for coupling with drawbar category 3 tractors

Vasily M. Boykov, Sergey V. Startsev, Andrey V. Pavlov, Evgeny S. Nesterov

Saratov State Agrarian University, Saratov, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** For the cultivation of agricultural crops, the technology of basic dump tillage is widely used. More than 40% of energy resources are spent on it, due to the traction resistance of the working bodies of general-purpose plows. The technological process of plowing with such bodies has not changed much historically. Pruning of the soil layer is carried out with a ploughshare, crumbling and turning are carried out with a blade, the stability of the movement of the body is provided by a landside plate. At the same time, the resistance of a landside plate accounts for up to 20% of the total component of the traction resistance of the plow body. To reduce the traction resistance, the plow body without a landside plate has been developed in the Saratov State Agrarian University.

**AIMS:** Determination of towing and operational characteristics of the PBS-5M ploughshare for coupling with drawbar category 3 tractors and operation on heavy loamy soils.

**METHODS:** The experiments were carried out on the field, cultivated with a disk harrow after winter barley harvesting, in Novokubansky district of Krasnodar Region. The 0–30 cm soil layer had moisture ranged from 16.4 to 19.7% and hardness ranged from 1.86 to 2.74 MPa. The mass of plant and crop residues on the site averaged 185 g/m<sup>2</sup>, and the average height of weed plants was 10.8 cm.

**RESULTS:** The towing and operational characteristics of the plowing unit, consisting of a serial T-150K drawbar category 3 tractor and an experimental PBS-5M plow, have been determined. The experiments were carried out for two variants of the plow. The first variant has the five-body configuration of the plow with the working grip width of 2.83 m and the plowing depth of 22 cm. The second variant has the four-body configuration of the plow with the working grip width of 2.27 m and the plowing depth of 30 cm. The driving mode of the first variant of the T-150K+PBS-5M unit varied in the operating velocity range from 7.27 to 9.2 km/h, the driving mode of the second variant of the unit was with the operating velocity up to 5.72 km/h. The energy intensity of the five-body plow was determined, corresponding to the traction and power characteristics of a drawbar category 3 tractor with a small power reserve of 2.87%. The PBS-5M four-body plow requires the power, almost equal to the operational power of the T-150K tractor engine.

**CONCLUSIONS:** As a result of experimental studies of the T-150K+PBS-5M plowing unit when processing the field, cultivated with a disk harrow after winter barley harvesting, it was found that the plow can be coupled with tractors of drawbar category 3. The reasonable mode of operation of the plow with the five-body configuration is provided at the velocity of 7–8 km/h and the plowing depth of 21–22 cm. The output during the main operation time of the unit was 2.1–2.3 ha/h, the fuel consumption was 12.9–12.7 kg/ha. The specific energy consumption of the unit was 47.5–46.78 kWh/ha, and the specific energy consumption of the plow was 31.26–31.4 kWh/ha. The engine load with the track skidding of 6.9–9.7% was 78–86%. With increasing unit velocity and increasing plowing depth, the values of the specific energy consumption of the unit and the plow raise as well. In field studies, it was found that it is necessary to use the tractor of higher drawbar category in order to couple the plow for the velocity up to 10 km/h and the plowing depth up to 30 cm in these agrotechnical conditions.

**Keywords:** *plow; tractor; unit; velocity; grip width; depth; power; towing force; performance; fuel consumption.*

## Cite as:

Boikov VM, Startsev SV, Pavlov AV, Nesterov ES. Results of experimental studies of the plow for coupling with drawbar category 3 tractors. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):207–213. DOI: <https://orcid.org/10.17816/0321-4443-105085>

Received: 18.03.2022

Accepted: 18.04.2022

Published: 15.07.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Для выращивания сельскохозяйственных культур широко применяется технология основной отвальной обработки почвы. На нее затрачивается более 40% энергетических ресурсов [1–3], что обусловлено тяговым сопротивлением рабочих органов плугов общего назначения [4–6]. Технологический процесс вспашки такими органами, от создания плуга и по настоящее время, исторически не претерпел особых изменений. Подрезание почвенного пласта осуществляется лемехом, крошение и оборот отвалом, устойчивость движения корпуса обеспечивается полевой доской [3, 5–8]. При этом на долю сопротивления полевой доски приходится до 20% суммарной составляющей тягового сопротивления корпуса плуга [7, 8]. Улучшению энергетических показателей работы лемешно-отвального корпуса посвящено много исследований [9–15]. Изменялась форма и геометрия лемеха, сплошной отвал заменялся полосовым, уменьшалась площадь полевой доски. Для снижения тягового сопротивления в Саратовском ГАУ разработан корпус плуга, у которого полевая доска отсутствует. Устойчивость движения корпуса выполняет левый лемех, закрепленный со стороны необработанной части почвы [16, 17]. Корпус (рис. 1) состоит из стойки 1, правого лемеха 2, отвала 3 и левого лемеха 4. Новые корпуса устанавливаются на плуги серии ПБС (рис. 2) и предназначены для выполнения основной технологической операции – подрезания, крошения и оборота пласта почвы [17]. Боковой левый лемех, установленный вместо полевой доски, подрезает необработанный слой почвы, обеспечивая горизонтальную устойчивость плуга. Экспериментальный плуг ПБС-5М по своим характеристикам предназначен для отвальной обработки почв под зерновые

и технические культуры на глубину до 30 см, не засоренных плитняком, камнями и другими препятствиями, с удельным сопротивлением до 0,14 МПа, твердостью почвы до 4 МПа и влажностью до 30%.

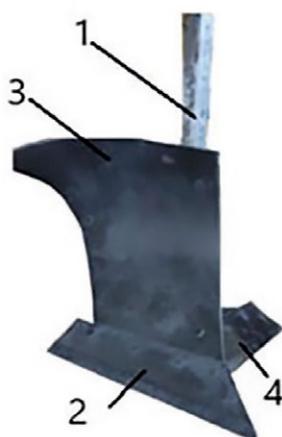
Конструкция плуга ПБС-5М (рис. 2) включает в себя следующие основные механизмы и узлы: раму 1 с навеской 2, реечные механизмы регулировки глубины обработки с опорными пневматическими колесами 3 и пять корпусов 4, закрепленных на основном бруске рамы 1.

Технологический процесс работы плуга ПБС-5М осуществляется следующим образом. Агрегат с отрегулированным на заданную глубину плугом переводится из транспортного положения в рабочее на краю поля и трактор выполняет рабочий ход. Слой почвы подрезается правым лемехом, проходя через крыло отвала корпуса, крошится и оборачивается, заделывая пожнивные остатки и сорные растения, находящиеся на поверхности. После завершения рабочего хода оператор трактора переводит агрегат в транспортное положение, выполняет холостой ход с разворотом для совершения следующего рабочего хода с чередованием способов движения всвал и вразвал.

**Цель работы** – исследование на тяжелосуглинистых почвах тягово-эксплуатационных показателей лемешно-отвального плуга ПБС-5М для агрегатирования с тракторами тягового класса 3 [19, 20].

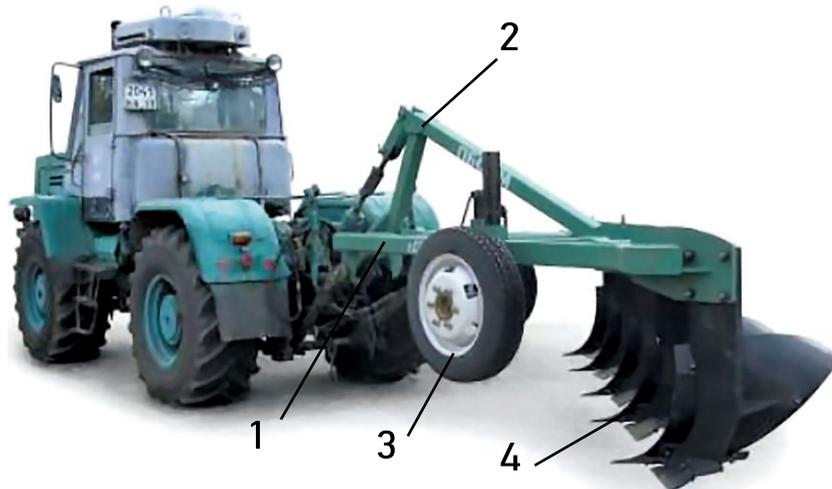
## МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Лабораторно-полевые испытания проводились на опытном участке поля, расположенном в подзоне тяжелосуглинистых почв ООО «Парус АгроГруп» Новокубанского района Краснодарского края. Энергетические испытания выполнялись с помощью тягового тензозвена



**Рис. 1.** Корпус плуга: 1 – стойка; 2 – правый лемех; 3 – отвал; 4 – левый лемех.

**Fig 1.** Plow body: 1 – leg; 2 – right plowshare; 3 – blade; 4 – left plowshare.



**Рис. 2.** Навесной плуг ПБС-5М в агрегате с трактором Т-150К: 1 – рама; 2 – навеска; 3 – опорное колесо; 4 – корпус.

**Fig 2.** The PBS-5M pickup plow, coupled with the T-150K tractor: 1 – frame; 2 – lift hitch; 3 – support wheel; 4 – body.

и измерительно-регистрающей аппаратуры. Условия характеризовались следующими показателями: влажность почвы в обрабатываемом горизонте от 0 до 30 см составляла от 16,4 до 19,7%, твердость почвы – от 1,86 до 2,74 МПа. Масса растительных и пожнивных остатков на учетной площадке составляла в среднем 185 г/м<sup>2</sup>, а высота сорных растений в среднем была 10,8 см. Обрабатываемое поле имело ровный рельеф и микрорельеф. Зачетные делянки, на которых проводились измерения, были разбиты на ровном горизонтальном участке поля. Определение производительности плуга в опытах обеспечивалось изменением поступательной скорости машинно-тракторного агрегата. Импульсы времени движения, тягового сопротивления и расхода топлива регистрировались с момента входа агрегата в зачетную делянку с установившейся скоростью и выхода агрегата из нее. Энергетические показатели машины рассчитывались по результатам первичных данных энергооценки по ГОСТ Р 52777-2007.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В лабораторно-полевых исследованиях, в процессе которых определяли тягово-эксплуатационные показатели, использовали серийный трактор тягового класса 3 Т-150К [21] и плуг ПБС-5М [17]. Конструктивная ширина захвата плуга составляла 3,0 м. Энергетическую оценку проводили на отвальной обработке почвы после дискового лущения стерни озимого ячменя (рис. 3) в двух вариантах. В первом варианте вспашка выполнялась на установочную глубину 22 см плугом ПБС-5М в пятикорпусной комплектации. Во втором варианте – на установочную глубину 30 см плугом ПБС-5М в четырехкорпусной комплектации.

В первом варианте режим движения Т-150К+ПБС-5М изменялся в диапазоне рабочей скорости от 7,27 до 9,2 км/ч, показатели тягового сопротивления 32,5–32,08 кН практически не изменялись и составляли 90,28–89,0% от номинального тягового усилия энергосредства 36 кН [20, 21]. Мощность трактора, затрачиваемая на преодоление тягового сопротивления плугом на выполнение техпроцесса, составила 65,63–81,98 кВт или 66,97–67,2% эффективной мощности двигателя. При буксовании колес трактора по дискованному фону в диапазоне 6,9–14%, общая загрузка двигателя Т-150К составила 78,02–97,13% от эксплуатационной мощности трактора. Отвальная обработка почвы на глубину 22 см на третьей передаче трактора Т-150К, соответствующей рабочей скорости движения 9,2 км/ч, экспериментальным плугом ПБС-5М при рабочей ширине захвата 2,83 м, производительность получена за время основной работы агрегата 2,6 га/ч, а погектарный расход топлива – 11,94 кг/га.

Исследования тягово-эксплуатационных показателей по второму варианту показали, что агрегат Т-150К+ПБС-5М, оснащенный четырьмя корпусами при обработке почвы на глубину 30 см, в сопоставимых условиях, может работать на одной скорости – 5,72 км/ч. Мощность трактора, затрачиваемая на преодоление тягового сопротивления плугом, составила 69,62 кВт, а с учетом затрат мощности на самопередвижение трактора без плуга – 125,5 кВт от расходуемой мощности двигателя, что практически равняется эксплуатационной мощности двигателя Т-150К, лишь с некоторым запасом мощности 0,1%. В этом режиме движения (рабочая скорость движения 5,72 км/ч, первая передача трактора) отвальная обработка почвы на глубину 30 см и при рабочей ширине захвата плуга



**Рис. 3.** Вспашка поля агрегатом Т-150К+ПБС-5М.

**Fig 3.** Field plowing with the T-150K+PBS-5M unit.

2,27 м, возможна с производительностью (время основной работы) агрегата 1,3 га/ч и погектарным расходом топлива – 24,35 кг/га.

На основании вышеизложенного установлено, что энергоёмкость пятикорпусного плуга ПБС-5М при данных условиях и режимах работы соответствует показателям тяговой и мощностной характеристик трактора тягового класса 3 [10] с небольшим запасом мощности 2,87%, которого не достаточно для работы агрегата на скорости свыше 9,0 км/ч и глубине более 22,0 см.

Анализ данных составляющих баланса мощности двигателя трактора Т-150К в агрегате с четырехкорпусным плугом ПБС-5М по второму варианту показал, что мощность необходимая для работы плуга, почти равна эксплуатационной мощности двигателя и трактор может выполнять технологический процесс отвальной обработки почвы только на первой передаче с некоторым запасом мощности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований пахотного агрегата Т-150К+ПБС-5М при обработке дискованного поля после уборки озимого ячменя установлено, что плуг может агрегатироваться тракторами тягового класса 3. Рациональный режим работы плуга в пятикорпусном исполнении обеспечивается при скорости движения 7–8 км/ч и глубине хода рабочих органов 22–21 см. Производительность за время основной работы агрегата составила 2,1–2,3 га/ч, расход топлива 12,9–12,7 кг/га. Удельные энергозатраты агрегата 47,5–46,78 кВт·ч/га, а плуга 31,26–31,4 кВт·ч/га. Загрузка двигателя при буксовании движителей трактора 6,9–9,7% составила 78–86%. При увеличении скорости движения агрегата и увеличении глубины хода рабочих органов значения показателей удельных энергозатрат агрегата и плуга увеличиваются. В полевых исследованиях установлено, что для агрегатирования плуга при скорости до 10 км/ч и глубине вспашки до 30 см в данных агротехнических условиях необходимо применение энергосредства более высокого тягового класса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Панов И.М., Орлов Н.М. Основные пути снижения энергозатрат при обработке почвы // Тракторы и сельхозмашины. 1997. Т. 8. С. 27–30.
2. Бородычев В.В., Шевченко В.А., Новиков А.Е. Энергетическая оценка тягово-эксплуатационных показателей чизельных и лемешных орудий на тяжелосуглинистых орошаемых почвах // Плодородие. 2017. № 6. С. 31–34.
3. Халанский В.М., Горбачев И.В. Сельскохозяйственные машины. Москва: Колосс, 2003.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНО

**Вклад авторов.** В.М. Бойков – научное руководство, постановка задачи, критический анализ и доработка решения. С.В. Старцев – определение методологии исследования, сбор и анализ практических материалов по теме исследования, формирование общих выводов, критический анализ и доработка решения. А.В. Павлов – организация экспериментальных исследований, обработка результатов исследований. Е.С. Нестеров – анализ научных источников по теме исследования, обработка результатов исследований, анализ и доработка текста.

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли равноправный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** V.M. Boikov is responsible for scientific guidance, problem statement, critical analysis and revision of the solution. S.V. Startsev is responsible for definition of research methodology, collection and analysis of practical materials on the research topic, formation of general conclusions, critical analysis and revision of the solution. A.V. Pavlov is responsible for organization of experimental research, processing of research results. E.S. Nesterov is responsible for analysis of scientific sources on the research topic, processing of research results, analysis and revision of the text. All authors certify that they meet the ICMJE international criteria for authorship.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

4. Трубилин Е.И., Белоусов С.В., Лепшина А.И. Результаты экспериментальных исследований определения степени тягового сопротивления лемешного плуга при обработке тяжелых почв // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/09/pdf/41.pdf> Дата обращения 20.06.2022.

5. Василенко В.В., Василенко С.В., Хахулин А.Н. Плуг с полным оборотом пластов // Вестник ВГАУ: Теоре-

- тический и научно-практический журнал. 2015. № 4. С. 122–125.
6. Трубилин Е.Е., Коновалов В.И., Коновалов С.И. Теоретическое обоснование параметров цилиндрической полевой доски плуга // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2018. № 137. С. 46–60.
7. Николаев В.А., Попов Д.В. Затраты энергии на преодоление трения полевой доски плуга о почву // Тракторы и сельхозмашины. 2010. № 11. С. 18–20.
8. Свечников П. Г. Форма двугранного клина с минимальным залипанием // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 12. С. 24–25.
9. Бурченко П.Н. Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения: монография. Москва: ВИМ, 2002.
10. Афонин А.Е. Повышение эффективности использования отвальных плугов совершенствованием рабочих органов: автореф. дис... канд. техн. наук. Мичуринск, 2007. – 18 с. Режим доступа: <https://tekhnosfera.com/povyshenie-effektivnosti-ispolzovaniya-otvalnyh-plugov-putyom-sovershenstvovaniya-rabochih-organov> Дата обращения 20.06.2022.
11. Дьяченко Т.Н., Антибас И. Характер перемещения почвы по поверхности клинового рабочего органа // Вестник ДГТУ. 2003. Т. 3, № 1. С. 53–60.
12. Лобачевский Я.П. Влияние сил трения и прилипания почвы на технологический процесс почвообрабатывающих рабочих органов // Развитие технической базы агропромышленного комплекса. 2000. С.47–53.
13. Кленин Н.И., Киселев С.Н., Левшин А.Г. Сельскохозяйственные машины. Москва: Колосс, 2008.
14. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., et al. Modeling the technological process of tillage // *Soil and Tillage Research*. 2019. Vol. 190, N P. 70–77. doi: 10.1016/j.still.2018.12.004
15. Мударисов С.Г., Рахимов И.Р., Разбежкин Н.И. Моделирование износа корпуса плуга // Достижения науки и техники АПК. 2006. № 8. С. 35–37.
16. Путрин А.С. Основы проектирования рабочих органов для рыхления почв, находящихся за пределами физически спелого состояния: дис. ... д-ра техн. наук. Оренбург, 2003.
17. Навесные плуги ПБС. Режим доступа: <https://плугипбс.рф/> Дата обращения 20.06.2022.
18. Сравнительный анализ технического уровня плугов по результатам испытаний на машиноиспытательных станциях // ФГБУ ГИЦ. 2014. С. 110.
19. Карабаницкий А.П., Юдина Е.М., Цыбулевский В.В. Теоретическое обоснование параметров энергосберегающих машинно-тракторных агрегатов / под. ред. Г.Г. Маслова. Краснодар: КубГАУ, 2014.
20. ГОСТ 27021-86 (СТ СЭВ 628-85). Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Тяговые классы. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294827/4294827535.pdf> Дата обращения: 20.06.2022.
21. Кашуба Б.П. Трактор Т-150К. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Харьков: Прапор, 1983.

## REFERENCES

1. Panov IM, Orlov NM. Osnovnye puti snizheniya energozatrat pri obrabotke pochvy. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 1997;8:27–30. (In Russ).
2. Borodychev V.V., Shevchenko V.A., Novikov A.E., i dr. Energeticheskaya otsenka tyagovo-ekspluatatsionnykh pokazatelei chizel'nykh i lemshnykh orudii na tyazhelosuglinistykh oroshaemykh pochvakh. *Plodorodie*. 2017;(6):31–34. (In Russ).
3. Khalanskii VM, Gorbachev IV. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny*. Moscow: Koloss; 2003. (In Russ).
4. Trubilin EI, Belousov SV, Lepshina AI. The results of experimental studies to determine the degree of traction resistance reversible plow in heavy soils. *Polythematic network electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University*. Available from: <http://ej.kubagro.ru/2014/09/pdf/41.pdf> (In Russ).
5. Vasilenko V.V., Vasilenko S.V., Khakhulin A.N. Plug s polnym oborotom plastov. *Vestnik VGAU: Teoreticheskii i nauchno-prakticheskii zhurnal*. 2015;(4):122–125. (In Russ).
6. Trubilin E.I., Kononov V.I., Kononov S.I., et al. Theoretical justification of parameters of a plow cylindrical field board. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2018;(137):46–60. (In Russ).
7. Nikolaev VA, Popov DV. Energy consumption for overcoming friction of plough landside against the soil. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2010;(11):18–20. (In Russ).
8. Svechnikov PG. Forma dvugrannogo klina s minimal'nyim zalipaniem. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2011;(12):24–25.
9. Burchenko PN. Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy pochvoobrabatyvayushchikh mashin novogo pokoleniya: monografiya. Moscow: VIM; 2002. (In Russ).
10. Afonin AE. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya otval'nykh plugov sovershenstvovaniem rabochikh organov*. [dissertation]. Michurinsk, 2007. Available from: <https://tekhnosfera.com/povyshenie-effektivnosti-ispolzovaniya-otvalnyh-plugov-putyom-sovershenstvovaniya-rabochih-organov> (In Russ).
11. D'yachenko TN, Antibas I. Kharakter peremeshcheniya pochvy po poverkhnosti klinovogo rabocheho organa. *Vestnik DGTU*. 2003;3(1):53–60. (In Russ).
12. Lobachevskii YaP. Vliyanie sil treniya i prilipaniya pochvy na tekhnologicheskii protsess pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov. *Razvitie tekhnicheskoi bazy agropromyshlennogo kompleksa*. 2000:47–53. (In Russ).
13. Klenin NI, Kiselev SN, Levshin AG. *Sel'skokhozyaistvennye mashiny*. Moscow: Koloss; 2008. (In Russ).
14. Mudarisov SG, Gabitov II, Lobachevsky YP, et al. Modeling the technological process of tillage. *Soil and Tillage Research*. 2019;190:70–77. doi: 10.1016/j.still.2018.12.004
15. Mudarisov SG, Rakhimov IR, Razbezhkin NI. Modelirovanie iznosa korpusa pluga. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2006;(8):35–37. (In Russ).
16. Putrin AS. *Osnovy proektirovaniya rabochikh organov dlya rykhleniya pochv, nakhodyashchikhsya za predelami fizicheskii spelogogo sostoyaniya*. [dissertation]. Orenburg, 2003. (In Russ).

17. Navesnye plugi PBS. Available from: <https://plugipbs.rf/> Accessed Jun 20, 2022. (In Russ).
18. Sravnitel'nyi analiz tekhnicheskogo urovnya plugov po rezul'tatam ispytaniy na mashinoispytatel'nykh stantsiyakh. *FGBU GITs*. 2014:110. (In Russ).
19. Karabanitskii AP, Yudina EM, Tsybulevskii VV, et al. *Teoreticheskoe obosnovanie parametrov energosberegayushchikh*

- mashinno-traktornykh agregatov*. Maslov G.G. editor. Krasnodar: KubGAU; 2014. (In Russ).
20. GOST 27021-86 (ST SEV 628-85). Traktory sel'skokhozyaistvennyye i lesokhozyaistvennyye. Tyagovye klassy. Available from: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294827/4294827535.pdf> (In Russ).
21. Kashuba B.P. Traktor T-150K. *Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii*. Khar'kov: Prapor, 1983.

## ОБ АВТОРАХ

### \*Старцев Сергей Викторович,

профессор, доктор технических наук,  
профессор кафедры «Техническое обеспечение АПК»;  
адрес: Россия, 410056, Саратов, ул. Советская, 60;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3310-0035>;  
eLibrary SPIN: 4856-1685;  
e-mail: kingofscience@yandex.ru

### Бойков Василий Михайлович,

профессор, доктор технических наук,  
профессор кафедры «Техническое обеспечение АПК»;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6933-8216>;  
eLibrary SPIN: 4235-8531;  
e-mail: kingofscience@yandex.ru

### Павлов Андрей Владимирович,

доцент, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК»;  
eLibrary SPIN: 2916-7482;  
e-mail: andrej.pavloff2015@yandex.ru

### Нестеров Евгений Сергеевич,

доцент, кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Техническое обеспечение АПК»;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0870-7516>;  
eLibrary SPIN: 9820-4786;  
e-mail: nesterov21@mail.ru

\*Автор для переписки

## AUTHORS' INFO

### \*Sergey V. Startsev,

Professor, Dr. Sci. (Engin.),  
Professor of the Technical Support  
of the Agro-Industrial Complex Department;  
address: 60 Sovetskaya street, Saratov, 410056, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3310-0035>;  
eLibrary SPIN: 4856-1685;  
e-mail: kingofscience@yandex.ru

### Vasiliy M. Boykov,

Professor, Dr. Sci. (Engin.),  
Professor of the Technical Support  
of the Agro-Industrial Complex Department;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6933-8216>;  
eLibrary SPIN: 4235-8531;  
e-mail: kingofscience@yandex.ru

### Andrey V. Pavlov,

Associate Professor, Cand. Sci. (Engin.),  
Associate Professor of the Technical Support  
of the Agro-Industrial Complex Department;  
eLibrary SPIN: 2916-7482;  
e-mail: andrej.pavloff2015@yandex.ru

### Evgeniy S. Nesterov,

Associate Professor, Cand. Sci. (Engin.),  
Associate Professor of the Technical Support  
of the Agro-Industrial Complex Department;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0870-7516>;  
eLibrary SPIN: 9820-4786;  
e-mail: nesterov21@mail.ru

\*Corresponding author

УДК 631.358:633.5

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106770>

Оригинальное исследование

## Особенности плющения стеблей при двухфазной технологии уборки льна-долгунца

А.Н. Зинцов, В.А. Добрецов, В.Н. Соколов

Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Кострома, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** На основе анализа морфологических особенностей льна-долгунца авторы акцентируют внимание на технической части стебля, в которой содержится волокно. Для повышения качества и наиболее полного выделения этого продукта следует активизировать процесс мацерации тканей путем плющения стебля.

**Цель работы** – изыскание методов и средств получения максимального эффекта от применения двухфазной технологии уборки льна путем обеспечения равномерной вылежки по всей технической длине стеблей, начиная с самых ранних этапов уборочных работ.

**Материалы и методы.** Отмечено, что наибольший эффект от плющения может быть достигнут при двухфазной уборке льна. Однако все известные способы и устройства предполагают разрыв во времени между плющением различных частей растения, что приводит к запаздыванию начала мацерации в необработанных участках стебля, затягиванию сроков уборки и снижению качества волокна. Поэтому производить плющение стеблей следует сразу по всей их технической длине на самых ранних этапах одновременно с тереблением льна, не подвергая плющению только оставшуюся часть общей длины растений, на которой расположены семенные коробочки.

**Результаты.** Установлено, что размер зоны плющения в ленте растений не является постоянным. Поэтому для уменьшения вероятности повреждения семенных коробочек плющильными вальцами путем соблюдения высокой точности реализации предлагаемого способа необходимо верхнюю кромку плющильных вальцов располагать на уровне верхней границы технической длины растений, формировать равномерный по высоте стеблестой с компактной зоной расположения семенных коробочек, уменьшать галопирование теребильных машин при движении по неровностям поверхности поля и применять такие рабочие органы, которые обеспечивают минимальную растянутость стеблей в формируемой ленте.

**Заключение.** Анализ существующих средств механизации показал, что для реализации предложенного способа следует отдавать предпочтение более легкой и дешевой прицепной теребилке ТЛП-1,5К и оснастить ее плющильным аппаратом.

**Ключевые слова:** лен-долгунец; двухфазная технология уборки; теребилка; стебли; волокно; мацерация; плющильный аппарат; валец.

### Для цитирования:

Зинцов А.Н., Добрецов В.А., Соколов В.Н. Особенности плющения стеблей при двухфазной технологии уборки льна-долгунца // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 3. С. 215–222. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106770>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106770>

Original study article

# Peculiarities of stems flattening at two-phase fiber flax harvesting technology

Alexander N. Zintsov, Vyacheslav A. Dobretsov, Valery N. Sokolov

Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Based on the analysis of the morphological features of fiber flax, authors focus on the technical part of the stem, which contains fiber. To improve the quality and for most complete isolation of this product, the process of tissue maceration should be stimulated by stem flattening.

**AIMS:** Search of methods and means of obtaining the maximum effect from the use of two-phase flax harvesting technology, by ensuring uniform flattening along the entire technical length of the stems, starting from the earliest stages of harvesting.

**METHODS:** It is noted that the greatest effect of flattening can be achieved with two-phase flax harvesting. However, all known methods and devices involve a time gap between the flattening of different parts of a plant, which leads to a delay in the onset of maceration in untreated parts of a stem, delaying harvesting and reducing the quality of the fiber. Therefore, stems should be flattened immediately along their entire technical length at the earliest stages simultaneously with the pulling of flax, without flattening only the remaining part of the total length of plants, on which seed pods are located.

**RESULTS:** It has been found that the size of the flattening zone in the plant ribbon is not constant. Therefore, in order to reduce the likelihood of damage to seed bolls by flattening rollers with maintaining the high accuracy of the implementation of the proposed method, it is necessary to place the upper edge of the flattening rollers at the level of the upper limit of the technical length of plants, to form a stem stand, uniform in height, with a compact area of seed bolls, reduce the galloping of flax harvesters when moving over irregularities of field surface and use such working bodies that provide the minimum longitudinal shift of the stems in the formed ribbon.

**CONCLUSIONS:** An analysis of the existing means of mechanization showed that preference should be given to the TLP-1.5K trailed flax puller, which is lighter and cheaper and should be equipped with a flattening machine, in order to implement the proposed method.

**Keywords:** *fiber flax; two-phase cleaning technology; flax puller; stems; fiber; maceration; flattening machine; roller.*

## Cite as:

Zintsov AN, Dobretsov VA, Sokolov VN. Peculiarities of stems flattening at two-phase fiber flax harvesting technology. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):215–222. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106770>

Received: 26.04.2022

Accepted: 01.07.2022

Published: 15.07.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Морфологическая особенность льна-долгунца заключается в том, что у растения различают общую и техническую длину стебля. Общая длина – это расстояние от места прикрепления семядольных листочков до места прикрепления самой верхней семенной коробочки соцветия (70–125 см и более). Техническая длина – это расстояние от места прикрепления семядольных листочков до начала разветвления соцветия (50–110 см и более) [1]. Техническую часть стебля считают наиболее ценной, так как она дает длинное волокно – основной продукт, ради которого возделывают лен-долгунец во всем мире. Чем выше стебель и длиннее его техническая часть, тем больше длинного волокна содержится в нем.

В настоящее время росая мочка является самым дешевым и поэтому самым распространенным способом превращения льняного стебля в тресту (90% площадей и более) [2]. Интенсивность мацерации является случайным процессом, зависящим от множества природных и производственных факторов. Продолжительность этого процесса во многом обуславливает качество и выход длинного волокна, являющихся главными составляющими в экономике отрасли. Производственный опыт показывает, что при определенном стечении неблагоприятных обстоятельств вытеребленные растения способны долгое время сохранять жизнеспособное состояние и мацерация тканей такого стебля с высвобождением льноволокна затягивается до полутора месяцев.

С учетом обозначенной проблемы в конце прошлого века (1990–1993 гг.) в результате всесторонних научных исследований технологии комбайновой уборки льна установлено [3, 4, 5], что самым эффективным методом ускорения процесса мацерации является плющение стеблей вальцовыми плющильными аппаратами. Главным проявлением эффекта стало сокращение сроков приготовления тресты на 3–10 суток с повышением ее качества в среднем на один сортономер. Поэтому в то время все усовершенствованные модификации отечественных льнокомбайнов ЛК-4Д, «Русь», «Русич», КЛП-1,5 и КЛП-1,5М начали оснащать плющильными аппаратами [6, 7].

Известно, что в процессе вегетации растения формирование волокнистых пучков заканчивается в фазу ранней желтой спелости. К этому времени качество волокна достигает наивысшего качества, а полное созревание семян наступает только спустя 10–12 дней [1].

Поскольку главной товарной продукцией в льноводстве является волокно, то начинать уборку льна комбайнами рекомендуется в фазу ранней желтой его спелости. Однако такая организация уборки приведет к заметному недобору семян как в количественном, так и в качественном выражении, со снижением общей эффективности отрасли.

Двухфазная (раздельная) технология уборки льна свободна от указанного недостатка, так как предполагает

теребление растений в фазу ранней желтой спелости без отделения от них семян. При этом волокно получается наивысшего качества, а семена созревают на стеблях, разостланных в ленту. После дозревания и подсушивания семян в естественных условиях производят подбор ленты с одновременным отделением семенной части урожая от стеблей. Обмолоченную льносолому оставляют на льнище для получения тресты. Поэтому еще больший эффект от плющения стеблей может быть достигнут при реализации двухфазной технологии за счет получения обоих видов льнопродукции высокого качества.

Результаты производственных проверок двухфазной технологии с применением костромского комплекса машин показали [6, 8], что за счет ранних сроков теребления растений с одновременным плющением комлевой части стеблей качество тресты повышается в среднем на 2,72 сортономера, выход длинного волокна увеличивается на 3,86% и повышается его качество со среднего номера 10,40 при комбайновой уборке до 13,16 – при раздельной. Несмотря на достигнутые результаты, при проведении уборочных работ по двухфазной технологии не обеспечивается получение льнотресты с достаточно однородной степенью вылежки по всей технической длине стеблей. Это объясняется неодинаковым воздействием рабочих органов льноуборочных машин на различные участки растений. При переработке такой льнотресты невозможно получить максимальный эффект от качества и выхода длинного волокна.

**Цель работы** – изыскание методов и средств получения максимального эффекта от применения двухфазной технологии уборки льна путем обеспечения равномерной вылежки стеблей по всей технической длине растений, начиная с самых ранних этапов уборочных работ.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известно множество технологических и технических решений устранения неоднородности тресты по длине стебля, получаемой при двухфазной уборке. Однако обозначенная проблема в полной мере продолжает существовать до настоящего времени.

Например, в одном из вариантов предлагается производить плющение комлевой части стеблей при тереблении растений, а вершинной – сразу же после отделения семенной части урожая от стеблей [9]. В результате первой фазы уборки процесс вылежки стеблей в тресту интенсифицируется в расплющенной комлевой их части. После плющения вершин во время второй фазы уборки интенсифицируется вылежка также и в вершинной части стеблей. Недостатком такого способа является невозможность равномерного плющения стеблей по всей их технической длине. При этом в большинстве случаев в средней части стебля появятся участки, которые совсем не будут подвергаться плющению или будут расплющены дважды. Такие воздействия вызовут перележку

или недолежку средней части растения, что уменьшит выход длинного волокна и понизит его качество.

В другом случае одновременно с плющением вершин предлагают произвести повторное плющение остальной части стеблей [10]. После плющения вершин и повторного плющения остальной части стеблей непосредственно после отделения от них семян интенсифицируется вылежка как в вершинной, так и еще более в комлевой частях стеблей.

Общим недостатком известных способов плющения [9, 10] является необходимость обязательного оснащения плющильными аппаратами теребильной машины и машины для отделения семенной части урожая от стеблей (подборщика-молотилки или подборщика-очесывателя), что удорожает стоимость механизированного комплекса и снижает его техническую надежность.

Произвести одновременное плющение всех частей растения и тем самым избежать неоднородной вылежки по длине стебля позволит способ [11], при котором плющение всего стебля производят во время второй фазы уборки одновременно с отделением от растений семенной части урожая. При этом стебель будет равномерно обработан по всей его длине и для реализации указанного способа потребуется оснастить плющильным аппаратом только одну машину – подборщик-молотилку или подборщик-очесыватель.

Общим недостатком известных способов [9, 10, 11] является необходимость разрыва во времени между тереблением растений и плющением стебля по всей его технической длине. При двухфазной технологии отмеченный разрыв во времени необходим для подсушки вытеребленных растений и дозревания на них семян в семенных коробочках. Указанный процесс может длиться от пяти до десяти суток и более, после чего производят подбор лент подсушенных растений с отделением дозревших семян от стеблей. В течение этого времени расплющенные при тереблении растений части стеблей будут активно вылеживаться, а нерасплющенные части стеблей могут совсем не подвергаться вылежке, затягивая тем самым продолжительность уборочных работ до осеннего ненастья, снижая качество и выход наиболее ценного длинного волокна. Поэтому целесообразно плющить сразу все части стеблей в начале уборки при тереблении растений. Это позволит активизировать процесс вылежки в тресту равномерно по всей технической длине стебля, начиная с самых ранних этапов уборочных работ, что сократит сроки приготовления тресты, повысит качество и увеличит выход длинного волокна. Однако если при двухфазной уборке произвести одновременное плющение всех частей стеблей по всей общей длине растений при их тереблении до отделения семенной части урожая от стеблей, то это вызовет невозвратимые потери семян в виде осыпания из расплющенных семенных коробочек и снижение их посевных качеств из-за повреждений плющильными вальцами. Такой прием заметно снизит эффективность

двухфазной уборки льна-долгунца, в связи с чем является недопустимым.

С учетом морфологической особенности растения льна и с целью сокращения сроков приготовления тресты льняной, повышения качества и увеличения выхода длинного волокна плющение стеблей следует производить по всей технической длине растений одновременно с тереблением последних, не подвергая плющению оставшуюся часть общей длины растений, на которой расположены семенные коробочки.

Для точной реализации обозначенного способа необходимо верхнюю кромку плющильных вальцов теребильной машины располагать по длине стеблей на уровне верхней границы технической длины растений. В этом случае вальцы будут равномерно обрабатывать стебли только на той части растений, где содержится длинное волокно, а семенная часть останется за пределами зоны плющения. Такое расположение зоны плющения исключает разрушение семенных коробочек и повреждение семенного материала плющильными вальцами, а также потери семян от осыпания из разрушенных коробочек.

Таким образом, при двухфазной уборке льна-долгунца благодаря одновременному плющению всех частей технической длины стеблей в их конструкции появятся трещины. За счет этого сушка растений и процесс вылежки в тресту будут происходить более интенсивно и равномерно по всей технической длине стебля. Поскольку все части стебля, содержащие волокно, расплющены при тереблении растений, то вылежка в тресту начнется в наиболее ранние и наиболее благоприятные сроки, что максимально повысит качество волокнистой продукции, сократит сроки ее приготовления и уменьшит вероятность затягивания уборки до осеннего ненастья. Кроме того, для реализации предложенного способа потребуется оснастить плющильным аппаратом только теребильную машину. При переработке тресты, полученной с применением предлагаемого способа, повысится качество и увеличится выход длинного волокна.

Однако при проектировании конструкции теребилки-плющилки следует иметь в виду, что размер  $h_1$  зоны плющения в ленте растений льна не является постоянным. На размер этой зоны влияет ряд случайных процессов: изменения высоты стеблестоя –  $l(t)$ , размера зоны расположения коробочек в стеблестое –  $a(t)$  и растянутости стеблей в сформированной при тереблении ленте –  $\lambda(t)$ , а также колебания комлевой части ленты льна –  $y_k(t)$  перед плющильным аппаратом, обусловленные галопированием машины при движении по неровностям поверхности поля. В каждом конкретном сечении ленты льна средний размер зоны плющения будет равен:

$$h_1 = m_\lambda \cdot (m_l - m_a), \quad (1)$$

где  $m_\lambda, m_l, m_a$  – математические ожидания процессов, соответственно, изменения растянутости стеблей

в сформированной при тереблении ленте  $\lambda(t)$ , изменения высоты стеблестоя  $l(t)$  и размера зоны расположения коробочек в стеблестое  $a(t)$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Используя результаты статистических исследований условий работы льноуборочных машин (табл. 1), проведенных В.Г. Озеровым [12], получена графическая интерпретация зависимости (1) (рис. 1).

Следует отметить тот факт, что процесс  $y_k(t)$  не влияет на значение  $h_n$ . При наличии указанных колебаний происходит смещение зоны  $h_n$  относительно плющильного аппарата на величину  $y_k$ , которая с учетом правила трех сигм изменяется в диапазоне  $\pm 3\sigma_{y_k}$ . Поэтому размер  $y_k$  также следует учитывать при расчете рабочей ширины захвата вальцов плющильного аппарата (рис. 2), то есть:

$$h_b = m_\lambda \cdot (m_l - m_a) + 3\sigma_{y_k} \quad (2)$$

Таким образом, при использовании для расчетов по выражению (2) усредненные значения статистических характеристик из табл. 1 ширина  $h_b$  захвата вальцов плющильного аппарата должна равняться 1,09 м. Однако полученный размер вызовет сложности монтажа такого

аппарата на теребильную машину, увеличение габаритов и металлоемкости конструкции. Кроме того, ординаты всех анализируемых процессов также изменяются в пределах  $\pm 3\sigma$ . Это означает, что размер зоны плющения  $h_n$  может принимать значения своих ординат в еще более широком диапазоне, и при этом появляется вероятность

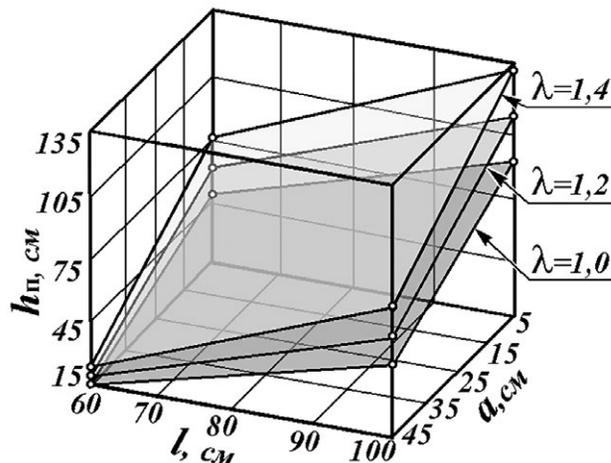


Рис. 1. Зависимость размера  $h_n$  зоны плющения в ленте растений льна от случайных факторов.

Fig. 1. The  $h_n$  size of flattening zone in the plant ribbon of flax, depending on random factors.

Таблица 1. Статистические характеристики структурных параметров ленты растений льна

Table 1. Statistical properties of structural parameters of the plant ribbon of flax

Процесс	Математическое ожидание – $m$	Среднеквадратическое отклонение – $\sigma$	Коэффициент вариации – $V, \%$
$l(t)$ , см	78,3–89,9	5,4–7,6	6,9–8,5
$a(t)$ , см	19,4–22,0	4,8–5,3	24,0–24,8
$\lambda(t)$	1,4	0,1	7,2
$y_k(t)$ , см	–	5,4–8,3	–

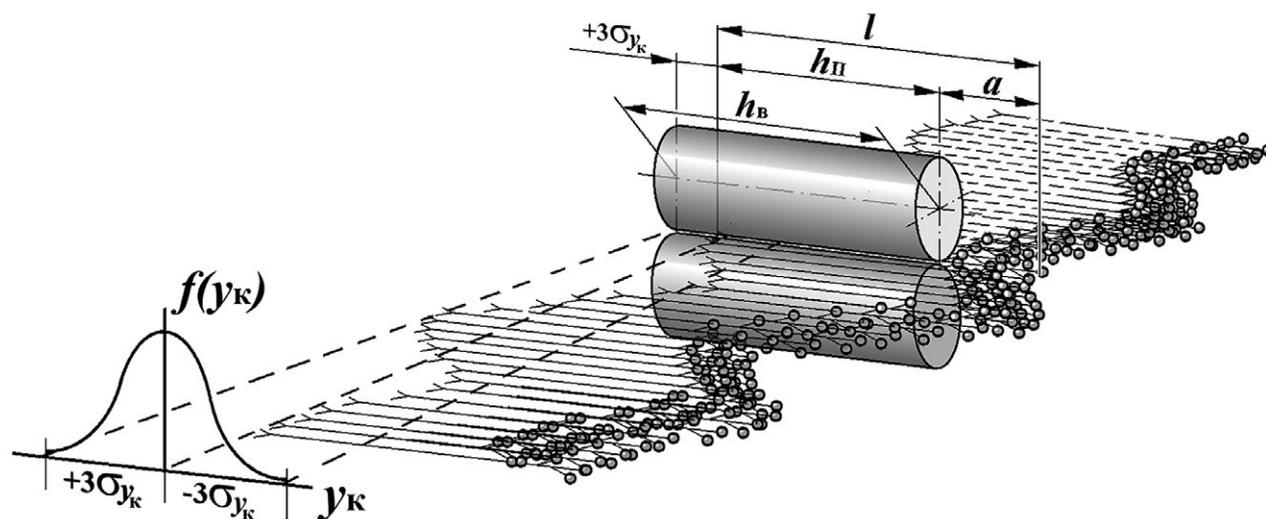


Рис. 2. Схема к определению ширины захвата вальцов плющильного аппарата.

Fig. 2. The scheme on defining the flattening machine rollers operating width.

попадания семенной части растений в зону  $h_b$  действия плющильных вальцов.

Для уменьшения необходимой ширины захвата вальцов и вероятности повреждения семенных коробочек путем соблюдения высокой точности реализации предлагаемого способа следует обеспечить выполнение ряда обязательных агротехнических требований.

Во-первых, следует сформировать равномерный по высоте стеблевой с компактной зоной расположения семенных коробочек, во-вторых, уменьшить галопирование теребильных машин при движении по неровностям поверхности поля и, в-третьих, применять такие рабочие органы, которые обеспечивают минимально возможную растянутость стеблей в формируемой ленте.

Для реализации первых двух требований следует использовать для посева кондиционные семена с высокими посевными качествами и обеспечивать равномерную глубину их заделки в почву, своевременно и тщательно выполнять основную и предпосевную обработки почвы.

Использованные для расчетов ширины  $h_b$  захвата вальцов числовые характеристики получены при исследовании теребильных машин, выполненных на основе теребильной части льноуборочных комбайнов ЛК-4Т или ЛК-4А, допускающих при своей работе значительное увеличение растянутости стеблей в ленте ( $\lambda=1,4\pm 0,3$ , см. табл. 1). Поэтому с целью уменьшения размера необходимой зоны плющения и снижения металлоемкости конструкции плющильного аппарата следует для выполнения первой фазы уборки применять машины с теребильными рабочими органами, выполненными по примеру конструкций фирмы *Union* (Франция) U/20PY, U22.HY, GE-220; фирмы *Depoortere* (Бельгия) Type ARA.HY.01, DAEA.HY.01; или теребилок отечественного производства: самоходной – ЛТС-1,65 и прицепной – ТЛП-1,5К(П) [13], допускающих незначительную растянутость ( $\lambda \leq 1,2$ ) стеблей в формируемой ленте.

Неоспоримыми преимуществами российских машин перед зарубежными аналогами является возможность

качественной уборки полеглого льна, появление которого не является редким событием для большинства льносеющих регионов нашей страны, а также сравнительно низкая их стоимость. Наряду с этим указанные машины имеют свои преимущества и недостатки, которые следует учитывать при организации уборки льна.

Самоходная теребилка ЛТС-1,65 обладает хорошей маневренностью, имеет увеличенную ширину захвата (1,65 м), что способствует повышению ее производительности. Однако следует отметить, что увеличение ширины захвата в технологическом смысле не выглядит положительным, так как уплотнение ленты приводит к ухудшению условий вылежки в ней стеблей и снижению качества волокна при двухфазной уборке льна. Кроме того, самоходная теребилка ЛТС-1,65 имеет массу 4500 кг, что затрудняет реализацию первой фазы уборки на переувлажненных полях и удорожает амортизацию машины.

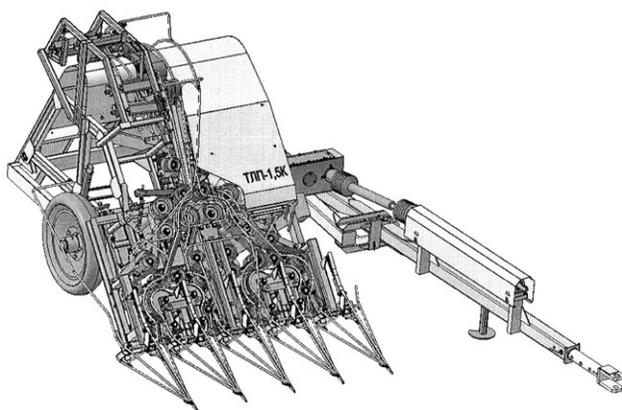
Масса прицепной теребилки ТЛП-1,5К(П) (рис. 3) составляет всего 1350 кг, и поэтому агрегат, составленный из легкой машины и трактора, может более успешно обрабатывать участки полей с переувлажненной почвой, снижая тем самым зависимость начала двухфазной уборки от погодных условий.

Эксплуатация более легкой машины потребует меньшей мощности на привод ее рабочих органов и сократит потребление топлива на единицу продукции. Отмеченные преимущества существенно снизят себестоимость теребления льна [14].

Учитывая сказанное, при организации уборки льна по двухфазной технологии следует отдать предпочтение более легкой и дешевой прицепной теребилке ТЛП-1,5К [13] и оснастить ее аппаратом для плющения стеблей по всей технической длине растений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Техническая часть стебля является наиболее ценной, так как она дает длинное волокно – основной продукт, ради которого возделывают лен-долгунец. Для повышения качества и наиболее полного выделения этого продукта следует активизировать процесс мацерации в тканях стебля путем его плющения.
2. Наибольший эффект от плющения стеблей может быть достигнут при его реализации в фазу ранней желтой спелости льна, когда волокно получается наивысшего качества. Обеспечить выполнение такой операции без ущерба для сбора и качества семян позволит двухфазная технология уборки льна.
3. Обязательный разрыв во времени между воздействиями рабочих органов льноуборочных машин на различные участки стеблей при реализации различных фаз отдельной уборки не обеспечивает получение льнотресты достаточно однородной вылежки по всей технической длине стеблей. Приготовление такого сырья потребует больше времени, а при его



**Рис. 3.** Прицепная теребилка ТЛП-1,5К.  
**Fig. 3.** The TLP-1.5K trailed flax puller.

- переработке невозможно получить максимальный эффект от качества и выхода длинного волокна.
4. С целью сокращения сроков приготовления тресты, повышения качества и увеличения выхода длинного волокна плющение стеблей следует производить сразу по всей их технической длине на самых ранних этапах двухфазной уборки одновременно с терблением льна, не подвергая плющению только ту часть общей длины растений, на которой расположены семенные коробочки. Для этого верхняя кромка плющильных вальцов тербильной машины должна располагаться на уровне верхней границы технической длины растений.
  5. Для обеспечения высокой точности реализации предлагаемого способа следует формировать равномерный по высоте стеблестой с компактной зоной расположения семенных коробочек, уменьшать галопирование тербильной машины путем качественной подготовки поля к посеву и применять такие рабочие органы, которые обеспечивают минимально возможную растянутость стеблей в формируемой ленте.
  6. Анализ существующих средств механизации показал, что для реализации предложенного способа наиболее подходящей является прицепная тербилка льна ТЛП-1,5К, которую следует оснастить двухвальцовым плющильным аппаратом.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** *А.Н. Зинцов* – научное руководство, подготовка начального текста с последующей доработкой,

## ЛИТЕРАТУРА

1. Труш М.М., Карпунин Ф.М. Справочник льновода. Ленинград: Агропромиздат, 1985.
2. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ущаповский И.В., Попов Р.А. Основные проблемы научного обеспечения льноводства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 3. С. 45–52. doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52
3. Ковалев М.М., Козлов В.П. Плющильные аппараты льноуборочных машин (конструкция, теория, расчет) : монография. Тверь: Тверское областное книжно-журнальное издательство, 2002.
4. Боярченкова М.М., Ковалев М.М., Смирнов В.И., Иванов А.Д. Эффективность плющения стеблей льна в комлевой части при терблении // Льняное дело. 1995. № 4. С. 18–22.
5. Ковалев М.М., Смирнов В.И., Броцман А.И., Иванов А.Д. Что дает применение плющильных аппаратов на льнокомбайнах // Льняное дело. 1992. № 2. С. 32.
6. Колчина Л.М., Ковалев М.М. Опыт освоения прогрессивных технологий и технических средств для уборки и первичной переработки льна-долгунца: науч. аналит. обзор. Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2008.
7. Колчина Л.М., Крюков И.В. Технологии и технические средства для возделывания, уборки и первичной переработки

проведение критического анализа исследований, визуализация, утверждение финальной версии; *В.А. Добрецов* – подготовка и анализ литературных данных, проведение исследований, анализ результатов, доработка текста; *В.Н. Соколов* – проведение исследований, участие в разработке конструкции и изготовлении прицепной тербилки льна ТЛП-1,5К. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** *A.N. Zintsov* – scientific supervision, preparation of the initial text with subsequent revision, critical analysis of studies, visualization, approval of the final version; *V.A. Dobretsov* – preparation and analysis of literature data, research, analysis of results, revision of the text; *V.N. Sokolov* – research, participation in design and manufacture of trailed flax-cutting machine PLP-1,5K.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

льна-долгунца: каталог-справочник. Москва: ФГНУ «Росинформагротех», 2003.

8. Лачуга Ю.Ф., Зинцов А.Н. Экономическая эффективность отдельной уборки льна // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 12. С. 8–10.

9. Патент РФ на изобретение № 2119279/ 27.09.1998. Бюл. № 27. Смирнов Н.А., Зинцов А.Н., Соколов В.Н. Способ уборки льна-долгунца. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38114843> Дата обращения: 20.08.2022.

10. Патент РФ на изобретение № 2192115/ 10.11.2002. Бюл. № 31. Смирнов Н.А., Зинцов А.Н., Соколов В.Н. Способ уборки льна-долгунца и приготовления тресты. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37895365> Дата обращения: 20.08.2022.

11. Патент РФ на изобретение № 2019950/ 30.09.1994. Бюл. № 18. Смирнов Н.А., Зинцов А.Н., Мартынов П.А. Раздельный способ уборки льна-долгунца. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41066646> Дата обращения: 20.08.2022.

12. Лурье А.Б., Нагорский И.С., Озеров В.Г., и др. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления / под ред. А.Б. Лурье. Ленинград: «Колос», Ленингр. отделение, 1979.

13. Зинцов А.Н., Соколов В.Н., Добрецов В.А. Инновационная тербилка-плющилка льна ТЛП-1,5К(П) //

Аграрный вестник Нечерноземья. 2021. № 3. С. 24–31.  
doi: 10.52025/2712-8679\_2021\_03\_24

14. Смирнов Н.А., Смирнов С.В. Анализ работы теребилных машин при реализации раздельной уборки льна-долгунца //

Сборник статей 67-й международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе»; Январь 21–22, 2016; Караваево. Костромская ГСХА, 2016.

## REFERENCES

1. Trush MM, Karpunin FM. *Spravochnik l'novoda*. Leningrad: Agropromizdat; 1985. (In Russ).
2. Rostovtsev RA, Chernikov VG, Ushchapovsky IV, Popov RA. The Main Problems of Scientific Support of Flax Growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):45–52. (In Russ). doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52
3. Kovalev MM, Kozlov VP. *Plyushchil'nye apparaty l'noborochnykh mashin (konstruktsiya, teoriya, raschet) : Monografiya*. Tver: Tverskoe oblastnoe knizhno-zhurnal'noe izdatel'stvo; 2002. (In Russ).
4. Boyarchenkova MM, Kovalev MM, Smirnov VI, Ivanov AD. Effektivnost' plyushcheniya steblei l'na v komplevoi chasti pri tereblenii. *L'nyanoe delo*. 1995;(4):18–22. (In Russ).
5. Kovalev MM, Smirnov VI, Brotsman AI, Ivanov AD. Chto daet primeneniye plyushchil'nykh apparatov na l'nokombainakh. *L'nyanoe delo*. 1992;(2):32. (In Russ).
6. Kolchina LM, Kovalev MM. *Opyt osvoeniya progressivnykh tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv dlya uborki i pervichnoi pererabotki l'na-dolguntsa : Nauch. analit. obzor*. Moscow: FGNU «Rosinformagrotekh»; 2008. (In Russ).
7. Kolchina LM, Kryukov IV. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya vozdeylyvaniya, uborki i pervichnoi pererabotki l'na-dolguntsa: Katalog-spravochnik*. Moscow: FGNU «Rosinformagrotekh»; 2003. (In Russ).
8. Lachuga YF, Zintsov AN. Ekonomicheskaya effektivnost' razdel'noi uborki l'na. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaistva*. 2008;(12):8–10. (In Russ).

9. Patent RUS №2119279/ 27.09.1998. Byul. №27. Smirnov NA, Zintsov AN, Sokolov VN. *Fiber flax harvesting method*. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38114843> (In Russ).
10. Patent RUS №2192115/ 10.11.2002. Byul. №31. Smirnov NA, Zintsov AN, Sokolov VN. *Method of harvesting fiber flax and preparing flax fibers*. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37895365> (In Russ).
11. Patent RUS №2019950/ 30.09.1994. Byul. № 18. Smirnov NA, Zintsov AN, Martynov PA. *Method for two-phase harvesting of fiber-flax*. Available from: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41066646> (In Russ).
12. Lur'e AB, Nagorskii IS, Ozerov VG, et al. *Modelirovaniye sel'skokhozyaistvennykh agregatov i ikh sistem upravleniya*. Lur'e AB, editor. Leningrad: «Kolos», Leningr. otdelenie; 1979. (In Russ).
13. Zintsov AN, Sokolov VN, Dobretsov VA. Innovative machine for pulling and breaking flax stems TLP-1.5K (P). *Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem Area*. 2021(3):24–31. (In Russ). doi: 10.52025/2712-8679\_2021\_03\_24
14. Smirnov NA, Smirnov SV. Analiz raboty terebil'nykh mashin pri realizatsii razdel'noi uborki l'na-dolguntsa. Proceedings of the 67th International science conference «Aktual'nye problemy nauki v agropromyshlennom komplekse»; 2016 Jan 21–22; Karavaevo. Kostromskaya GSKhA; 2016. (In Russ).

## ОБ АВТОРАХ

### \*Зинцов Александр Николаевич,

доцент, д.т.н.,  
профессор кафедры «Тракторы и автомобили»;  
адрес: Россия, 156530, Костромская обл., п. Караваево,  
ул. Учебный городок, д. 34;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>;  
eLibrary SPIN: 2073-8846;  
e-mail: zintsov\_a@mail.ru

### Добрецов Вячеслав Александрович,

студент 2 курса магистратуры;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6255-4824>;  
eLibrary SPIN: 6307-1680;  
e-mail: Dobrvsoligrad@mail.ru

### Соколов Валерий Николаевич,

техник научно-исследовательской лаборатории льна;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3090-1171>;  
eLibrary SPIN: 1433-7182;  
e-mail: sokol-v-a-l@yandex.ru

\*Автор для переписки

## AUTHORS' INFO

### \*Alexander N. Zintsov,

Associate Professor, Dr. Sci. (Engin.),  
Professor of the Tractors and Automobiles Department;  
address: 34 st. Educational campus, Karavaevo, Kostroma region,  
156530, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-2015>;  
eLibrary SPIN: 2073-8846;  
e-mail: zintsov\_a@mail.ru

### Vyacheslav A. Dobretsov,

2nd year MA student;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6255-4824>;  
eLibrary SPIN: 6307-1680;  
e-mail: Dobrvsoligrad@mail.ru

### Valery N. Sokolov,

Technician at the Flax Research Laboratory;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3090-1171>;  
eLibrary SPIN: 1433-7182;  
e-mail: sokol-v-a-l@yandex.ru

\*Corresponding author

УДК 621.318.3:621.318.43:658.512.24:631.331.922

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106120>

Оригинальное исследование

# Расчет и выбор параметров электромагнита для обеззараживающего устройства зерна и семян

В.А. Максименко, К.Н. Буханцов

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Высокая зараженность урожая зерновых культур, ежегодно производимого в России возбудителями грибковых и бактериальных болезней, которая вызывает значительные количественные потери зерна и снижение его качества при хранении, показала низкую эффективность операции химического протравливания, широко применяемой в настоящее время в производстве для обеззараживания зерна и семян. Поэтому разработка экологически безопасных и эффективных в борьбе с грибковыми и бактериальными инфекциями зерна электрофизических методов обеззараживания, а также технических средств для их реализации является актуальной научно-производственной задачей.

**Цель работы** – разработка методики выбора и определения рациональных параметров генератора переменного тока и электромагнита обеззараживающего устройства для зерна и семян.

**Материалы и методы.** Предметом исследования являлись способы и условия создания переменных магнитных полей в рабочем объеме воздействия на поток семян зерновых культур.

Методом исследования является анализ законов электромагнетизма и их адаптация к процессу определения параметров электромагнита для рабочего объема обеззараживающего устройства.

К материалам исследования относятся адаптированные математические выражения параметров обмотки электромагнита и методика их использования.

**Результаты.** Для реализации нового метода обеззараживания зерна и семян переменным магнитным полем от возбудителей грибковых и бактериальных заболеваний разработано два варианта методики выбора и расчета параметров электромагнита, являющегося ключевым элементом устройства для обеззараживания. Первая методика сводится к рациональному использованию характеристик выбранного генератора путем отыскания параметров обмотки катушки, обеспечивающих необходимую магнитную индукцию. Размеры катушки и время воздействия на семена определяют производительность устройства по обработанному зерну. Во втором варианте методики расчета расход потока материала по рабочей камере (в электромагните) задается условиями производственной необходимости. Это обуславливает размер камеры (катушки индуктивности), параметры и режимы ее работы, обеспечивающие достаточную для обеззараживания магнитную индукцию, что в итоге определяет характеристики генератора.

**Заключение.** Предложенная методика позволяет ускорить разработку оборудования для реализации высокоэффективной, энергосберегающей и экологически чистой технологии низкочастотного магнитного обеззараживания зерна и семян и внедрения ее в сельскохозяйственное производство.

**Ключевые слова:** методика расчета электромагнита; катушка индуктивности; магнитная индукция; низкочастотное магнитное поле; обеззараживание зерна; тепловыделение катушки.

## Для цитирования:

Максименко В.А., Буханцов К.Н. Расчет и выбор параметров электромагнита для обеззараживающего устройства зерна и семян // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 3. С. 223–232. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106120>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106120>

Original study article

# The calculation and choice of the electromagnet parameters for the grain and seeds disinfectant device

Vladimir A. Maksimenko, Kirill N. Bukhantsov

Northern-Caucasian Scientific Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture of Federal State Budgetary Scientific Institution  
Agricultural Research Center Donskoy, Zernograd, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** High infection rate of grain harvest, produced in Russia annually, by causative agents of fungal and bacterial diseases, causing significant quantitative losses of grain and decreasing of storage quality, revealed low efficiency of operation of chemical treatment, nowadays widely used in production for disinfection of grain and seeds. Therefore, development of electrophysical disinfection methods, which are environmentally friendly and effective against fungal and bacterial infections, as well as development of technical devices for their implementation is a relevant scientific and production problem.

**AIMS:** Development of method of choice and definition of reasonable parameters of alternating current generator and electromagnet of disinfectant device for grain and seeds.

**METHODS:** The study subjects are methods and conditions of generation of alternating magnetic fields in the operational volume of impact on grain seeds flow. The study method is analysis of laws of electromagnetism and adaptation of them to the process of definition of electromagnet parameters for the operational volume of the disinfectant device. The study materials include the adapted mathematical expressions of magnet winding parameters and the method of their use.

**RESULTS:** For the sake of implementation of the new method of grain and seeds disinfection from causative agents of fungal and bacterial diseases by alternating magnet field, two methods of choice and calculation of electromagnet, which is the key element of the disinfectant device, have been developed. The first method comes to reasonable use of properties of a chosen generator by means of definition of coil winding parameters, ensuring demanded field density. Coil dimensions and time of impact on seeds will determine the device performance for treated grain. In the second method, the capacity of material flow through operational chamber (in the electromagnet) is conditioned by operational needs. It determines the size, parameters and operational modes of chamber (the inductance coil), ensuring the field demand, enough for disinfection, that, in the end, defines the properties of the generator.

**CONCLUSIONS:** The suggested method makes it possible to accelerate the development of facilities for implementation of highly efficient, energy saving and environmentally friendly technology of low-frequency magnetic disinfection of grain and seeds and to incorporate it in agricultural production.

**Keywords:** *method of calculation of electromagnet, inductance coil, magnetic inductance, low-frequency magnetic field, grain disinfection, heat emission of coil.*

## Cite as:

Maksimenko VA, Bukhantsov KN. The calculation and choice of the electromagnet parameters for the grain and seeds disinfectant device. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):223–232. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106120>

Received: 09.04.2022

Accepted: 05.06.2022

Published: 15.07.2022

## ВВЕДЕНИЕ

За последние 10 лет в зерновом подкомплексе АПК России происходит интенсивный рост производства зерна, который в течение 2019–2021 годов пришел к стабилизации на уровне 110–130 млн. тонн [1–4]. Увеличение производства было обусловлено сочетанием большой совокупности факторов (экономических, климатических, социальных и ряда др.), среди которых можно назвать: расширение использования под выращивание зерновых ранее хозяйственно заброшенных земель (в 90-е – начале 2000-х гг.): перевод под зерновые площади сельхозугодий, ранее задействованных под возделывание кормовых культур, что было связано с сокращением потребностей в кормах отрасли животноводства, расширением использования в производстве современных удобрений и пестицидов: хозяйственное применение новых высокопродуктивных и адаптивных сортов пшеницы и других зерновых с высоким потенциалом качества за счет применения современных технологий и техники для почвообработки, посева, опрыскивания, уборки и других операций. И все это на фоне сложившихся в последние годы новых природно-климатических условий земледелия: арридизации климата в основных (традиционных) зернопроизводящих районах страны и вовлечения в условиях потепления климата в зерновое производство территорий ранее широко не специализировавшихся на выращивании зерна (ряд областей Центрально-Черноземной зоны, некоторые области Центральной России, юга Сибири и Дальнего Востока) [5].

Однако интенсивный рост производства зерна в стране обострил многие существующие в отрасли проблемы: нехватку уборочной техники: сильное травмирование зерна при уборке и послеуборочной обработке [6]: отсутствие достаточного количества специализированных мощностей для хранения зерна: кадровый дефицит в отрасли: деградацию взаимодействия субъектов зернового рынка из-за отсутствия нормативно-технических документов в отрасли (отменены в результате «регуляторной гильотины») и актуальной законодательной базы, регулирующей функционирование АПК: устаревшие принципы системы оплаты труда в зерновом подкомплексе: прогрессирующее ухудшение зараженности выращиваемого в стране зерна возбудителями грибковых и бактериальных заболеваний, обуславливающих значительные количественные и качественные потери урожая на всех стадиях производства, связанные в том числе с возникновением у фитопатогенов резистентности к большинству предлагаемых на рынке марок фунгицидов [7–8]; ухудшение экологической обстановки в АПК из-за накопления пестицидов (фунгицидов, гербицидов, инсектицидов и др.) и их токсичных компонентов в почве, воде, воздухе и в самой сельскохозяйственной продукции,

что вызывает массовую заболеваемость людей и гибель полезной микрофлоры, насекомых-опылителей, животных и птиц, из-за высокой химической активности агропрепаратов, их сильной отравляющей и мутагенной способности, плохой разлагаемости в естественных условиях, а также другие факторы.

Одной из первоочередных задач, стоящих перед зерновой отраслью производства России является создание способов и оборудования для эффективного и экологически безопасного обеззараживания зерна и семян от возбудителей грибковых и бактериальных заболеваний, альтернативных химическому протравливанию и не обладающих его наиболее существенными недостатками. Эти новые методы обеззараживания должны исключать применение в технологическом процессе химически опасных веществ; обеспечивать возможность использования их для обработки не только семенного, но и продовольственного зерна; по физическому механизму процесса исключать или значительно замедлять выработку резистентности у вредных фитопатогенов зерна к обеззараживающему воздействию; быть универсальными по ингибированию разных видов возбудителей болезней зерна; иметь низкую стоимость внедрения и низкие эксплуатационные затраты; не снижать посевные и другие технологические свойства зернового сырья; обеспечивать возможность создания широкой линейки оборудования по пропускной способности (производительности) по обрабатываемому материалу и др.

В лаборатории био энерготехнологий СКНИИМЭСХ предложен способ электрофизического обеззараживания зерна и семян, отвечающий всем поставленным требованиям.

Предыдущими исследованиями [9–11] выявлено обеззараживающее воздействие переменных магнитных полей на семена зерновых культур. Были определены параметры полей, которые можно считать рациональными по критерию снижения зараженности семян, величина которой по сравнению с контролем уменьшается в 1,89–2,2 раза, а на некоторых режимах обработки в 2,4–3,4 раза [9–11], в частности это частота магнитного поля  $f=20$  Гц, магнитная индукция поля  $B=100$  мТл и время воздействия около  $t=2$  с. Однако дальнейший анализ природы и механизма обеззараживающего воздействия переменного магнитного поля позволил сделать предположение [12] о существовании большей эффективности этих полей на их более высоких гармонических частотах, находящихся в диапазоне от 345 до 1000 Гц, и подтвердить его [13]. Использованные ранее технические средства для получения обеззараживающих магнитных полей [14, 15] в виде статоров трехфазных электродвигателей, питаемых от преобразователей частоты трехфазного переменного тока мало приемлемы для таких частот из-за низкочастотности их магнитопроводов. Кроме того, подтвердившееся

предположение об уменьшении достаточной для обеззараживания величины магнитной индукции позволяет существенно упростить конструктивное исполнение электромагнита, не оснащая его магнитопроводом, выполнив в виде катушки без сердечника, внутреннее пространство которой является объемом обеззараживающего воздействия.

Практическая реализация устройства для обеззараживания семян переменным магнитным полем предполагает наличие в нем генератора переменного тока, обеспечивающего возникновение магнитной индукции в рабочем объеме, охваченном обмоткой и представляющей собой катушку индуктивности, а также техническое средство, обеспечивающее необходимое время пребывания в ней семян.

Выполним поиск и расчет рациональных соотношений между параметрами генератора и размерами и характеристиками катушки индуктивности.

Целью исследования являлась разработка методики выбора и определения рациональных параметров генератора переменного тока и электромагнита обеззараживающего устройства для семян.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предметом исследования являлись способы и условия создания переменных магнитных полей в рабочем объеме воздействия на поток семян зерновых культур.

Методом исследования является анализ законов электромагнетизма и их адаптация к процессу определения параметров электромагнита для рабочего объема обеззараживающего устройства.

К материалам исследования относятся адаптированные математические выражения параметров обмотки электромагнита и методика их использования.

Устройство для обеззараживания семян может быть выполнено либо с использованием готовых генераторов тока задаваемой частоты и ограниченной номинальной величины, либо с разработкой новых видов генераторов под те или иные производственные задачи.

Первый случай сводится к рациональному использованию выходных параметров имеющегося генератора – мощности, выходных напряжений и тока – путем отыскания параметров обмотки катушки, обеспечивающих необходимую магнитную индукцию. Размеры катушки и время воздействия на семена определяют пропускные возможности – производительность устройства.

Во втором случае производительность (расход потока по рабочей камере) задается условиями производственной необходимости. Это обуславливает размер камеры, параметры и режимы работы обмотки, обеспечивающие достаточную магнитную индукцию, что в итоге определяет и характеристики генератора.

Исходными данными, характеризующими условия для обоих случаев обеспечения обеззараживающего воздействия на семена переменным магнитным полем является достаточная по величине магнитная индукция ( $B$ , Тл) и время пребывания семян под ее воздействием ( $t$ , с), частота переменного тока ( $f$ , Гц), форма его периодического изменения (синусоида, меандр), положительные и отрицательные амплитуды тока и другое. Эти характеристики определяются экспериментально стандартными методами (по ГОСТ 12044-93 и ГОСТ 12038-84) оценки снижения зараженности семян после воздействия на них переменных магнитных полей исследуемых частот.

Выходной расчетной величиной во втором случае будет мощность генератора при каком-то заданном токе или напряжении и размеры катушки с параметрами обмотки.

Для определения порядка и метода расчета рабочей камеры и ее обмотки используем следующие закономерности.

Магнитная индукция катушки определяется по формуле [16]:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}, \text{ Тл}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество витков в катушке, виток;  $\mu$  – коэффициент магнитных свойств среды внутри обмотки, с достаточной точностью далее считаем, что для зерна

$$\mu = 1; \mu_0 - \text{магнитная постоянная}, \frac{\text{Гн}}{\text{м}}, \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}};$$

$I$  – среднее эффективное значение переменного синусоидального тока в катушке, А;  $l$  – длина обмотки, м, которую для удобства математических преобразований, конструктивных исполнений и корректности применения эмпирических формул выразим через средний радиус обмотки  $r$  как  $l = 3 \cdot r$ .

Полное сопротивление обмотки [17]:

$$Z = \sqrt{X_L^2 + R^2}, \text{ Ом}, \quad (2)$$

где  $X_L$  – индуктивное сопротивление обмотки, Ом, определяемое из выражения (3) [17]:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L, \text{ Ом}, \quad (3)$$

где  $f$  – частота протекающего по обмотке синусоидального тока, Гц;  $L$  – индуктивность катушки, Гн;  $R$  – активное сопротивление обмотки, Ом, на наиболее эффективных частотах обеззараживания переменным магнитным полем от 345 до 600 Гц [13], при рациональных диаметрах каркаса катушки оно составляет менее 3–5% в составе общего сопротивления, что позволяет учитывать его лишь для тепловой оценки рабочего режима катушки.

Индуктивность катушки  $L$  с достаточной точностью можно определять формулой [16]:

$$L = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot S}{l}, \text{ Гн}, \quad (4)$$

где  $S$  – средняя площадь, охватываемая витком обмотки радиуса  $r$ , м<sup>2</sup>, рассчитывается по формуле  $S = \pi \cdot r^2$ .

Закон Ома для участка электрической цепи выражается формулой (5) [17]:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (5)$$

где  $I$  – ток по участку электрической цепи (в катушке), А;  $U$  – напряжение, подаваемое на катушку, В;  $Z$  – комплексное сопротивление катушки переменному току, Ом.

Мощность, выделяемая катушкой в виде магнитного поля и тепла [16]:

$$W = U \cdot I, \text{ Вт}. \quad (6)$$

Используя формулы (1) и (5) и выражая ток через задаваемую магнитную индукцию и искомые параметры катушки, можно записать следующее равенство:

$$\frac{3 \cdot B \cdot r}{\mu \cdot \mu_0 \cdot N} = \frac{U}{2\pi \cdot f \cdot L}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) выразим индуктивность  $L$  и подставим в него формулу (4) в результате чего получим:

$$\frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N}{2\pi \cdot B \cdot 3 \cdot r \cdot f} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N^2 \cdot \pi \cdot r^2}{3 \cdot r}. \quad (8)$$

Выразим из уравнения (8) величину количества витков катушки

$$N = \frac{U}{2\pi^2 \cdot r^2 \cdot B \cdot f}. \quad (9)$$

По принятому среднему радиусу обмотки  $r$  определим объем рабочей камеры для магнитного обеззараживающего воздействия на семена:

$$V_k = 3\pi \cdot (r - 0,2 \cdot r)^2 \cdot r, \text{ м}^3. \quad (10)$$

С использованием формулы (10) расход обрабатываемого потока зерна в рабочей камере (катушке индуктивности) установки определим по уравнению (11):

$$Q = \frac{V_k \cdot \gamma}{t}, \text{ кг/с}, \quad (11)$$

где  $\gamma$  – насыпная плотность зерна, кг/м<sup>3</sup>, определенная экспериментально с корректировкой справочных

данных [18], для озимой пшеницы сорт Лидия и сорт Краса Дона  $\gamma = 700$  кг/м<sup>3</sup> [14, 19],  $t$  – необходимое время пребывания обеззараживаемого зерна в магнитном поле, с.

Мощность тепловыделения в катушке после преобразования формулы (6) рассчитывается по выражению:

$$W = I^2 \cdot R, \text{ Вт}, \quad (12)$$

где  $R$  – активное сопротивление катушки, определяемое длиной намотанного провода и его электрическим сопротивлением 1 м провода,  $\rho$ , Ом/м [18], Ом, и рассчитывается по формуле:  $R = 2\pi \cdot r \cdot N$ .

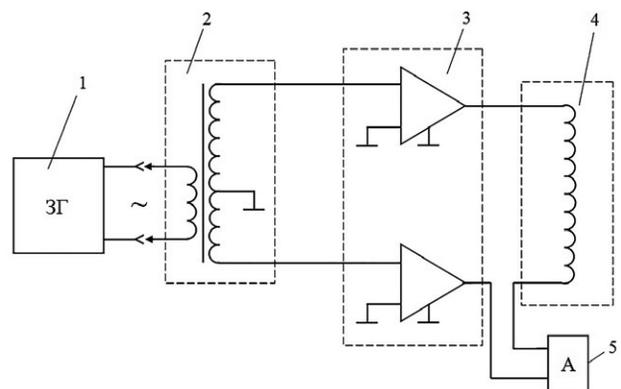
Изменяя толщину обмоточного провода, можно изменять тепловыделение обмотки, которое вместе с условиями эксплуатации определит конструкцию охлаждения.

Пример 1. Расчет катушки, работающей в схеме, представленной на рис. 1, для использования ее с имеющимся в наличии генератором.

Выходным каскадом генератора является звуковой усилитель мощностью  $W = 1,1$  кВт с напряжением на выходе  $U = 65$  В. Развиваемый при этом ток  $I_{max} = 16,92$  А. Для обеспечения щадящего режима ток уменьшаем на четверть ( $I = 0,75 \cdot I_{max}$ ) до  $I = 13$  А. Ток синусоидальный, рабочая частота  $f = 1000$  Гц.

Определим производительность обеззараживающего устройства при его воздействии на зерно полем с магнитной индукцией равной  $B = 0,05$  Тл = 50 мТл при продолжительности обработки зерна  $t = 1,5$  с.

Следует отметить, что величины  $f$ ,  $B$  и  $t$  выбираются по результатам экспериментов на оценку



**Рис. 1.** Схема установки для экспериментального мультичастотного обеззараживающего воздействия магнитным полем на семена: 1 – звуковой генератор ГЗ-109; 2 – согласующий входной трансформатор; 3 – усилитель мощности звуковых частот SONY-STR-DK5; 4 – катушка магнитного воздействия; 5 – измеритель тока в катушке (цифровой амперметр М890G).

**Fig. 1.** The scheme of the installation for experimental multi-frequency disinfection of seeds by a magnetic field: 1 – the G3-109 sound generator; 2 – an input balance convertor; 3 – the Sony STR-DK5 sound frequency power amplifier; 4 – a magnetic coil; 5 – a coil current meter (the M890G digital amperemeter).

снижения зараженности от обработки. В приводимом примере исходные величины базируются на проведенных предварительных оценках [13]. Из выражения (1) следует, что при прочих неизменных параметрах увеличению магнитной индукции будет способствовать уменьшение среднего радиуса обмотки  $r$ . В рабочем объеме катушки (в рабочей камере) магнитного воздействия зерно в насыпном состоянии должно продвигаться заданное, экспериментально определенное время. Такое условие реализуется, если соблюдается неравенство (13):

$$r > r_3, \quad (13)$$

где:  $r_3$  – радиус отверстия в разрабатываемой катушке индуктивности, задающего расход потока (определяется экспериментально) имеет критическую минимальную величину, обусловленную механическими свойствами зерна, м (показан на рис. 2).

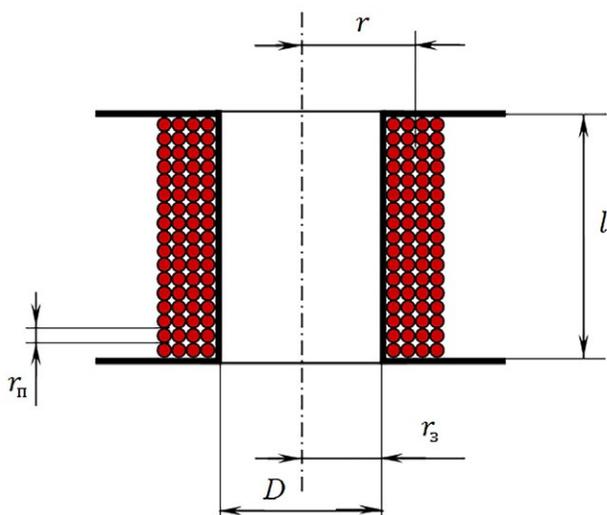
Средний радиус обмотки  $r = 0,02$  м выбираем минимальным согласно (13) [14].

Число витков обмотки, вычисляем по формуле (9):  $N \approx 165$  витков.

Проверочный расчет по развиваемой магнитной индукции выполним по формуле (1):  $B = 0,045$  Тл.

Некоторое уменьшение магнитной индукции, объясняемое использованием эмпирических формул, можно компенсировать увеличением обмотки с последующей проверкой по току.

Если считать активный ток в катушке индуктивности несущественным, то преобразовав формулу (5) с учетом формулы (3) индуктивность катушки, позволяющая



**Рис. 2.** Схема катушки индуктивности (рабочей камеры) установки обеззараживания зерна и семян с основными геометрическими параметрами.

**Fig. 2.** The scheme of the inductance coil (the operational chamber) of the installation of grain and seeds disinfection and main geometrical parameters.

прохождение рабочего тока  $I = 13$  А вполне можно определить по выражению:

$$L = \frac{U}{2\pi \cdot f \cdot I} \approx 0,0007961 \text{ Гн.}$$

Выразив из формулы (4) число витков разрабатываемой катушки индуктивности, определим какое их количество обеспечивает рабочий ток  $I = 13$  А:  $N \approx 174$  витков.

При диаметре обмоточного провода  $r_n = 1,5$  мм =  $0,0015$  м на длине обмотки  $60$  мм укладывается  $40$  витков, а вся обмотка составит четыре слоя. При среднем радиусе обмотки  $r = 0,02$  м диаметр каркаса вычислим по формуле (14):

$$D = 2(r - 2r_n) = 0,034 \text{ м.} \quad (14)$$

Активное сопротивление катушки индуктивности определяем по формуле с учетом того, что электрическое сопротивление  $1$  м обмоточного медного провода круглого сечения равно  $\rho = 0,0097$  Ом/м [20]:

$$R = 2\pi \cdot r \cdot N \approx 0,21 \text{ Ом.}$$

По формуле (12) рассчитаем мощность тепловыделения обмотки катушки индуктивности:  $W \approx 35,5$  Вт.

С такой величиной тепловыделения в процессе обеззараживания при свободном доступе к обмотке окружающего атмосферного воздуха и при прохождении зерна такой же температуры внутри тонкостенного каркаса разрабатываемой катушки индуктивности (рабочей камеры для обеззараживания) возможно обойтись без принудительного охлаждения рабочей камеры.

Производительность устройства для обеззараживания (через внутреннее пространство каркаса, на который намотана катушка индуктивности) определим по формуле, выведенной после подстановки выражений (10) и (14) в формулу (11) и соответствующих преобразований:

$$Q = 3\pi \cdot \frac{r \cdot D^2}{4} \cdot \frac{\gamma}{t} \approx 0,0254 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 91 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

**Пример 2.** Определение параметров устройства для обеззараживания с заданной производительностью установки.

Необходимая производительность установки  $Q = 1$  т/ч. Время пребывания под магнитным воздействием  $t = 1,5$  с.

Магнитная индукция  $B = 0,06$  Тл.

Принимаем, что радиус рабочей камеры без учета

толщины стенки каркаса равен  $r = \frac{l}{3}$ .

Определим объемный расход потока через рабочую камеру (внутреннее пространство каркаса, на который намотана катушка индуктивности) установки по формуле (15):

$$Q_V = \frac{1000 \cdot Q}{3600 \cdot \gamma} \approx 396,8 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}. \quad (15)$$

Определим объем рабочей камеры, исходя из ее заполнения зерном в зафиксированный момент времени:

$$V_k = Q_V \cdot t = 595 \text{ см}^3.$$

Поскольку объем камеры определяется еще и по формуле (16):

$$V_k = \pi r^2 \cdot l = 3\pi \cdot r^3, \quad (16)$$

то, выразив из нее радиус рабочей камеры, получим  $r \approx 0,04$  м.

Для рабочих напряжений  $U = 220$  В и частоте  $f = 1000$  Гц определим число витков катушки по формуле (9):  $N \approx 116$  витков.

Индуктивность катушки рассчитаем по формуле (4):  $L \approx 0,0007075$  Гн.

Необходимую величину тока в катушке индуктивности рассчитаем по формуле (5) с подстановкой в нее выражения (3), исходя из допущения, что активный ток в катушке несущественно мал по величине:  $I \approx 49,515$  А.

Мощность генератора установки для обеззараживания зерна низкочастотным магнитным полем рассчитаем по формуле (6):  $W \approx 10,893$  кВт.

Анализ проведенного расчета показывает, что, уменьшая радиус рабочей камеры магнитообеззараживающей установки  $r$  и тем самым увеличивая длину катушки индуктивности  $l$ , необходимую мощность генератора на создание низкочастотного магнитного поля можно уменьшить. Ограничением такого уменьшения является устойчивость истечения зерна через рабочую камеру, которое выражается условием (13).

Для пшеницы влажностью 14% при расходе потока через рабочую камеру установки  $Q = 1$  т/ч по нашим экспериментальным исследованиям минимальный внутренний радиус отверстия в катушке индуктивности составляет  $r_3 = 0,025$  м [13], что с учетом небольшого запаса для обеспечения устойчивости истечения зернового материала позволяет принять радиус рабочей камеры без учета толщины стенки каркаса равным  $r_3 = 0,03$  м = 3 см. Тогда длину катушки индуктивности рассчитаем из формулы (16):  $l = 0,21$  м.

Число витков катушки определим по формуле (9):  $N \approx 207$  витков.

Индуктивность катушки рассчитаем по формуле (4):  $L \approx 0,0007242$  Гн.

Ток в катушке индуктивности при частоте  $f = 1000$  Гц рассчитаем по формуле (5) с подстановкой в нее выражения (3) с учетом допущения, что активный ток в катушке несущественно мал по величине:  $I \approx 48,373$  А.

Мощность генератора установки рассчитаем по формуле (6):  $W \approx 10,642$  кВт.

Активное сопротивление катушки индуктивности при диаметре обмоточного провода  $r_{\text{II}} = 2,24$  мм = 0,00224 м определяем по формуле с учетом того, что электрическое сопротивление 1 м обмоточного медного провода круглого сечения равно  $\rho = 0,0044$  Ом/м [20]:  $R = 2\pi \cdot r \cdot N \approx 0,1716$  Ом.

Мощность тепловыделения обмотки катушки индуктивности рассчитаем по формуле (12):  $W \approx 0,4015$  кВт.

Выявленный уровень тепловыделения потребует дополнительных мер по отводу тепла от рабочей камеры (катушки индуктивности) магнитообеззараживающей установки, которые могут быть обеспечены пропиткой обмотки, искусственным воздушным охлаждением и др.

Проверку на развиваемую катушкой величину магнитной индукции проведем путем вычисления ее по формуле (1):  $B = 0,05989$  Тл.

Отклонение от заданной величины можно считать удовлетворительным. Оно может быть компенсировано добавлением в обмотку 8 витков.

## ВЫВОДЫ

Разработано два варианта методики выбора и расчета параметров электромагнита для установки обеззараживания зерна и семян переменным магнитным полем от возбудителей грибковых и бактериальных заболеваний.

Первый вариант позволяет определить рациональное использование характеристик выбранного генератора путем нахождения параметров обмотки катушки, обеспечивающих необходимую магнитную индукцию. Размер катушки и время воздействия на семена определяют производительность устройства по обработанному зерну. По этой методике рассчитана и изготовлена лабораторная установка для обеззараживания семян переменным магнитным полем, найдены его ингибирующие гармоники [12] и проведены экспериментальные испытания нового способа обеззараживания [13].

Во втором варианте методики расчета расход потока семян по рабочей камере (в электромагните) принимается по условиям производственной необходимости. Это влияет на размер катушки индуктивности, параметры и режимы ее работы, которые обеспечивают достаточную для обеззараживания магнитную индукцию, что в итоге определяет характеристики генератора. По данной методике можно вести расчет установок магнитообеззараживающей обработки зерна, она же (методика) показывает, что для рабочей камеры и катушки индуктивности с большой пропускной способности необходимо применение искусственного охлаждения.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** В.А. Максименко – разработка методики расчета и выбора параметров электромагнита для устройства обеззараживания зерна, написание текста статьи в части изложения методики расчета; изготовление электромагнитов по расчетам, предложенным в методиках, экспериментальная проверка соответствия расчетных параметров электромагнита его реальным значениям в изготовленном электромагните; К.Н. Буханцов – написание и редактирование текста рукописи в целом, в том числе в части написания обоснования актуальности исследований, поиск и анализ публикаций по теме статьи, участие в формулировании выводов, проверка и редактирование расчета, а также выбора параметров электромагнита, участие в экспериментальной проверке соответствия расчетных параметров электромагнита его реальным значениям в физически изготовленном электромагните.

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи).

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Научное исследование выполнено в рамках финансирования по Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы), утвержденной распоряжением Правительства РФ №3684-р от 31.12.2020 г. по шифрам госзадания: 0505-2022-0007 «Разработать интегрированный подход и новые принципы, процессы и технические средства в системе переработки зерновых культур» и 0706-2019-0006 «Разработать новые технологические принципы, процессы и технические средства в системе переработки и обеззараживания зерна и семян».

## ЛИТЕРАТУРА

- Петриченко В.В. Июньский прогноз урожая зерна 2018 г. – 115,6 млн т // *Хлебопродукты*. 2018. № 7. С. 4–5.
- Петриченко В.В. Октябрьский прогноз урожая зерна 2019 г. – 122,82 млн т // *Хлебопродукты*. 2019. № 11. С. 4–7.
- Петриченко В.В. Августовский прогноз «ПроЗерно» урожая зерна 2020 г. – 130,5 млн т // *Хлебопродукты*. 2020. № 9. С. 4–6.
- Петриченко В.В. Июльский прогноз урожая зерна 2021 г. – 123,6 млн т // *Хлебопродукты*. 2021. № 8. С. 4–7.
- Жидков С.А. Функционирование и развитие рынка зерна России в условиях насыщенности: монография. Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ, 2021.
- Бурьянов А.И., Бурьянов М.А., Червяков И.В. Уборка с дефектами // *Агробизнес*. 2018. № 3. С. 136–141.
- Brent K.J., Hollonion D.W. Fungicide Resistance in Crop Pathogens: how can it be Managed? 2nd, revised edition. Brussels: Fungicide Resistance Action Committee, 2007.
- Fisher M.C., Hawkins N.J., Sanglard D., Gurr S.J. Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security // *Science*. 2018. Vol. 360, N. 6390. P. 739–742. doi: 10.1126/science.aap7999
- Пахомов А.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н., Ватутина Н.П. Экспериментальное определение параметров магнитного обеззараживания зерна // *Аграрный научный журнал*. 2019. № 3. С. 84–89. doi: 10.28983/asj.y2019i3pp84-89
- Пахомов А.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н., Ватутина Н.П. Комбинированный конвективно-магнитный метод обеззараживания семенных материалов в АПК // *Техника и оборудование для села*. 2020. № 3. С. 33–36. doi: 10.33267/2072-9642-2020-3-33-36
- Пахомов А.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н., Ватутина Н.П. Результаты исследований по использованию вращающегося магнитного поля для обеззараживания зерна // *Хлебопродукты*. 2019. № 6. С. 40–43.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Authors' contribution.** V.A. Maksimenko — development of methods for calculating and selecting parameters of the electromagnet for grain disinfection device, writing the text of the manuscript in part of the statement of calculation methods; making electromagnets according to the calculations proposed in the methods, the experimental check of compliance of calculated parameters of the electromagnet to its real values in the manufactured electromagnet; K.N. Bukhantsov — writing and editing the text of the manuscript as a whole, including writing the rationale for the research relevance, search and analysis of publications on the topic of the manuscript, participation in the formulation of conclusions, checking and editing the calculation, as well as the choice of electromagnet parameters, complicity in experimental verification of compliance of calculated electromagnet parameters to their real values in the physically produced electromagnet.

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work.

**Competing interests.** The authors declare no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** The scientific research has been carried out within the framework of financing under the Program of fundamental scientific research in the Russian Federation for the long-term period (2021–2030), approved by RF Government Decree № 3684-p of 31.12.2020 on the state task codes: 0505-2022-0007 «To develop an integrated approach and new principles, processes and technical means in the system of grain crops processing» and 0706-2019-0006 «To develop new technological principles, processes and technical means in the system of processing and decontamination of grain and seeds».

12. Пахомов А.И. Биофизика и экспериментальный поиск ингибирующих гармоник магнитообеззараживающего оборудования // *Техника и оборудование для села*. 2021. № 6. С. 32–35. doi: 10.33267/2072-9642-2021-6-32-35
13. Пахомов А.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н., Ватутина Н.П. Исследование обеззараживающих свойств низкочастотных электромагнитных колебаний // *Техника и оборудование для села*. 2021. № 9. С. 9–11. doi: 10.33267/2072-9642-2021-9-9-11
14. Разработать исходные требования на технологическую линию обеззараживания зерна и семян с использованием комбинированных физико-химических методов воздействия: отчет о НИР (промежуточный): 0706-2018-0025/СКНИИМЭСХ ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»; Рук. Пахомов А.И. – Зерноград, 2018. – 96 с. – Исполн.: Пахомов А.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н., Ватутина Н.П. – Рег. № НИОКТР АААА-А17-117062110085-0. – Рег. № ИКРБС АААА-Б19-219031890206-1.
15. Пахомов А.И. Анализ влияния гармонического спектра магнитного поля на результаты магнитного обеззараживания зерна // *Техника и оборудование для села*. 2020. № 10(280). С. 22–27. doi: 10.33267/2072-9642-2020-10-22-27

## REFERENCES

1. Petrichenko VV. Iyun'skii prognoz urozhaya zerna 2018 g. – 115,6 mln t. *Khleboпродукты*. 2018;(7):4–5. (In Russ).
2. Petrichenko VV. Oktyabr'skii prognoz urozhaya zerna 2019 g. – 122,82 mln t. *Khleboпродукты*. 2019;(11):4–7. (In Russ).
3. Petrichenko VV. Avgustovskii prognoz «ProZerno» urozhaya zerna 2020 g. – 130,5 mln t. *Khleboпродукты*. 2020;(9): 4–6. (In Russ).
4. Petrichenko VV. Iyul'skii prognoz urozhaya zerna 2021 g. – 123,6 mln t. *Khleboпродукты*. 2021;(8):4–7. (In Russ).
5. Zhidkov SA. *Funktsionirovanie i razvitie rynka zerna Rossii v usloviyakh nasyshchennosti: monografiya*. Michurinsk: Izd-vo Michurinskogo GAU; 2021. (In Russ).
6. Bur'yanov AI, Bur'yanov MA, Chervyakov IV. Uborka s defektami. *Agrobiznes*. 2018;(3):136–141. (In Russ).
7. Brent KJ, Hollonion DW. *Fungicide Resistance in Crop Pathogens: how can it be Managed?* 2nd, revised edition. Brussels: Fungicide Resistance Action Committee; 2007.
8. Fisher MC, Hawkins NJ, Sanglard D, Gurr SJ. Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security. *Science*. 2018;360(6390):739–742. doi: 10.1126/science.aap7999
9. Pakhomov AI, Maksimenko VA, Bukhantsov KN, Vatutina NP. Experimental characterization of the parameters of grain's magnetic disinfection. *The Agrarian Scientific Journal*. 2019;(3):84–89. (In Russ). doi: 10.28983/asj.y2019i3pp84-89
10. Pakhomov AI, Maksimenko VA, Bukhantsov KN, Vatutina NP. A Combined Convective and Magnetic Method of Seed Disinfection in the Agricultural Sector. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(3):33–36. (In Russ). doi: 10.33267/2072-9642-2020-3-33-36
11. Pakhomov AI, Maksimenko VA, Bukhantsov KN, Vatutina NP. Results of research of use of the rotating magnetic field for grain disinfection. *Khleboпродукты*. 2018;(6):40–43. (In Russ).
12. Pakhomov AI. Biophysics and experimental search for inhibiting harmonics of magnetic disinfecting equipment.

16. Мансуров Н.Н., Попов В.С. Теоретическая электротехника. Изд. 9-е, исправленное. Москва-Ленинград: Издательство «Энергия», 1966.
17. Мучник А.Я., Парфенов К.А., Древш Г.В. Общая электротехника и электрооборудование. Москва: Высшая школа, 1961.
18. Жидко В.И., Резчиков В.А., Уколов В.С. Зерносушение и зерносушилки. Москва: Колос, 1982. 239 с.
19. Разработка методов применения технологии эффективной обработки сельскохозяйственных материалов с использованием обеззараживающих препаратов и электрофизических воздействий: отчет о НИР (промежу-точ.): 0706-2017-0009/СКНИИМЭСХ ФГБНУ «АНЦ «Донской»; рук. Пахомов А.И. Зерноград, 2017. 80 с. № ГР АААА-А17-117062110085-0. – Инв. № АААА-Б18-21802029 0063-1.
20. Бокуняев А.А., Борисов Н.М., Варламов Р.Г., и др. Справочная книга радиолобителя-конструктора / под ред. Н.И. Чистякова. Вып. 1147. Москва: Радио и связь, 1990. 624 с. (Серия: Массовая радиобиблиотека).

- Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;(6):32–35. (In Russ). doi: 10.33267/2072-9642-2021-6-32-35
13. Pakhomov AI, Maksimenko VA, Bukhantsov KN, Vatutina NP. Investigation of the disinfecting properties of low-frequency electromagnetic oscillations. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;(9):9–11. (In Russ). doi: 10.33267/2072-9642-2021-9-9-11
14. Razrabotat' iskhodnye trebovaniya na tekhnologicheskuyu liniyu obezzarazhivaniya zerna i semyan s ispol'zovaniem kombinirovannykh fiziko-khimicheskikh metodov vozdeistviya [Develop initial requirements for a technological line for the disinfection of grain and seeds using combined physical and chemical methods of exposure]: report on research work (interim): 0706-2018-0025/ NCSRIMEA FSBSI «ASC «Donskoy», manag.Pakhomov AI. Zernograd; 2018. 96 p. (In Russ). Executives: Pakhomov AI, Maksimenko VA, Bukhantsov KN, Vatutina NP. – Reg. № НИОКТР АААА-А17-117062110085-0. – Reg. № ИКРБС АААА-Б19-219031890206-1..
15. Pakhomov AI. Analysis of the influence of the magnetic field harmonic spectrum e on the results of grain magnetic disinfection. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020;(10):22–27. (In Russ). doi: 10.33267/2072-9642-2020-10-22-27
16. Mansurov NN, Popov VS. *Teoreticheskaya elektrotekhnika. Izd. 9-e, ispravlennoe*. Moscow-Leningrad: Izdatel'stvo «Energiya»; 1966. (In Russ).
17. Muchnik AY, Parfenov KA, Drevs GV. *Obshchaya elektrotekhnika i elektrooborudovanie*. Moscow: Vysshaya shkola; 1961. (In Russ).
18. Zhidko VI, Rezchikov VA, Ukolov VS. *Grain drying and grain dryers*. Moscow: Kolos; 1982. 239 p. (In Russ).
19. Razrabotka metodov primeneniya tekhnologii ehffektivnoj obrabotki sel'skokhozyajstvennykh materialov s ispol'zovaniem obezzarazhivayushchikh preparatov i ehlektrofizicheskikh vozdeystvij [Development of methods for the application of technology for the effective processing of agricultural materials using disinfecting drugs and electrophysical effects: report on research work]: report

on research work (interim): 0706-2017-0009/ NCSRIMEA FSBSI «ASC «Donskoy», manag.Pakhomov AI. Zernograd; 2017. 80 p. (In Russ). Executives: Pakhomov AI, Maksimenko VA, Bukhantsov KN, Braginec AV., Vatutina NP. №SR AAAA-A17-117062110085-0. – Inv. № AAAA-B18-218020290063-1.

## ОБ АВТОРАХ

### **\*Буханцов Кирилл Николаевич,**

ведущий инженер лаборатории биоэнерготехнологий;  
адрес: Россия, 347740, Ростовская обл., г. Зерноград,  
ул. Ленина, 14;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1141-9643>;

eLibrary SPIN: 5950-5055;

e-mail: buhantsov.k@gmail.com

### **Максименко Владимир Андреевич,**

к.т.н.,

ведущий научный сотрудник лаборатории  
биоэнерготехнологий (заведующий лабораторией);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1490-644X>;

eLibrary SPIN: 2509-9795;

e-mail: elektro\_sknimesh.rashn@mail.ru

\*Автор для переписки

**20.** Bokunyaev AA, Borisov NM, Varlamov RG, et al. Reference book of an amateur radio designer. Ed. by N.I. Chistyakov. Issue 1147. Moscow: Radio i svyaz'; 1990. 624 p. (Series: Mass Radio Library). (In Russ).

## AUTHORS' INFO

### **\*Kirill N. Bukhantsov,**

Leading Engineer of the Laboratory of Bioenergy Technology;  
address: 14, Lenina Street, Zernograd, Rostov Region,  
347740, Russia;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1141-9643>;

eLibrary SPIN: 5950-5055;

e-mail: buhantsov.k@gmail.com

### **Vladimir A. Maksimenko,**

Cand. Sci. (Engin.),

Senior Researcher at the Laboratory of Bioenergy Technology  
(Head of Laboratory);

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1490-644X>;

eLibrary SPIN: 2509-9795;

e-mail: elektro\_sknimesh.rashn@mail.ru

\*Corresponding author