



Потенциал применения комплекса экспресс-диагностики (Exsys, ИМДЦ-2) для тепловозных дизелей



Вячеслав Владимирович Егоров

Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К. А. Тимирязева (РГАУ–МСХА), Москва, Россия.

✉ egorov-empt@rgau-msha.ru.

Вячеслав ЕГОРОВ

АННОТАЦИЯ

В работе раскрываются аспекты применения разработанного автором аппаратно-программного комплекса экспресс-диагностики двигателей внутреннего сгорания.

Целью исследований является разработка алгоритмов, аппаратной и программной основ для системной диагностики тепловозных дизелей как комплексной методологии, направленной на локализацию неисправностей оптимальным путём.

К методам исследований относятся математическое моделирование для формирования алгоритма работы экспертной системы; методы наблюдения и эксперимента, используемые при конструкторской работе и совершенствовании разрабатываемого аппаратно-программного комплекса.

Использование методов оперативной диагностики является главным фактором для перехода к более эффективной системе технического сервиса по состоянию, позволяющей за счёт диагностирования при низких видах ТО предотвращать внезапные отказы, а также избегать демонтажа узлов с достаточным для дальнейшей эксплуатации ресурсом. Оперативные методы диагностики делятся на органолептические и индикаторные и относятся к первым двум уровням системной диагностики как практической методологии и научной дисциплины.

Органолептические данные основываются на органах восприятия человека и могут быть формализованы при помощи разработанной автором экспертной системы Exsys на основе открытых баз данных корреляции неисправностей с их признаками, позволяющей в диалоговом режиме локализовать неисправность по совокупности наблюдаемых внешних признаков, таких, как дымный выхлоп определённого цвета, нестабильная работа на холостом ходу и т.д.

Вторая разработка, комплекс «ИМДЦ-2», относится к индикаторным методам, представляя подкласс динамической диагностики. Комплекс состоит из аналого-цифрового преобразователя с устанавливаемым на двигатель датчиком частоты вращения вала и компьютерной программы, интерпретирующей получаемые данные. ИМДЦ-2 позволяет определять мощность двигателя, строить кривые разгона/выбега и получать ряд других характеристик, важных для диагностики, например, зависимость углового ускорения свободного разгона двигателя от частоты вращения его вала. Обе разработки могут быть в полной мере применены к тепловозным дизелям после незначительной доработки, что повысит точность выявления неисправностей и уменьшит время их локализации.

Ключевые слова: транспорт, тепловозный дизель, двигатель внутреннего сгорания, техническая диагностика, экспертная система, индикаторные методы.

Для цитирования: Егоров В. В. Потенциал применения комплекса экспресс-диагностики (Exsys, ИМДЦ-2) для тепловозных дизелей // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 1 (98). С. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-1-3>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В современных экономических условиях одним из важных факторов увеличения производительности предприятий транспорта и иных отраслей является повышение коэффициента готовности, иными словами – снижение простоев на техническом обслуживании (ТО) и ремонте (ТОР) при соответственном увеличении времени полезной работы. Эти цели могут быть достигнуты путём внедрения элементов сервиса по состоянию. В рамках данной системы периодичность ТОР различных узлов объекта (локомотива, трактора, автомобиля...) определяется путём диагностики ресурса при возможно низших видах ТОР.

Гибкая система диагностических методов, средств и технологий получила название системной диагностики. Её научное обоснование было получено в нашей стране ещё в начале 1970-х годов учёными института ГОСНИТИ: В. И. Бельских, В. М. Михлиным, В. А. Чечетом. В ходе эксперимента, отражённого в работе [1], определено, что корректировка ремонтно-обслуживающих воздействий по результатам предремонтного диагностирования тракторов позволяет снизить объём капитальных ремонтов (КР) практически на 30 %, в том числе с переводом части КР к текущим ремонтам. Также применение элементов сервиса по состоянию позволяет снизить число отказов в эксплуатации, а следовательно – число внеплановых ремонтов (для сельскохозяйственной отрасли, в которой проводился описанный эксперимент, данный фактор особенно важен, поскольку энергонасыщенные работы сосредоточены во времени, и выход из строя одной единицы техники может серьёзно повлиять на производительность).

Структура ремонтного цикла на транспорте схожа с применяемой в агропромышленном комплексе, поэтому внедрение в неё системной диагностики может быть проведено по аналогичным алгоритмам. Также комплексная диагностика применяется на пунктах технического осмотра автомобилей, оборудование которых подробно рассмотрено в монографии [2], что позволяет повысить безопасность дорожного движения.

В настоящее время интенсивное развитие микропроцессорной техники, в том числе аналого-цифровых преобразователей (АЦП), позволяет в значительной мере расширить

возможности диагностики как двигателей внутреннего сгорания, так и элементов тягового привода локомотивов и иных мобильных средств. В частности, немаловажную роль играет возможность подключения АЦП к компьютеру с последующим выводом показаний для текущей индикации и дальнейшей обработки. Помимо того, подобный формат диагностики позволяет снизить количество механических элементов в диагностическом оборудовании, ограничив его непосредственно установкой датчиков (давления, вибрации и т.п.). Всё это вкупе с современными методами обработки данных способствует повышению точности и снижению трудоёмкости диагностирования.

Цель исследований

Целью диагностики в целом является локализация неисправностей, вызвавших тот или иной отказ, либо определение остаточного ресурса объекта. В рамках настоящей работы *целью* исследований и проектирования является разработка и модернизация методов и средств диагностики двигателей внутреннего сгорания, ориентированных на методологию системной диагностики.

Методы исследований

Разработка описываемого аппаратно-программного комплекса на всём своём протяжении тесно связана с *методами* наблюдения и эксперимента, для разработки алгоритмического ядра экспертной системы применялось математическое моделирование. Также немаловажным методом при подобной работе является обзор литературы, позволяющий конкретизировать требования к результатам работы, а также избежать возможных ошибок.

Обзор современных методов экспресс-диагностики ДВС

В рамках системной диагностики, основы которой изложены коллективом кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве («ЭМТП и ВТР») Российского государственного аграрного университета – МСХА им. К. А. Тимирязева (РГАУ-МСХА), включая автора, в работе [3], принято разделение на три уровня диагностических методов и средств: органолептические, индикаторные и углублённые.

Первый уровень заключается в формализации *органолептических признаков* работы двигателя и использовании полученных данных для постановки диагноза. Органолептическими признаками называют те характеристики работы объекта, которые могут быть получены без специального инструментария, лишь при помощи органов чувств. К подобным признакам можно отнести: цвет выхлопа, неустойчивую работу двигателя, перегрев и т.д.

Главной задачей здесь является именно формализация признаков и их комплексное использование. Подобные интеллектуальные задачи могут быть решены лишь экспертами в области диагностики, обладающими большим опытом эксплуатации и обслуживания ДВС. Специалисты такого уровня являются очень ценным и редким кадровым ресурсом. Частично взять на себя их обязанности способны так называемые экспертные системы, являющиеся в некотором роде искусственным интеллектом, моделирующим мышление экспертов-диагностов. Входными данными для экспертных систем могут являться как органолептические признаки, так и показания датчиков.

В отечественной практике экспертные системы разрабатываются преимущественно для анализа данных, поступающих от датчиков, устанавливаемых на объект для проведения диагностики. Бытует мнение, что бортовые электронные системы наземной техники обладают широким спектром диагностических возможностей, однако, как установлено автором в работе [4], это в полной мере справедливо лишь для таких транспортных средств, как современные тепловозы. В частности, авторами работы [5] разработана экспертная система, использующая показания бортовых датчиков тепловоза для мониторинга работы и постановки диагнозов. Применительно конкретно к дизельным двигателям отечественными учёными разработан ряд экспертных систем, подобных описанной в работе [6], однако, их применение ограничено тем, что данные системы представляют собой лишь модели, требующие внешнего программного обеспечения для работы. Таким образом, представляет интерес реализация самодостаточной экспертной системы, способной работать без привязки к иным программам.

Ко *второму уровню* системной диагностики относят *индикаторные методы*, по-

зволяющие получать показания в оперативном режиме с помощью датчиков, установка которых не трудоёмка. Характерной особенностью подобных методов является не слишком высокая точность, которая компенсируется оперативностью и комплексным применением индикаторной диагностики. Данные от одиночного метода неспособны дать полноценное представление о состоянии объекта, но проведение дополнительных исследований способно в значительной мере повысить точность постановки диагноза.

Как правило, индикаторные методы подразделяют по физическим процессам, лежащим в их основе, на, например:

- пневматические методы, использующие параметры состояния (давление, в том числе и в динамике, расход) газовой среды в различных точках двигателя. Подобные методы описаны, к примеру, в работе [7];
- гидравлические методы, при проведении которых наблюдают за показателями, связанными с эксплуатационными жидкостями двигателя (масло, топливо, охлаждающая жидкость) [8];
- акустические и вибрационные методы, основанные на анализе осциллограмм механических колебаний [9];
- электрические методы, ориентированные на процессы, происходящие в электрооборудовании двигателя: к примеру, анализ осциллограммы тока стартера;
- динамические методы, позволяющие по показателям динамики двигателя (разгон, выбег, поведение на холостом ходу) выявлять снижение его рабочих показателей и устанавливать ключевые точки для дальнейшего поиска неисправностей.

Углубленные методы, составляющие *третий уровень* системной диагностики, обладают наивысшей точностью диагноза, но требуют подраборки двигателя для доступа к диагностируемому узлам. Применительно к тепловозным дизелям углублённые методы изучаются, к примеру, сотрудниками кафедры «Электропоезда и локомотивы» Российского университета транспорта В. Н. Балабиным, В. З. Какоткиным, И. И. Лобановым, что отражено в работе [10].

Иностранцами специалистами сформирован несколько иной подход к диагностике ДВС, поскольку в практике ряда стран к диагностике относят также мониторинг



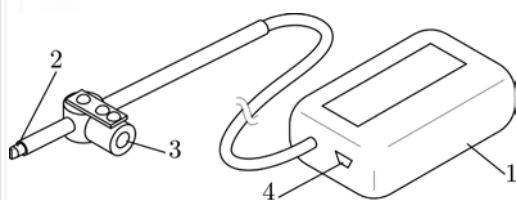


Рис. 1. Прибор ИМДЦ-2 [выполнено автором].

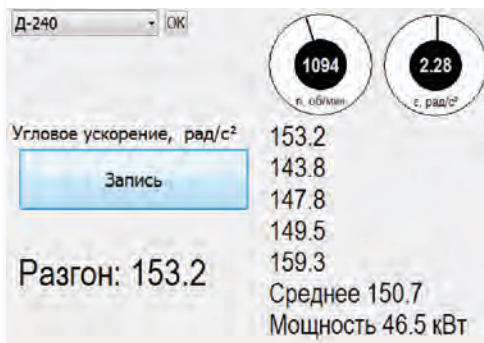


Рис. 2. Интерфейс программы-интерпретатора ИМДЦ-2. Снимок экрана при работе с двигателем Д-240 [выполнено автором].

экологических показателей двигателя и даже непосредственно изучение процессов сгорания в цилиндре. Примером может служить монография [11] авторов из Индии и США, затрагивающая многие связанные с дизельными двигателями вопросы. В восточноевропейских же странах понятие диагностики ближе к отечественной практике, к примеру, в статье [12] авторов из Словакии в таком ключе рассмотрены вопросы диагностирования двигателя рельсового автобуса серии 812.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Комплекс экспресс-диагностики ДВС и его модернизация

Автором разработан и модернизируется аппаратно-программный комплекс экспресс-диагностики, состоящий из экспертной системы Exsys (свидетельство о регистрации [13]) и комплекса «ИМДЦ-2» динамической диагностики.

Экспертная система Exsys основана на нечёткой логике и использует условные вероятности P_{ij} наличия признака S_j при неисправности D_i . Также учитывается так называемый коэффициент S_i силы, характеризующий силу проявления наблюдаемого признака либо уверенность оператора в его наличии. После выбора пользователем признаков реализуется первый проход работы так называемого ин-

версного алгоритма, основанного на двойном отрицании:

$$P_i = 1 - \prod_j (1 - s_j \cdot P_{ij}). \quad (1)$$

Алгоритмом определяются вероятности P_i наличия неисправностей («апостериорные»), представляемые программой в виде списка по убыванию. Если ни для одной из неисправностей не была получена установленная точность диагноза (80 %), система в режиме диалога с пользователем выделяет так называемые превалирующие неисправности, у которых апостериорная вероятность выше 0,5 от максимальной. Для каждой из них по аналогичному механизму определяются превалирующие признаки. Следующим шагом алгоритма является вычисление по формуле (1) максимального относительного отклонения $\Delta_{\max}^{\text{отн}}$ для определения наиболее характерных, «контрастных» признаков, позволяющих наиболее эффективно отделить возможные неисправности:

$$\Delta_{\max}^{\text{отн}} = P_{\max} \left(\frac{P_{\max} \cdot N}{\sum_{j=1}^N P_{ij}} - 1 \right), \quad (2)$$

где P_{\max} – максимальная условная вероятность для текущего признака;

N – количество рассматриваемых превалирующих неисправностей.

После достижения требуемой точности диагноза либо при исчерпании возможностей диалогового режима программа показывает окончательный список возможных неисправностей. При выборе конкретной неисправности отображается краткая справка по ней.

Для системы Exsys также создана теоретическая основа распознавания индикаторных показателей с дальнейшим преобразованием их в условные вероятности.

Программа Exsys версии 1.0 реализована на языке программирования Delphi.

Аппаратно-программный комплекс ИМДЦ-2 предназначен для определения динамических показателей двигателя на переходных режимах. Принцип работы комплекса основан на измерении частоты вращения коленчатого вала и определении показателей её динамики. Название комплекса является непосредственной отсылкой к прибору ИМД-Ц, разработанному в 1980-х годах, но на текущий момент устаревшему. Оба прибора способны определять мощность двигателя без применения стационарного оборудования,

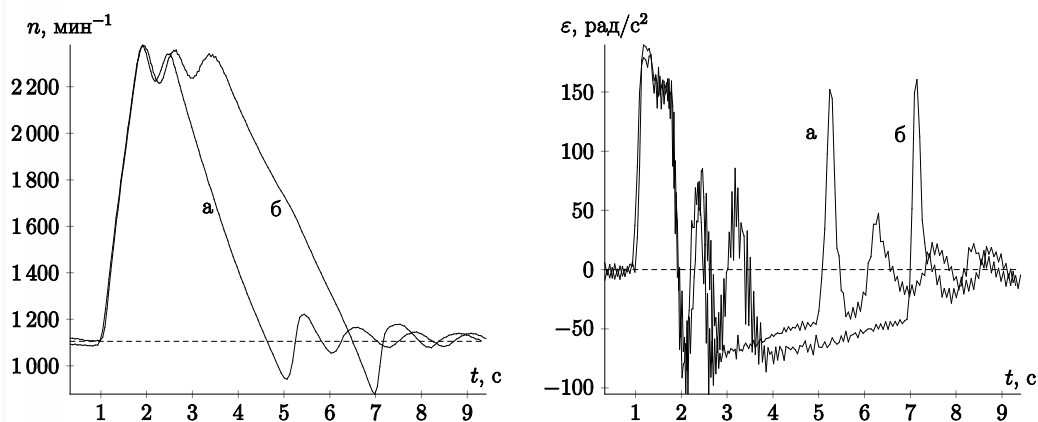


Рис. 4. Осциллограммы оборотов двигателя и углового ускорения (дизель Д-240). Экспериментальные данные, отрисовка средствами PGFPlots [выполнено автором].

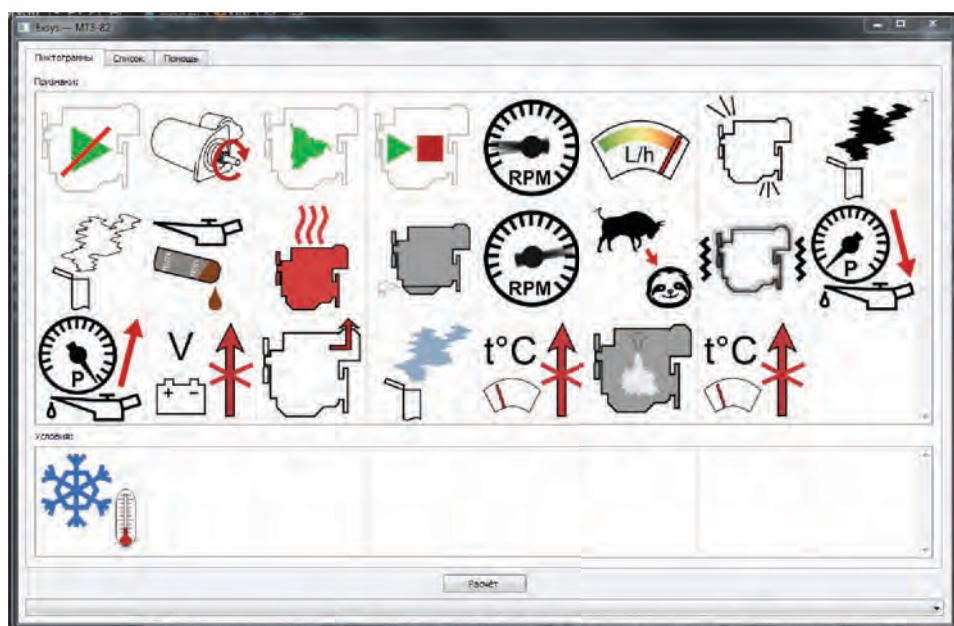


Рис. 5. Графический интерфейс экспертной системы Exsys v2.0. Снимок экрана при диагностике дизеля Д-240 [выполнено автором].

основа комплекса на базе языка Python, широко применяемого для решения задач научных исследований и искусственного интеллекта. К полученным результатам можно отнести следующие:

- за счёт перехода к побайтовой передаче данных повышена частота дискретизации до 7 кГц, что позволяет реализовать на подобной аппаратной основе низкобюджетный осциллограф для снятия циклических процессов, происходящих в двигателе;
- файлы баз данных экспертной системы не зависят от внешнего программного обеспечения и хранят внутри себя все необходи-

мые данные с возможностью включения формул, изображений и т.д.;

- за счёт использования графической оболочки PyQt значительно повышено удобство работы с экспертной системой, в том числе с переходом к использованию символьной графики (рис. 5).

Адаптация комплекса для тепловозных дизелей не представляется сложной задачей, поскольку происходящие с двигателями процессы одинаковы для всех дизелей. Более того, поскольку частота вращения коленчатого вала у тепловозных дизелей ниже, представляется возможным разместить на

диске-отметчике несколько магнитов (единственным условием будет высокая точность размещения магнитов, достижимая, к примеру, с использованием станков лазерной резки). Сам по себе магнитный принцип работы прибора также не является единственным и может быть заменён оптическим датчиком, фиксирующим прорезы на диске-отметчике.

В настоящее время ведётся работа по модификации прибора ИМДЦ-2 для использования в научно-исследовательской работе кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ на примере дизеля Д49.

ВЫВОДЫ

Описанный аппаратно-программный комплекс диагностики ДВС обладает высоким потенциалом применения для диагностики дизелей всех типоразмеров, в том числе тепловозных и судовых. При внесении некоторых изменений в конструкцию возможно повышение точности применительно к тепловозным дизелям. К главному преимуществу комплекса можно отнести его низкобюджетное исполнение и оперативность установки, что позволяет в полевых условиях произвести диагностику дизеля с дальнейшей локализацией возможных неисправностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бельских В. И. Показатели технического состояния тракторов и средства для их определения // Техника в сельском хозяйстве. – 1971. – № 9. – С. 70.
2. Калявин В. П., Давыдов Н. А. Надёжность и диагностика автомобилотранспортных средств: Монография. – СПб.: Элмор, 2014. – 466 с.
3. Четч В. А., Левшин А. Г., Скороходов А. Н., Егоров В. В. Основные положения системной диагностики машин // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ им. В. П. Горячкина». – 2018. – № 6 (88). – С. 51–55. [Электронный ресурс]: <http://elbib.timacad.ru/dl/full/vmgau-09-2018-06.pdf/download/vmgau-09-2018-06.pdf>. Доступ 27.08.2021.
4. Егоров В. В. Область применения бортовой диагностики самоходных технических средств // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 100-летию И. С. Шатилова. – РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева, 2017. – С. 295–297. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36668361>. Доступ 27.08.2021.
5. Ким С. И., Харитонов В. И., Долганова Е. В., Ким С. В. Встроенная экспертная система для

оперативной тестовой диагностики локомотива, оборудованного системой МСУ-Т (П, Э) // БРНИ. – 2014. – № 4 (13). – С. 46–50. [Электронный ресурс]: <http://brni.info/download/%D0%B2%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA-16-17.pdf>. Доступ 27.08.2021.

6. Полковникова Н. А., Курейчик В. М. Разработка модели экспертной системы на основе нечёткой логики // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 1 (150). – С. 83–92. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21111405>. Доступ 27.08.2021.

7. Колунин А. В., Шудыкин А. С., Белокопытов С. В. Определение состояния цилиндропоршневой группы двигателей военной техники по расходу картерных газов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – № 11. – С. 583–588. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36573798>. Доступ 27.08.2021.

8. Шевцов Ю. Д., Дудник Л. Н., Чернуха Ю. В., Фадеев Е. Д., Никифоров А. М. Алгоритм диагностики технического состояния двигателя по параметрам частотных характеристик масляного фильтра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2018. – № 4. – С. 63–70. [Электронный ресурс]: <https://infocom.spbstu.ru/userfiles/files/articles/2018/4/63-70.pdf>. Доступ 27.08.2021.

9. Гриценко А. В. Диагностирование газораспределительного механизма виброакустическим методом // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 48–57. DOI: 10.14529/engin170306.

10. Балабин В. Н., Какоткин В. З., Лобанов И. И. Результаты применения комплексной системы контроля и диагностики локомотивных дизелей // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 9. – С. 11–16. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22025115>. Доступ 27.08.2021.

11. Agarwal, A. K., Gupta, J. G., Sharma, N., Singh, A. P. Advanced Engine Diagnostics. Singapore, Springer, 2019, pp. 3–6. DOI: 10.1007/978-981-13-3275-3_1.

12. Ondriga, J., Zvolenský, P., Hřeček, S. Application of technical diagnostics in the maintenance of the internal combustion engine of diesel multiple units 812 series. Transportation Research Procedia, 2021, Vol. 55, pp. 637–644. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.030>.

13. Экспертная система технической диагностики на открытых базах (Exsys v1.0). – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019612928 / В. А. Четч; В. В. Егоров (заявл. 02.2019). [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39311673>. Доступ 27.08.2021.

14. Савенков Н. В., Понякин В. В., Чекулаев С. А., Бутенко В. В. Анализ характеристик современного оборудования для определения тягово-скоростных свойств автомобилей в лабораторных условиях // Вестник СибАДИ. – 2019. – № 3 (67). – С. 276–289. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38538411>. Доступ 27.08.2021.

15. Джалолов У. Х., Юнусов Н. И., Турсунбадалов У. А., Зиёев Ш. Ш., Хасанов Дж. Р. Идентификация параметров разгонной характеристики двигателя внутреннего сгорания // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 35. – С. 43–56. DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.03.

Информация об авторе:

Егоров Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, инженер путей сообщения, старший преподаватель кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка и высоких технологий в растениеводстве («ЭМТП и ВТР») Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева (РГАУ–МСХА), Москва, Россия, egorov-emp@rgau-msha.ru.

Статья поступила в редакцию 27.08.2021, одобрена после рецензирования 03.12.2021, принята к публикации 17.12.2021.

