

**ТРЕНИЕ И ИЗНОС В ХОДОВЫХ СИСТЕМАХ
ТЯГОВЫХ И ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН
С РЕЗИНОАРМИРОВАННЫМИ ГУСЕНИЦАМИ.
ОБЗОР ПРОБЛЕМ**

Федоткин Р.С., Крючков В.А., Федоткина А.А.

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье освещены вопросы трибологического взаимодействия в ходовых системах тяговых и транспортных машин с резиноармированными гусеницами на примере сельскохозяйственных тракторов. Учитывая взаимодействие не только с узлами и механизмами ходовой системы, но и с агрессивными факторами внешней среды, наиболее подверженным износу элементом является резиноармированная гусеница. Для нее рассмотрены разновидности процессов трения и изнашивания, дана их аналитическая оценка. В частности, рассмотрены механическое или физическое трение: трение в контакте с опорной поверхностью, ее рельефом, абразивными частицами и субстанциями; трение в контакте с ведущими и ведомыми элементами движителя, звездочками, катками, роликами и пр.; межмолекулярное или химическое трение: межслойное, гистерезисное трение в массиве резины. Разрушение конструкций резиноармированных гусениц в следствие износа является главным ограничением ресурса работы гусеничных ходовых систем. Описаны возможные способы снижения трения в ходовых системах и повышения надежности резиноармированных гусениц. Основным из них, помимо совершенствования рецептур, физико-механических свойств резиновых композиций и совершенствования технологического процесса их изготовления, является рациональное проектирование конструкций. Последнее может быть достигнуто исключительно применением современных методов оценки напряженно-деформированного состояния. Даны рекомендации для продолжения работы: разработка расчетно-теоретических методов проектирования конструкций резиноармированных гусениц; обобщение экспериментальных данным по разрушению резиноармированных гусениц в условиях реальной эксплуатации и в составе конкретных сельскохозяйственных машин; анализ причин и возможных последствий таких разрушений; формирование комплекса мер конструкторского и технологического характера для предотвращения разрушений элементов ходовых систем на различных этапах жизненного цикла, а также их восстановления в условиях реальной эксплуатации.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор; гусеничная ходовая система; резиноармированная гусеница; трение в контакте с опорной поверхностью; трение в контакте с ведущими и ведомыми элементами ходовой системы; межслойное трение; гистерезисное трение

**FRICITION AND WEAR IN TRACKED UNDERCARRIAGE SYSTEMS
OF TRACTION AND TRANSPORTATION VEHICLES WITH RUBBER
REINFORCED TRACKS**

Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A., Fedotkina A.A.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

ABSTRACT

The article covers the issues of tribological interaction in tracked undercarriage systems of traction and transportation vehicles with rubber reinforced tracks on agricultural tractors example. Taking into account the interaction not only with units and mechanisms of tracked undercarriage system, but also with aggressive environmental factors, the most exposed to wear element is rubber reinforced track. Varieties of friction and wear processes are considered for it, their analytical evaluation is given. In particular, we analyze mechanical or physical friction: friction in contact with the supporting surface, its relief, abrasive particles and substances; friction in contact with drive and driven elements of the propulsor, sprockets, rollers, etc.; intermolecular or chemical friction: interlayer, hysteresis friction in the rubber mass. Destruction of rubber reinforced track systems as a result of wear and tear is the main limitation of tracked undercarriage system life. Possible methods of friction reduction in tracked undercarriage system and reliability increase of rubber reinforced tracks are explained. The main of them, in addition to improving recipes, physical and mechanical properties of rubber compositions and improving the technological process of their manufacture, is a rational design of structures. The latter can be achieved only by applying modern methods of stress-strain assessment. Recommendations to further work on development of calculation and theoretical methods for designing of rubber reinforced track structures under conditions of real operation and as a part of concrete agricultural machines, analysis of reasons and possible consequences of such destructions are given. It is necessary to form a complex of measures of design and technological character for prevention of destructions of elements of tracked undercarriage systems at various stages of life cycle and also their restoration.

Keywords: agricultural tractor; tracked undercarriage system; rubber reinforced track; contact surface friction; friction in contact with drive and driven elements of tracked undercarriage system; interlayer friction; hysteresis friction

Общеизвестно, что гусеничная техника в отличие от колесной имеет повышенные тягово-цепные показатели и проходимость, что обеспечивает возможность ее работы в любых почвенно-климатических и дорожных условиях [1-4]. Кроме того, в зависимости от конструктивного исполнения гусеничных ходовых систем (ГХС) эксплуатационные свойства машин могут существенно различаться [1,2]. Тем не менее, ГХС в плане применения имеют некоторые ограничения. Одним из них является невысокий КПД гусеничного движителя (ГД), который содержит целый комплекс узлов и механизмов в отличие от колес с пневматическими шинами [3]. Взаимодействие деталей и узлов ГД сопровождается повышенным трением и износом.

Основным направлением по снижению трения и износа в элементах ГД сегодня является применение в конструкциях полимерных и полимерно-композитных материалов, в т.ч. обладающих антифрикционным и самосмазывающим эффектом. Однако вопрос трибологического взаимодействия в парах трения элементов ГД: металл-металл, металл-полимер, металл-композит и тем более композит-композит остается малоизученным и крайне насущным в тренде общего ресурсосбережения.

В связи с этим целью настоящей работы является анализ особенностей трибологического взаимодействия и описание существующих видов трения в конструкциях современных ГД.

Современной тенденцией развития конструкций тяговых, транспортных и транспортно-технологических средств является применение резиноармированных гусениц (РАГ) в ГХС. Это связано с преимуществами РАГ над гусеницами других типов: высокий ресурс работы и надежность (3000-5000

моточасов); пониженные уровни шума на 10 дБ, вибрации на 65-70% и уплотняющего воздействия на почву в 1,5-2,0 раза; снижение расхода топлива до 30%; возможность движения по дорогам общего пользования без их повреждения и т.д. [4-5].

На рис.1 представлены опытные образцы сельскохозяйственных тракторов с резиноармированными гусеницами.



Рис.1. Сельскохозяйственные тракторы с РАГ: *а* – ВТ-150 с овальным гусеничным обводом; *б* – Агромаш-Руслан с треугольным гусеничным обводом.

Ходовая система гусеничного трактора с РАГ представлена на рис.2.

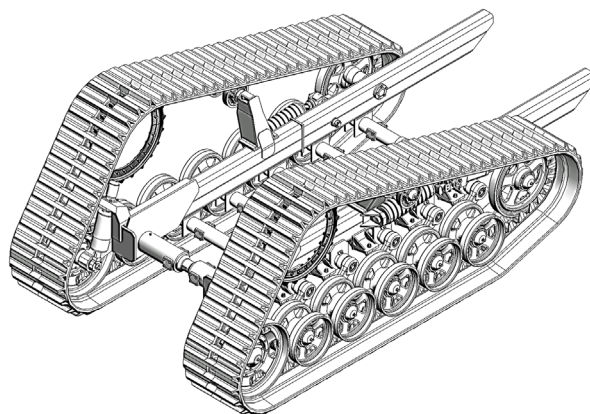


Рис.2. Общий вид ходовой системы опытного образца трактора НАТИ-04 с РАГ.

На рис.3 приведено поперечное сечение РАГ.

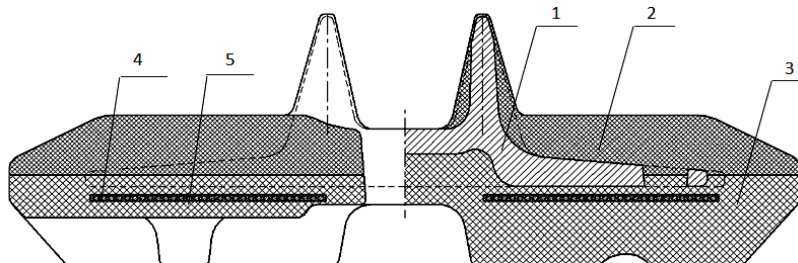


Рис.3. Общий вид и поперечный разрез фрагмента РАГ 470x126: *1* – закладной элемент; *2* – слой беговой резины; *3* – слой протекторной резины; *4* – слой обкладочной резины; *5* – армирующий сердечник.

В качестве закладных элементов в РАГ используются отливки из самоупрочняемой стали (типа 110Г13Л). Хотя все большее распространение сегодня получают конструкции из полимерно-композитных материалов. Главным образом на основе стекло- и полиамидного волокна. На малогабаритной технике развитие получают также конструкции РАГ без закладных элементов. Применяемые резиновые композиции, как и армирующий сердечник в большинстве своем приближаются к компонентам пневматических шин грузовых транспортных средств. Но учитывая повышенные тяговые и тормозные нагрузки в ГД, в т.ч. при повороте машины, рецептуры резиновых смесей дорабатывают. В качестве армирующего сердечника может использоваться металлотросовое или металлокордное полотно. Причем последнее собирается укладкой с определенным шагом канатиков или тросов различной конструкции, направления закручивания и вида покрытия (латунированное, оцинкованное и др.). Количество слоев полотна и угол его раскрытия могут различаться. Получают развитие сердечники на основе стекло-, угле-, полиамидных и других волокон.

Появление РАГ искоренило как таковую проблему выхода из строя ГД по обрыву траков из-за абразивного износа шарниров. Однако целостность конструкции РАГ, обеспеченная высокотемпературной адгезией на стадии производства, не исключает появление повреждений и отказов в результате трения и изнашивания: механического разрушения полимерных слоев, расслаивания, поперечных трещин резинового массива, вырывов из конструкции армирующих элементов, а также химического разрушения резины.

Следует отметить, что химическое разрушение для отработанных рецептур резиновых смесей и технологии изготовления РАГ возможно в эксплуатации при комплексном действии физических показателей окружающей среды и биохимических факторов органического слоя почвы. В основном химическое разрушение проявляется в виде внезапного и полного растрескивания, а также разрыхления и разрушения резинового массива с выделением наружу пластификатора белого цвета. Это характерно для опытных конструкций, режимы вулканизации которых еще не отработаны.

РАГ является основным элементом машины, взаимодействующим с агрессивными факторами среды, отделяя от последней узлы и детали ГД. Процессы трения, в которых участвует РАГ в эксплуатации, можно разделить следующим образом:

- механическое (физическое) трение: трение в контакте с опорной поверхностью, ее рельефом и абразивом; трение в контакте с ведущими и ведомыми элементами ГД (звездочками, катками, роликами и пр.);
- межмолекулярное (химическое) трение: межслойное (по меньшей мере, три слоя резины с различными физико-механическими свойствами соединены между собой посредством адгезивов); гистерезисное трение в массиве резины.

ТРЕНИЕ В КОНТАКТЕ С ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Трение в контакте с опорной поверхностью зависит от параметров конструкции ходовой системы, в т.ч. площади опорной ветви гусеницы и рисунка протектора, сцепного веса машины и его распределения по опорной поверхности, тягового потенциала машины, а также характеристик почвы: ее физико-механических свойств, биохимического состава, абразивности и пр.

Износ РАГ в эксплуатации происходит неравномерно вследствие постоянного изменения режимов движения и работы машины (трогание с места, торможение и остановка, прямолинейное и криволинейное движение на разных передачах). Кроме того, характеристики почвенного фона под опорной ветвью гусеницы в эксплуатации также непостоянны.

Трение в контакте РАГ с опорной поверхностью главным образом вызывает износ ламелей и почвозацепов протектора с постепенным растрескиванием и отрывом последних. При эксплуатации РАГ на твердой поверхности с усовершенствованным покрытием (асфальт, бетон и пр.) возможно полное истирание почвозацепов.

Следует отметить, что практически все элементы ГД как и РАГ работают в условиях высокоабразивного трения с почвой.

ТРЕНИЕ В КОНТАКТЕ ГУСЕНИЦЫ С НАПРАВЛЯЮЩИМИ, ОПОРНЫМИ И ПОДДЕРЖИВАЮЩИМИ КОЛЕСАМИ

Данные элементы: катки, ролики и ленивцы являются ведомыми. Однако под действием растягивающих усилий в гусеничном обводе вдавливаются в резиновый массив гусеницы на некоторую глубину, формируя пятно контакта. Длина дуги поверхности впадины, сформированной профилем катка, превышает теоретическую длину участка гусениц в этом же месте без нагрузки и длину прямолинейных участков гусеницы, находящихся между катками. Поэтому имеет место неравномерность вращения гусеницы с повторяющимся процессом формирования и выравнивания впадин. Сам факт циклично повторяющейся упругой деформации резинового массива наряду с перегибами РАГ на угловых участках обвода уже говорит о наличии износа. Кроме того, это приводит к локальному проскальзыванию катков относительно гусеницы. При этом с увеличением глубины погружения катка в резиновый массив при действии динамических нагрузок, увеличивается и величина проскальзывания. Интенсивность изнашивания рабочих поверхностей многократно увеличивается в виду постоянного наличия абразива между ними.

Трение в контакте РАГ с элементами гусеничного обвода приводит к истиранию шин, ободьев колес, катков и образованию поперечных трещин беговых дорожек РАГ с постепенным их перерастанием в макротрещины на всю ширину РАГ, а по глубине – до армирующего слоя, вызывая ее коррозию с последующим обрывом.

ТРЕНИЕ В КОНТАКТЕ ГУСЕНИЦЫ С ВЕДУЩИМИ КОЛЕСАМИ

Определяющим фактором трения в данном случае является тип гусеничного зацепления: цевочный, гребневый, фрикционный или комбинированный. Очевидно, что фрикционное зацепление, а также его составляющие в комбинированных типах, осуществляют передачу крутящего момента за счет трения рабочих поверхностей ведущих колес о резиновый массив РАГ. Данное трение вызывает износ рабочих поверхностей, особенно при наличии на них абразива. При передаче же крутящего момента с помощью зубьев или гребней рабочие поверхности ведущих колес, в т.ч. и профилированные, истираются, выкрашиваются и деформируются.

МЕЖСЛОЙНОЕ ТРЕНИЕ

Межслойное трение возникает между пограничными слоями материалов гусеницы (рис.4): беговая и обкладочная резины, обкладочная и протекторная резины и особенно обкладочная резина и армирующее металлотовосое или металлокордное полотно. В процессе работы РАГ возникающие в переходных слоях напряжения различны вследствие различия их физико-механических свойств. В результате конструкция РАГ, внешне являясь монолитной, испытывает неравномерное внутреннее трение слоев, усугубляющееся в динамике. Следствием такого трения может стать расслоение. Хотя современные клеевые составы и соблюдение установленных режимов вулканизации при одновременном действии усилия прессы порядка 2100 т и температуры около 150°С практически полностью исключают расслоение РАГ.

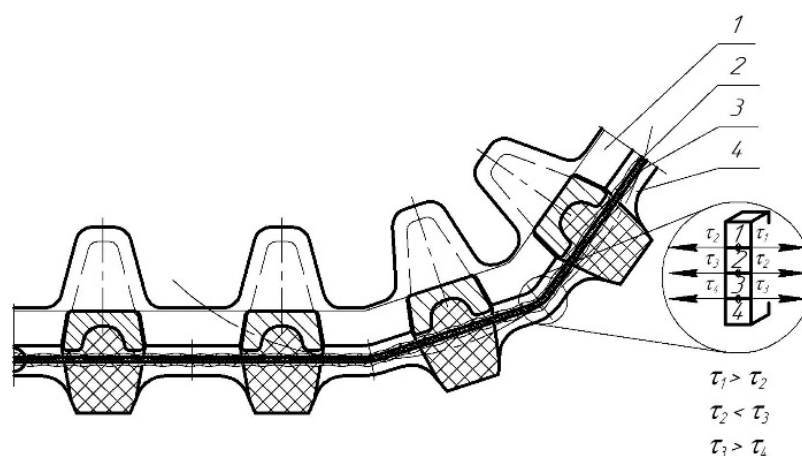


Рис.4. Межслойное трение между слоями гусеницы: 1 – резина беговая; 2 – резина обкладочная; 3 – тросовое полотно; 4 – резина протекторная; $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$ – касательные напряжения слоев.

ГИСТЕРЕЗИСНОЕ ТРЕНИЕ В МАССИВЕ РЕЗИНЫ

Гистерезисное трение в массиве резины возникает во внутренних слоях резины и предполагает способность материалов воспринимать упругие деформации под действием циклической нагрузки-разгрузки и описывается гистерезисными потерями. Для оценки гистерезисных потерь и упруго-демпфирующих характеристик (УДХ) используются специализированные универсальные разрывные машины и оригинальные испытательные приспособления. Они позволяют воспроизводить реальное нагружение отдельных фрагментов РАГ при помощи специальных захватов и инденторов. Исследования позволяют получить УДХ, имеющие петлю гистерезиса, характеризующую диссипацию энергии внутри многослойной и многокомпонентной конструкции. Пример установки и приспособлений для оценки УДХ РАГ при действии контактного давления со стороны опорных катков приведен на рис.5.

На основании полученных экспериментальных данных можно определить жесткость фрагмента гусеницы в рассматриваемом режиме нагружения, а также коэффициент поглощения энергии. Эти данные уже можно использовать при определении вибрационной нагруженности машин и выборе параметров системы подрессоривания.

Помимо перечисленного трение присутствует в опорах вращающихся элементов конструкции ГД, а также шарнирных соединения тяг и рычагов амортизационно-натяжных и компенсирующих устройств, подвески и т.д. Во многих случаях потери на трение в таких узлах оцениваются известными аналитическими зависимостями, а также дополняются специфическими для каждого конкретного случая аналитическими преобразованиями, как это сделано в работе [6].

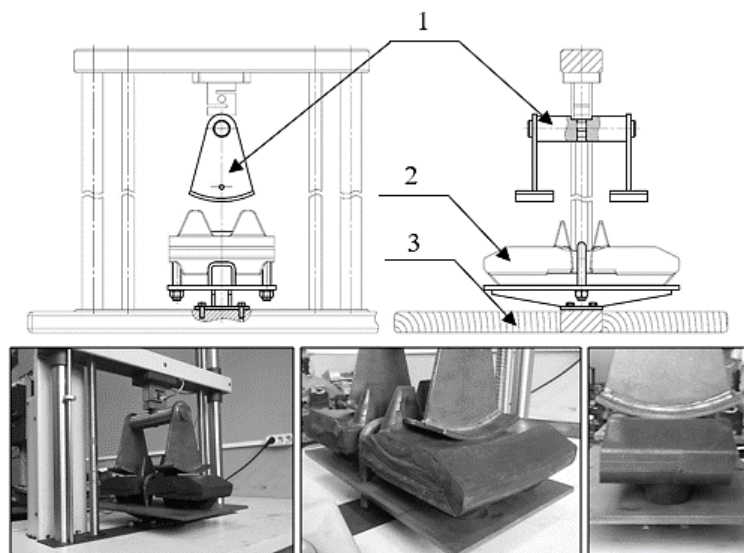


Рис.5. Испытательная установка для получения УДХ шагов РАГ: 1 – индентор; 2 – фрагмент РАГ; 3 – опорный стол.

О СПОСОБАХ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА В ГХС

Существуют различные способы снижения указанных видов трения. Так трение в контакте с опорной поверхностью можно снизить за счет повышения сцепных качеств машины и РАГ, в частности, совершенствования ее конструкции и геометрии, динамического управления трансмиссией, подвеской, конфигурации гусеничного обвода и т.д. Межслойное трение требует подбора резиновых смесей с улучшенными физико-химическими свойствами, снижения слоистости конструкции; исключения материалов с большими модулями упругости, поиска новых адгезивов, применения композиционных материалов, близких по свойствам к резине. Гистерезисное трение в массиве резины можно уменьшить за счет создания новых композиций резиновых смесей, изменения условий циклического взаимодействия, увеличения равномерности распределения нагрузки, сокращения длительности и интенсивности взаимодействия.

Однако в последнем случае необходимо не просто снижать гистерезис до минимума, но добиваться его оптимальной величины для обеспечения необходимых УДХ, которые позволят смягчать и поглощать энергию от толчков и ударов при движении машины по неровностям пути.

Отдельно следует уделить внимание рациональному проектированию и расчету конструкций РАГ с учетом возможных режимов и условий работы конкретной машины. Существуют некоторые примеры расчета конструкций РАГ. Например, в работе [7] приведен расчет напряженно-деформированного состояния конструкции РАГ сельскохозяйственного трактора методом конечных

элементов. Но, к сожалению, на сегодняшний день отсутствуют какие-либо варианты полноценных методик расчета и выбора конструкторско-технологических и физико-механических параметров конструкций РАГ на стадии проектирования.

ВЫВОДЫ

1. Учет различных факторов трения при работе РАГ улучшит общетехнические, эксплуатационные и потребительские качества машин и снизит риски внезапных отказов.

2. Трение в элементах гусеничной ходовой системы приводит к возникновению отказов и повреждений не только в ходовой системе, но и распространяется как параметрически, так и функционально на несущую систему и трансмиссию машины, а также влияет на условия труда оператора.

3. Необходимо помнить, что как физическое, так и химическое разрушение резины, способствует появлению продуктов износа в почве, приводящему к загрязнению сельскохозяйственной экосистемы.

4. Снижение трения в ходовых системах с РАГ необходимо и возможно на всех этапах жизненного цикла машины, что повышает актуальность поиска новых методов и средств снижения трения.

5. В качестве рекомендаций для дальнейшей работы. Следует обобщить и систематизировать материалы по разрушению конструкций РАГ в условиях реальной эксплуатации и в составе конкретных сельскохозяйственных машин, проанализировать причины и возможные последствия таких разрушений, а также сформировать комплекс мер конструкторского и технологического характера для предотвращения разрушений РАГ на различных этапах жизненного цикла, а также их восстановления в условиях реальной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas Keller, Johan Arvidsson. *A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles* // Soil and Tillage Research. – 2016. – Vol.155. – Pp.116-123.
2. Dwyer M.J., Okello J.A., Scarlett A.J. *A theoretical and experimental investigation of rubber tracks for agriculture* // Journal of Terramechanics. – 1993. – Vol.30. – №4. – Pp.285-298.
3. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Атаманов Ю.Е., Бочаров Н.Ф., Ксенович И.П., Солонский А.С. *Тракторы: Теория*. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
4. Шарипов В.М., Измайлов А.Ю., Дорохов А.С., Федоткин Р.С., Крючков В.А., Есеновский-Лашков М.Ю., Овчинников Е.В. *К вопросу создания отечественного гусеничного трактора для современного сельскохозяйственного производства* // Тракторы и сельхозмашины. – 2018. – №2. – С.17-25.
5. Beininson V.D., Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A., Alendeev E.M., Kupryunin D.G. *Ways of improving the service life of rubber-reinforced tracks* // International polymer science and technology. – 2016. – №5. – Pp.28-31.
6. Бульбутенко С.С., Федоткин Р.С., Овчаренко А.С., Бейненсон В.Д. *Влияние трения в шарнирах на работоспособность амортизационно-натяжного устройства гусеничного движителя* // Известия Московского

государственного технического университета МАМИ. – 2013. – Т.1. – №2 (16). – С.12-19.

7. Толстов А.М., Юрцев Л.Н., Соколов С.Л., Веселов И.В. *Исследование напряженно-деформированного состояния резиноармированных гусениц (РАГ) методом конечных элементов. Часть 2. Результаты исследования // Каучук и резина. – 2013. – №2. – С.38-42.*

REFERENCES

1. Thomas Keller, Johan Arvidsson. *A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles.* Soil and Tillage Research, 2016, Vol.155, Pp.116-123.
2. Dwyer M.J., Okello J.A., Scarlett A.J. *A theoretical and experimental investigation of rubber tracks for agriculture.* Journal of Terramechanics, 1993, Vol.30, No4, Pp.285-298.
3. Gus'kov V.V., Velev N.N., Atamanov Yu.E., Bocharov N.F., Ksenevich I.P., Solonskiy A.S. *Traktory: Teoriya [Tractors: Theory].* Moskva, Mashinostroenie, 1988, 376 p.
4. Sharipov V.M., Izmajlov A.Yu., Dorohov A.S., Fedotkin R.S., Kruchkov V.A., Esenovskiy-Lashkov M.Yu., Ovchinnikov E.V. *K voprosu sozdaniya otechestvennogo gusenichnogo traktora dlya sovremennogo sel'skokhozyajstvennogo proizvodstva [On the issue of creating a domestic crawler tractor for modern agricultural production].* Traktory i sel'khoz mashiny, 2018, No.2, Pp.17-25.
5. Beininson V.D., Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A., Alendeev E.M., Kupryunin D.G. *Ways of improving the service life of rubber-reinforced tracks.* International polymer science and technology, 2016, No5, Pp.28-31.
6. Bulbutenko S.S., Fedotkin R.S., Ovcharenko A.S., Beininson V.D. *Vliyanie treniya v sharnirakh na rabotosposobnost' amortizatsionno-natyazhnogo ustrojstva gusenichnogo dvizhitelya [The effect of friction in track joints on the reliability of the shock-absorbing and tensioning device of the caterpillar mover].* Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI, 2013, Vol.1, No.2 (16), Pp.12-19.
7. Tolstov A.M., Yurtsev L.N., Sokolov S.L., Veselov I.V. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya rezinoarmirovannykh gusenits (RAG) metodom konechnykh ehlementov. Chast' 2. Rezul'taty issledovaniya [Investigation of the stress-strain state of rubber-reinforced tracks by the finite element method. Part 2. Results of investigation].* Kauchuk i rezina, 2013, No2, Pp.38-42.

Поступила в редакцию 3 августа 2020 года.

Сведения об авторах:

Федоткин Роман Сергеевич – к.т.н., зав.лаб., в.н.с., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия; e-mail: frs89@bk.ru

Крючков Виталий Алексеевич – к.т.н., в.н.с., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия; e-mail: kryuchkov.vitaliy@gmail.com

Федоткина Анна Андреевна – вед. инж., ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия; e-mail: anna.trokhina@mail.ru