

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЕДУЩИХ КОЛЕС ЦЕВОЧНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ С РЕЗИНОАРМИРОВАННЫМИ ГУСЕНИЦАМИ

д.т.н. Шарипов В.М.¹, к.т.н. Федоткин Р.С.², к.т.н. Крючков В.А.², Богданов К.А.², Волков П.И.²

¹Московский политехнический университет, Москва, Россия,

²ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Москва, Россия

trak@mami.ru, mercenario101@yandex.ru

Явные преимущества резиноармированных гусениц над гусеницами других типов делают их незаменимыми для тяговых и транспортных машин различного назначения. Кроме всего прочего, такие гусеницы отличаются возможностью их установки на машину взамен металлических гусениц без существенной переделки конструкции ходовой системы. Тем не менее, вместе с заменой металлической гусеницы на резиноармированную на практике необходимо также заменить существующее ведущее колесо на специально разработанное под резиноармированную гусеницу. Это обусловлено принципиальными различиями конструкций гусениц и особенностями их работы. До недавнего времени единой инженерной методики проектирования зацепления ведущего колеса с резиноармированной гусеницей не существовало. В одной из предыдущих работ авторами разработана методика, учитывающая особенности резиноармированных гусениц. В настоящей статье приведена экспериментальная проверка этой методики на примере конкретной машины – самоходного гусеничного опрыскивателя сельскохозяйственного назначения. Спроектированные в соответствии с разработанной методикой опытные образцы ведущих колес в составе самоходного гусеничного опрыскивателя прошли комплекс заводских испытаний, включая статический и динамический этапы. На статическом этапе испытаний была произведена проверка входа и выхода зубьев ведущих колес из зацепления в процессе сборки узла привода ходовой системы. В процессе динамического этапа произведена проверка надежности работы зацепления на различных режимах движения и загрузки самоходного гусеничного опрыскивателя. Дополнительно было проведено исследование работы зацепления в динамике при вывешенном борте ходовой системы. Экспериментальные исследования подтвердили надежность работы образцов ведущих колес, достоверность и адекватность разработанной методики. Также в работе приведены рекомендации для дальнейшего исследования цевочного зацепления и доработки методики их проектирования, в том числе за счет создания специализированного стендового оборудования.

Ключевые слова: самоходный гусеничный опрыскиватель, ходовая система, цевочное зацепление, ведущее колесо, резиноармированная гусеница, методика проектирования, экспериментальные исследования

Введение

Совершенствование конструкции гусеничных ходовых систем остается актуальной задачей, учитывая возможность машин, оснащенных такими ходовыми системами, работать в специфических условиях.

Применение конструкций резиноармированных гусениц (РАГ) в составе ходовых систем тяговых и транспортных машин, а также транспортно-технологических комплексов отвечает современным тенденциям развития сельскохозяйственного машиностроения и производства благодаря известным преимуществам [1–9], одним из которых является воз-

можность их установки на машину без коренной переделки конструкции ходовых систем.

Тем не менее, как показывает практика, разработку ведущих колес (ВК) необходимо осуществлять индивидуально под РАГ [4, 5, 9]. Это обусловлено конструктивными различиями РАГ с металлической гусеницей и повышенной нагруженностью венцов и зубьев ВК в случае применения РАГ в виду наличия продольной податливости последней, т.е. шаг РАГ при движении по дуге охвата изменяется, что вызывает дополнительное скольжение цевок закладных элементов (ЗЭ) по зубьям РАГ.

Разработанная ранее методика проектирования ВК с выпуклым профилем зубьев цевоч-

ного зацепления с РАГ [9] позволяет построить надежное и работоспособное гусеничное зацепление. Она может быть использована при разработке гусеничных ходовых систем тяговых и транспортных машин различного назначения, в том числе и малогабаритных самоходных гусеничных шасси.

В данной методике учтены следующие основные особенности конструкции РАГ:

- перегиб РАГ происходит по ломанной линии, а не по дуге в виду наличия в конструкции ЗЭ;
- РАГ имеет условные шарниры, в которых происходит ее перегиб;
- элементом зацепления РАГ с ВК является цевка ЗЭ с участком армирующего силового слоя длиной в шаг РАГ.

Методикой также определены геометрические параметры ВК применительно к РАГ, а также граничные условия и ограничения для их определения.

Цель исследования

Целью исследования является экспериментальная проверка достоверности и обоснованности разработанной методики проектирования ВК, а также ее отработка на примере конкретной машины – самоходного гусеничного опрыскивателя сельскохозяйственного назначения.

Материалы и методы исследования

Исследование гусеничного зацепления проводилось на самоходном опрыскивателе (рис. 1), разработанным в рамках научно-исследовательской работы [10].

Самоходный гусеничный опрыскиватель (СГО) является модификацией колесного опрыскивателя [11–14] и предназначен для внесения средств химизации при обработке низкорастущих сельскохозяйственных культур. Технические характеристики машины приведены в табл. 1.



Рис. 1. Самоходный гусеничный опрыскиватель

Таблица 1

Технические характеристики СГО

Габаритные размеры Д×Ш×В, мм	1600×1600×950
Максимальная скорость движения, км/ч	8,0
Эксплуатационная масса (не более), кг	400
Полная масса (с заправленным баком), кг	900
Суммарная мощность мотор-редукторов, кВт	6,0
Типоразмер РАГ	200×72×47
Максимальное давление на почву, кПа	55,2
Частота вращения вала на выходе из редуктора, мин ⁻¹	186
Крутящий момент, Н·м	153

На данном этапе разработки СГО находится в рабочем состоянии в части шасси. Подключение элементов электрической и гидравлической систем СГО планируется на следующем этапе.

Проектирование профиля зубьев ВК производилось в соответствии с зависимостями, приведенными в работе [9].

Оценка контактной и изгибной прочности зубьев ВК производилась в соответствии с известной методикой, изложенной в работах [1, 3].

Оптимизация конструкции ВК по массе проводилась в программной среде *SW Simulation* с применением метода конечных элементов.

Проверка достоверности и обоснованности разработанной методики проектирования ВК осуществлялась путем изготовления опытных образцов ВК, их установкой в узел привода СГО и проведением заводских испытаний последнего на гладком бетонном покрытии.

Заводские испытания включали два основных этапа: статический и динамический.

При статических испытаниях осуществлялась проверка входа зубьев ВК в зацепление с РАГ и выхода из него при сборке ходовой системы.

При динамических испытаниях осуществлялась проверка плавной и безударной работы зацепления при различных режимах движения СГО:

- прямолинейное движение (вперед/назад);
- повороты с различными радиусами, в том числе и вокруг центра масс СГО.

Также более глубокое исследование работы зацепления в динамике осуществлялось при вывешенных бортах СГО.

Результаты исследования и их обсуждение

Профиль зубьев ВК, полученный в результате проектирования, представлен на рис. 2.

Исходя из условий прочности, в качестве основного материала принята сталь 09Г2С.

Была произведена оптимизация конструкции ВК по массе за счет формирования спиц.

Каждый образец ВК выполнен сварным и состоит из двух листовых заготовок. Зубчатый венец получен с помощью одной технологической операции – лазерной резки на координатном станке с числовым программным управлением.

Изготовленные образцы ВК были установлены в узлы привода СГО (рис. 3).

В процессе сборки ходовой системы СГО и установки ВК выявлено, что зубья ВК свободно входят в цевочный проем РАГ и выходят из него без заеданий и заклинивания даже при максимальном охвате ВК РАГ. При этом профильные поверхности зубьев, находящихся в цевочных проемах, соприкасаются с поверхностями цевок ЗЭ без зазоров.

Динамическими испытаниями при различных режимах движения (прямолинейное движение и поворот с различными радиусами, в

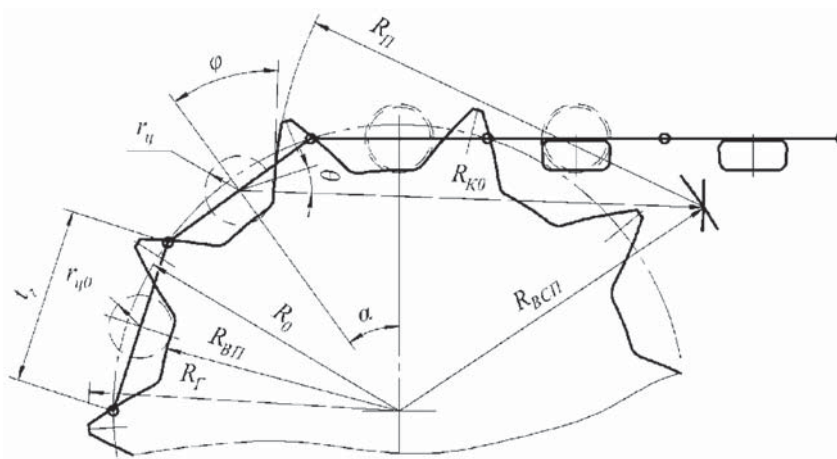


Рис. 2. Профиль зубьев ВК, полученный в результате проектирования:

$R_{ВП}$ – радиус окружности впадин; $R_{ВСП}$ – радиус вспомогательной окружности; $R_{Г}$ – радиус головок зубьев; $R_{КО}$ – радиус центральной дуги; $R_{П}$ – радиус профильной дуги окружности зуба; $r_{ц}$ – радиус цевки ЗЭ, отложенный из центра условного шарнира до поверхности цевки ЗЭ, соприкасающейся с дугой профиля зуба ВК; $r_{ц0}$ – радиус цевки ЗЭ, отложенный из центра условного шарнира до поверхности цевки ЗЭ, соприкасающейся с окружностью впадин ВК

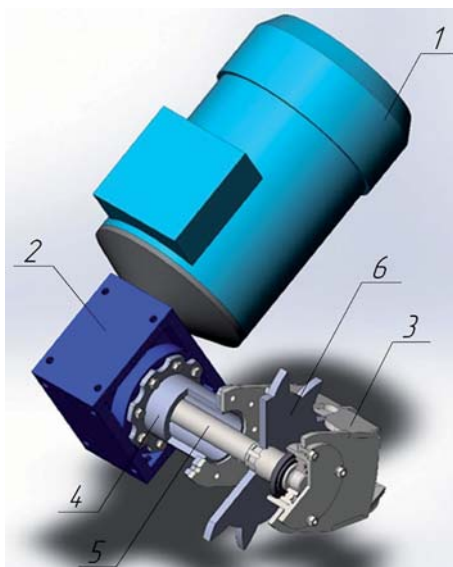


Рис. 3. Узел привода СГО:

- 1 – электродвигатель; 2 – червячный редуктор;
3 – подрамник; 4 – переходная ступица;
5 – вал привода; 6 – ВК

том числе вокруг центра масс, разгон и торможение) и загрузки СГО (с тяговой нагрузкой от 0 до 3 кН) установлено, что зацепление работает надежно. Явных отказов при работе зацепления не выявлено.

Однако следует отметить характерный металлический стук при работе зацепления и относительную вибрацию на малых скоростях. Это объясняется отсутствием приработки зацепления ВК и вновь изготовленной РАГ. Цевки ЗЭ вновь изготовленных РАГ имеют разные значения толщины слоя резинового обля на поверхностях, контактирующих с профильными поверхностями зубьев ВК.

Дополнительно было проведено исследование работы зацепления ВК с РАГ в динамике при вывешенном борте СГО (рис. 4).

При этом отмечено, что уровень вибрации и шума (от металлического стука) существенно ниже, чем в процессе движения СГО по неровностям пути.

С целью более полной оценки достоверности и обоснованности разработанной методики проектирования ВК в дальнейшем необходимо провести расширенные испытания СГО в реальных условиях эксплуатации.

На данном этапе уже можно сказать о необходимости уточнения определения величины угла контакта ϕ (угла между касательной к профильной кривой зуба и прямой, соеди-



Рис. 4. Работа вывешенного борта ходовой системы СГО

няющей центры элемента зацепления РАГ с осью вращения ВК) для звездочек с различным числом зубьев. Для этого целесообразно создать стендовое оборудование, на котором зацепление ВК с РАГ можно исследоваться в вывешенном состоянии с целью исключения влияния составляющих вибрации при движении СГО по неровностям опорной поверхности с замером и дальнейшим анализом основных показателей вибрации.

Более того, данное стендовое оборудование позволит проводить испытания перспективных конструкций гребневого, зубового и комбинированного зацепления ВК с РАГ.

Выводы

1. Проведена разработка и изготовление натурных образцов ВК цевочного зацепления с РАГ по ранее созданной методике.

2. Проведены экспериментальные исследования в виде заводских статических и динамических испытаний гусеничного зацепления СГО, подтверждающие надежность работы натурных образцов ВК и, следовательно, достоверность и обоснованность разработанной методики проектирования ВК цевочного зацепления с РАГ.

3. Даны рекомендации для дальнейшего исследования цевочного зацепления ВК с РАГ, а также для доработки методики их проектирования.

4. Обоснована необходимость создания специализированного стендового оборудования для исследования параметров гусеничного зацепления различных типов.

Литература

1. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение, 2009. 752 с.
2. Шарипов В.М., Апельинский Д.В., Арустамов Л.Х. и др. Тракторы. Конструкция / Под общ. ред. В.М. Шарипова. М.: Машиностроение, 2012. 790 с.
3. Шарипов В.М., Дмитриева Л.А., Сергеев А.И., Шевелев А.С., Щетинин Ю.С. Проектирование ходовых систем тракторов. М.: МГТУ «МАМИ», 2006. 82 с.
4. Федоткин Р.С. Расчетно-экспериментальные методы оценки нагруженности и долговечности резиноармированных гусениц сельскохозяйственных тракторов: дис. ... канд. тех. наук. М., 2015. 204 с.
5. Купрюнин Д.Г., Щельцын Н.А., Бейнenson В.Д., Федоткин Р.С., Белый И.Ф., Ревенко В.Ю. Экспериментальное исследование сравнительных показателей гусеничных движителей сельскохозяйственных тракторов // Известия МГТУ «МАМИ». 2016. № 3(29). С. 16–24.
6. Федоткин Р.С., Бейнenson В.Д., Крючков В.А., Шарипов В.М., Щетинин Ю.С. Резиноармированные гусеницы сельскохозяйственных тракторов. Жесткость при растяжении и изгибе // Известия МГТУ «МАМИ». 2016, № 2(28). С. 32–38.
7. Бейнenson В.Д., Федоткин Р.С., Крючков В.А., Алendeев Е.М., Купрюнин Д.Г. Пути повышения срока службы резиноармированных гусениц // Каучук и резина. 2015. № 6. С. 28–31.
8. 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. P. 28–31.
9. Федоткин Р.С., Крючков В.А., Бейнenson В.Д., Парфенов В.Л. Методика проектирования ведущих колес цепочного зацепления с резиноармированными гусеницами тяговых и транспортных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 3. С. 24–32.
10. Годжаев З.А., Федоткин Р.С., Крючков В.А., Русанов А.В., Кузьмин В.А., Ерилина Е.В. Разработать конструкторскую документацию и макетный образец ходовой системы роботизированного самоходного шасси мощностью до 10 кВт: отчет о НИР. ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. М., 2016. 96 с.
11. Измайлов А.Ю., Годжаев З.А., Афанасьев Р.А. Перспективы роботизации агрохимических работ // Плодородие. 2016. № 5. С. 9–13.
12. Измайлов А.Ю., Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Филиппов Р.А. Робототехнические средства для современного садоводства // Вестник мичуринского государственного аграрного университета. 2016. № 2. С. 131–138.
13. Лобачевский Я.П., Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Кутырев А.И. Инновационная техника для машинных технологий в садоводстве // ИНФОРМАГРО-2016. Сборник докладов VIII Международной научно-практической конференции. М., 2016. С. 199–203.
14. Филиппов Р.А., Хорт Д.О., Кутырев А.И. Робот-опрыскиватель для обработки растений земляники садовой // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2017. № 1. С. 278–284.

References

1. Sharipov V.M. *Konstruirovaniye i raschet traktorov* [Design and calculation of tractors]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2009. 752 p.
2. Sharipov V.M., Apelinskiy D.V., Arustamov L.Kh. i dr. *Traktory. Konstruktsiya* [Tractors. Design]. Pod obshch. red. V.M. Sharipova. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2012. 790 p.
3. Sharipov V.M., Dmitrieva L.A., Sergeev A.I., Shevelev A.S., Shchetinin Yu.S. *Proektirovaniye khodovykh sistem traktorov* [Design of tractor chassis]. Moscow: MGTU «MAAMI» Publ., 2006. 82 p.
4. Fedotkin R.S. *Raschetno-eksperimental'nyye metody otsenki nagruzhennosti i dolgovechnosti rezinoarmirovannykh gusenits sel'skokhozyaystvennykh traktorov*: dis. ... kand. tekhn. nauk [Calculation-experimental methods for estimating the loading and longevity of rubber-reinforced caterpillars of agricultural tractors: dissertation for Degree of Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 2015. 204 p.
5. Kupryunin D.G., Shchel'tsyn N.A., Beynenson V.D., Fedotkin R.S., Belyy I.F., Revenko V.Yu. Experimental study of comparative indicators of crawler units of agricultural tractors. *Izvestiya MGTU «MAAMI»*. 2016. No 3(29), pp. 16–24 (in Russ.).
6. Fedotkin R.S., Beynenson V.D., Kryuchkov V.A., Sharipov V.M., Shchetinin Yu.S. Rubber reinforced caterpillars of agricultural tractors. Stiffness in tension and bending. *Izvestiya MGTU «MAAMI»*. 2016, No 2(28), pp. 32–38 (in Russ.).
7. Beynenson V.D., Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A., Alendeev E.M., Kupryunin D.G. Ways to increase the life of rubber-reinforced caterpillars. *Kauchuk i rezina*. 2015. No 6, pp. 28–31 (in Russ.).
8. 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. No 5. P. 28–31.

9. Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A., Beynenson V.D., Parfenov V.L. Technique of designing driving wheels for pin gearing with rubber-reinforced caterpillars of traction and transport vehicles. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2017. No 3, pp. 24–32 (in Russ.).
10. Godzhaev Z.A., Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A., Rusanov A.V., Kuz'min V.A., Erilina E.V. *Razrabotat' konstruktorskuyu dokumentatsiyu i maketnyy obrazets khodovoy sistemy robotizirovannogo samokhodnogo shassi moshchnost'yu do 10 kVt: otchet o NIR* [To develop the design documentation and the model of the chassis of a robotized self-propelled chassis with a power of up to 10 kW: report on R & D]. FGBNU FNATs VIM Publ.. Moscow, 2016. 96 p.
11. Izmaylov A.Yu., Godzhaev Z.A., Afanas'ev R.A. Prospects for the robotization of agrochemical works. *Plodorodie*. 2016. No 5, pp. 9–13 (in Russ.).
12. Izmaylov A.Yu., Smirnov I.G., Khort D.O., Filippov R.A. Robotic means for modern gardening. *Vestnik michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. No 2, pp. 131–138 (in Russ.).
13. Lobachevskiy Ya.P., Smirnov I.G., Khort D.O., Filippov R.A., Kutyrev A.I. Innovative technology for machine technologies in horticulture. *INFORMAGRO-2016. Sbornik dokladov VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of works of VIII International scientific-practical conference]. Moscow, 2016, pp. 199–203 (in Russ.).
14. Filippov R.A., Khort D.O., Kutyrev A.I. Robot sprayer for processing strawberry garden plants. *Konstruirovaniye, ispol'zovaniye i nadezhnost' mashin sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya*. 2017. No 1, pp. 278–284 (in Russ.).

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE RELIABILITY OF THE METHOD OF DESIGNING DRIVING WHEELS OF PIN GEARING WITH RUBBER-REINFORCED CATERPILLARS

Dr.Eng. **V.M. Sharipov**¹, Ph.D. **R.S. Fedotkin**², Ph.D. **V.A. Kryuchkov**², **K.A. Bogdanov**², **P.I. Volkov**²

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,

²Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Agroengineering Center VIM", Moscow, Russia,
trak@mami.ru, mercenario101@yandex.ru

The obvious advantages of rubber-reinforced caterpillars over tracks of other types make them indispensable for traction and transport vehicles for various purposes. Among other things, such caterpillars are distinguished by the possibility of their installation on the machine in place of metal caterpillars without a significant alteration of the design of chassis. Nevertheless, together with the replacement of the metal caterpillar with rubber reinforced in practice, it is also necessary to replace the existing driving wheel with a specially designed for rubber-reinforced caterpillar. This happens due to the fundamental differences in caterpillar designs and the features of their work. Until recently, there was no unified engineering method for designing the engagement of the driving wheel with the rubber-reinforced caterpillar. In one of the previous works, the authors developed a technique that takes into account the features of rubber-reinforced caterpillars. This article describes the experimental testing of this technique on the example of a specific machine - self-propelled tracked sprayer for agricultural purposes. Designed in accordance with the developed technique, prototypes of driving wheels in the self-propelled caterpillar sprayer passed a complex of factory tests, including static and dynamic phases. At the static phase of the tests, the input and output of the teeth of the drive wheels were checked from engagement during the assembly of the drive system of the chassis. During the dynamic phase, the reliability of the engagement has been checked at various driving regimes and loads of the self-propelled caterpillar sprayer. In addition, a study was made of the engagement in dynamics with the hung side of the chassis. Experimental studies have confirmed the reliability of the driving wheel samples, the reliability and adequacy of the developed methodology. The recommendations for further investigation of the pin gearing and refinement of the design methodology are given in the paper, including the creation of specialized bench equipment.

Keywords: self-propelled caterpillar sprayer, running gear, pin gearing, driving wheel, rubber-reinforced caterpillar, design procedure, experimental studies