

РЕЗИНОАРМИРОВАННЫЕ ГУСЕНИЦЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТРАКТОРОВ. ЖЕСТКОСТЬ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И ИЗГИБЕ

К.Т.Н. Федоткин Р.С.¹, К.Т.Н. Бейненсон В.Д.¹,
К.Т.Н. Крючков В.А.¹, Д.Т.Н. Шарипов В.М.², К.Т.Н. Щетинин Ю.С.²
¹ОАО «НИИСтали», ²Университет машиностроения,
(495) 223-05-23, доб. 1111, trak@mami.ru

Приведено теоретическое и экспериментальное исследование жесткости при растяжении и изгибе резиноармированных гусениц сельскохозяйственных тракторов с разработкой расчетных схем и аналитических выражений и оценкой их достоверности. Расхождение между результатами расчетов жесткости резиноармированных гусениц по полученным аналитическим выражениям с экспериментальными данными не превышает 3%, что подтверждает возможность использования расчетных схем и аналитических выражений в практических расчетах. Экспериментально оценено влияние конструктивного исполнения силового слоя и наличия повреждений резиноармированных гусениц на показатели их жесткости при растяжении и изгибе. На основе экспериментальных исследований резиноармированных гусениц установлено, что расхождение между значениями жесткости при растяжении целых и поврежденных образцов тросовой конструкции составляет 10,44 %, а для образцов кордной конструкции – 10,78 %, что подтверждает незначительное влияние наличия повреждений в виде поперечных трещин на величину жесткости гусениц при растяжении (при условии отсутствия расслоений). Установлено незначительное влияние конструктивного исполнения силового слоя резиноармированной гусеницы на величину ее жесткости при растяжении (при условии одинаковой несущей способности рассматриваемых силовых слоев) и значительное влияние наличия повреждений в виде поперечных трещин на величину жесткости резиноармированных гусениц при изгибе. Расхождение между значениями жесткости при изгибе целых и поврежденных образцов резиноармированных гусениц составляет 41,1 % для образцов тросовой конструкции и 22,9 % для образцов кордной конструкции, что подтверждает существенное влияние повреждений в виде поперечных трещин на величину жесткости гусениц при изгибе.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, резиноармированная гусеница, статическая нагруженность, жесткость при растяжении и изгибе, теоретическое исследование, расчетная схема, аналитическое выражение, экспериментальное исследование, результаты исследования

Введение

Резиноармированные гусеницы (РАГ) в настоящее время получают все большее распространение в конструкциях современных сельскохозяйственных тракторов и автомобилей сельскохозяйственного назначения [1–3].

Главными достоинствами РАГ являются [1, 2, 4]:

- высокая долговечность (до 6000 ч), примерно в 2 раза больше по сравнению с гусеницами с открытыми металлическими шарнирами;
- возможность выполнения машиной транспортных работ на асфальтовом и бетонном покрытиях без их разрушения;
- меньшее на 25...30% уплотняющее воздействие на почву при одинаковой ширине с металлическими гусеницами;

- возможность установки РАГ на серийную машину без переделки конструкции двигателя.

Одним из основных факторов, определяющих работоспособность и надежность гусеничных обводоов, является их статическая нагруженность, характеризующаяся показателями жесткости при различных режимах нагружения, позволяющими оценить конструктивные параметры гусеницы на стадии проектирования.

В настоящее время отсутствуют какие-либо достоверные методики расчета РАГ, в том числе, и показателей их статической нагруженности [1, 2].

Существующие эмпирические методы расчета изделий-аналогов: ленточных гусениц, приводных ремней и конвейерных лент, – не-

применимы для РАГ в виду их существенных различий как по конструкции, так и по условиям нагружения.

Основными и наиболее значимыми режимами нагружения гусеничного обвода являются:

- растяжение, обусловленное действием предварительного статического натяжения, натяжения от центробежных сил, тяговых и тормозных усилий от ведущего колеса;
- изгиб, обусловленный поперечным перегибом гусеницы в угловых точках обвода и перегибом в плане – уводом опорной ветви при повороте машины от действия сил сопротивления повороту.

Цель исследования

Целью исследования является теоретическое и экспериментальное определение жесткости резиноармированных гусениц сельскохозяйственных тракторов при растяжении и изгибе.

Материалы и методы

Для исследования показателей статической нагруженности были выбраны РАГ цевочного зацепления с ведущим колесом типоразмера 470..126×61 (рис. 1) трактора Агромаш-150 ТГ [5] с металлотросовым армирующим полотном.

Для теоретического исследования жесткости при растяжении и изгибе выбран двухшаговый фрагмент РАГ, расчетная схема которого представлена на рис. 2.

Закладной элемент 1 в массиве резины (см. рис. 1) верхними поверхностями связан со слоем 2 беговой резины, нижними поверхностями – со слоем 3 протекторной резины, связанным со слоем 4 обкладочной резины тросового полотна 5.

При учете данной схемы закрепления закладного элемента, а также нерастяжимости тросового полотна по сравнению с резиной, в

РАГ можно выделить три несущих слоя: беговой резины – внецентренное растяжение; протекторной резины – сдвиг относительно слоя обкладочной резины; обкладочной резины – сдвиг относительно тросового полотна.

Условное обозначение несущих слоев РАГ в виде отдельных вязкоупругих элементов позволяет получить реальную (рис. 2а) и эквивалентную (рис. 2б) расчетные схемы растяжения.

Жесткость РАГ при растяжении (продольная) исходя из правила сложения деформаций при различных соединениях упругих элементов определяется по выражению:

$$C_l = C_{l_{бр}} + \frac{C_{l_{пр}} C_{l_{ор}}}{C_{l_{пр}} + C_{l_{ор}}}. \quad (1)$$

Здесь $C_{l_{бр}} = A_{бр} E_{бр} / l_0$;
 $C_{l_{пр}} = A_{пр} E_{пр} / (3b_{пр})$; $C_{l_{ор}} = A_{ор} E_{ор} / (3b_{ор})$.

Расчетная схема изгиба фрагмента РАГ представлена на рис. 3.

Если учесть, что фрагмент РАГ – балка с многокомпонентным и многослойным поперечным сечением в зоне изгиба между закладными элементами (см. рис. 1 и рис. 3а), а тросовое полотно представляет собой гибкую систему, что влияет на приведенную жесткость сечения в целом, то получим реальную (рис. 3б) и эквивалентную (рис. 3в) расчетные схемы изгиба РАГ.

Жесткость РАГ при изгибе исходя из дифференциального уравнения изогнутой оси балки с учетом приведенной жесткости многокомпонентного и многослойного сечения и параметров кривизны определяется по выражению [6]:

$$C_\varphi = \frac{\sin \varphi}{l_0 \varphi} \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ E_n \left[J_{x_n} + A_n (y_0 - y_{c_n})^2 \right] \right\}, \quad (2)$$

где φ – угол поворота сечения оси балки;
 E_n – модуль упругости материала n -го слоя;
 J_{x_n} – момент инерции сечения n -го слоя

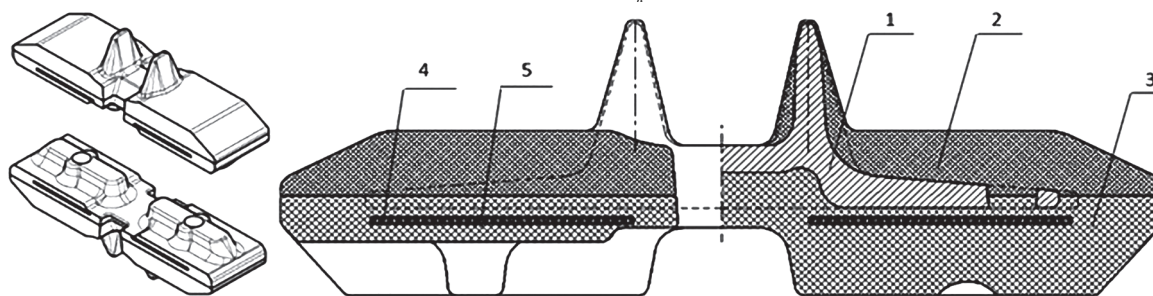


Рис. 1. Фрагмент РАГ 470×126×61:

1 – стальной закладной элемент; 2 – слой беговой резины; 3 – слой протекторной резины;
4 – слой обкладочной резины; 5 – продольно уложенные стальные тросы ш 3,2 мм

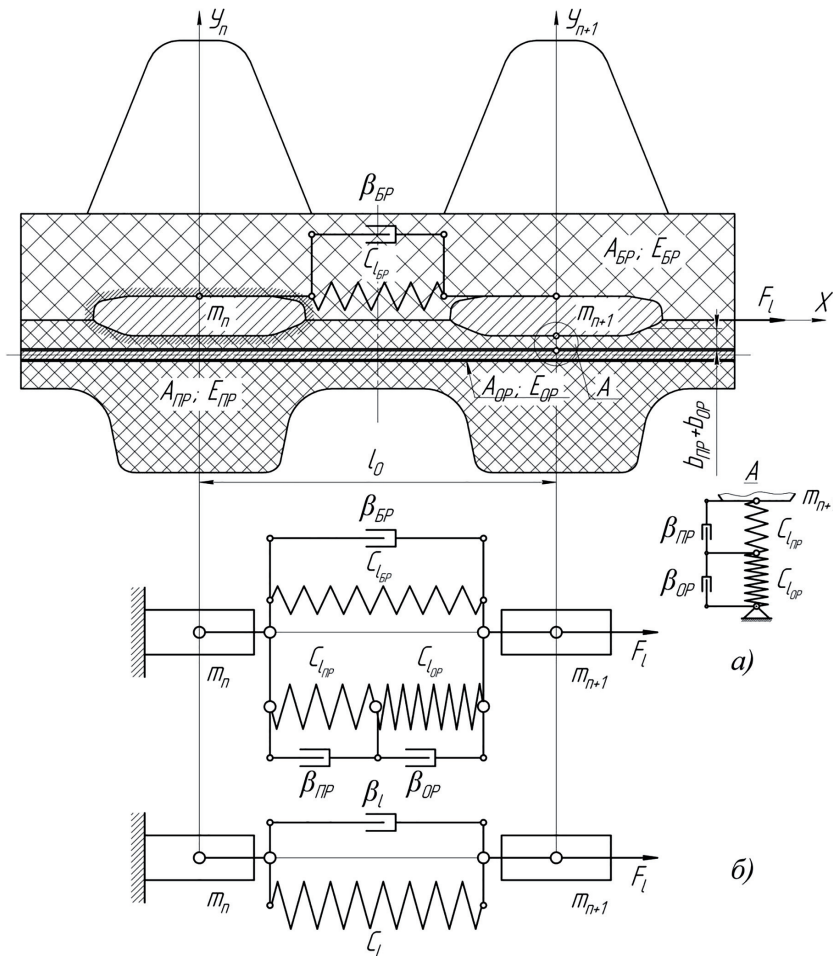


Рис. 2. Расчетная схема растяжения фрагмента РАГ:

a – реальная (продольное сечение); *б* – эквивалентная;

m_n, m_{n+1} – масса, соответственно, закрепленного и несущего закладного элемента; F_l – растягивающее усилие; $C_l, C_{br}, C_{pr}, C_{op}$ – продольная жесткость, соответственно, общая, беговой, протекторной и обкладочной резины; $\beta_l, \beta_{br}, \beta_{pr}, \beta_{op}$ – коэффициенты гистерезисных потерь соответственно общий, в беговой, протекторной и обкладочной резине; E_{br}, E_{pr}, E_{op} – модули упругости, соответственно, материала беговой, протекторной и обкладочной резины; A_{br} – площадь поперечного сечения слоя беговой резины на участке между закладными элементами; A_{pr}, A_{op} – площадь участка сдвига слоев, соответственно, протекторной и обкладочной резины; b_{pr}, b_{op} – толщина сдвигового слоя, соответственно, протекторной и обкладочной резины; l_0 – шаг РАГ

относительно заданной нейтральной линии; A_n – площадь поперечного сечения n -го слоя; $y_0 = \sum_{i=1}^n E_n A_n y_{c_n} / \sum_{i=1}^n E_n A_n$ – координата смещенной нейтральной линии; y_{c_n} – координата центра масс n -го слоя.

В выражении (2) значение кривизны уточнено и определяется из выражения:

$$1/\rho = \tan \varphi / l_0 \cdot [1 + \tan^2 \varphi]^{0.5} = \sin \varphi / l_0,$$

где $\varphi \in [-\pi/2; +\pi/2]$.

Ранее принятое в работе [6] допущение по расчету кривизны вносило дополнительную погрешность около 4 % при определении изгибной жесткости РАГ.

Для возможности применения разработанных расчетных схем и аналитических выражений необходимо соблюдение условий прочности и жесткости закладных элементов и тросового полотна, адгезионной прочности между всеми слоями РАГ. В исследуемой конструкции РАГ данные условия обеспечены.

Для экспериментального исследования жесткости РАГ при растяжении и изгибе в качестве опытных образцов были выбраны четырехшаговые фрагменты РАГ с металло-тросовым и металлокордным армирующим полотном (по четыре образца).

Жесткость при растяжении и изгибе оценивалась для указанных образцов РАГ до и после

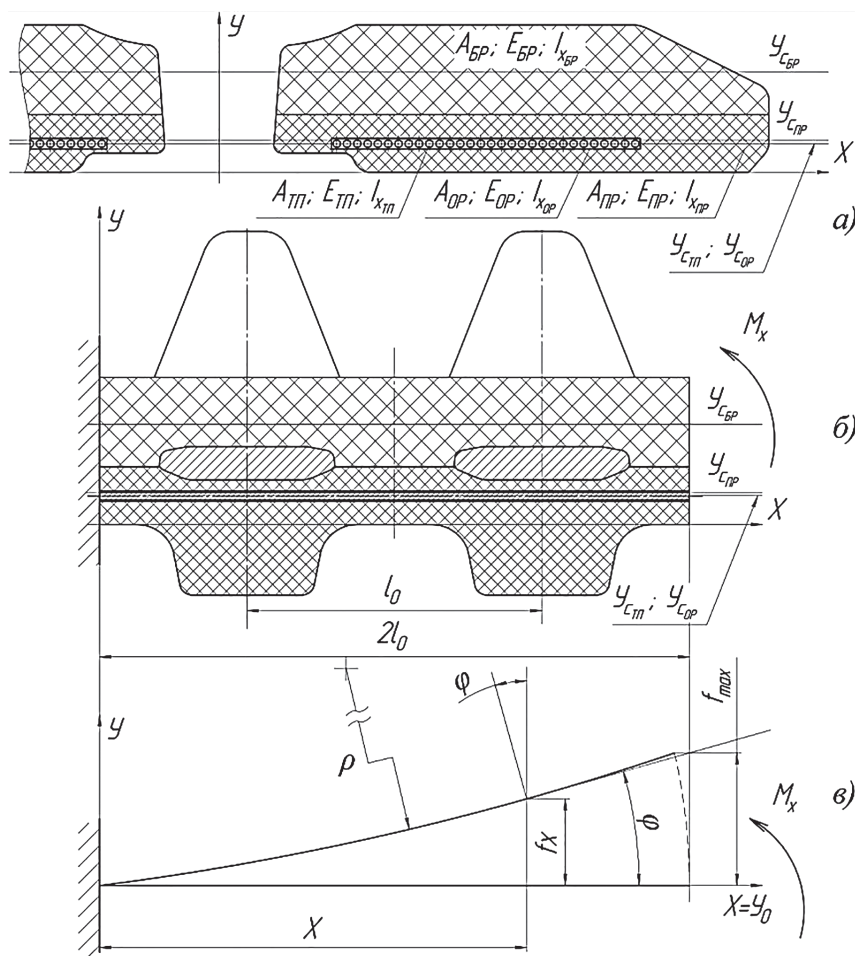


Рис. 3. Расчетная схема изгиба фрагмента РАГ:

a – реальная (поперечное сечение РАГ); *б* – реальная (продольное сечение РАГ); *в* – эквивалентная;
 M_x – изгибающий момент; $A_{БР}$, $A_{БР}$, $A_{ТР}$, $A_{ОП}$ – площади поперечных сечений слоев, соответственно, тросового полотна, беговой, протекторной и обкладочной резины на участке между закладными элементами; $E_{БР}$, $E_{БР}$, $E_{ТР}$, $E_{ОП}$ – модули упругости слоев, соответственно, тросового полотна, беговой, протекторной и обкладочной резины; $J_{БР}$, $J_{БР}$, $J_{ТР}$, $J_{ОП}$ – моменты инерции сечений слоев, соответственно, тросового полотна, беговой, протекторной и обкладочной резины относительно заданной нейтральной линии; $y_{БР}$, $y_{БР}$, $y_{ТР}$, $y_{ОП}$ – координаты центра масс слоев, соответственно, тросового полотна, беговой, протекторной и обкладочной резины; l_0 – шаг гусеницы; ρ – радиус кривизны оси; φ – угол поворота сечения оси (угол изгиба); y_0 – координата смещенной нейтральной линии; f_x , f_{max} – прогиб оси, соответственно, в сечениях на расстоянии X и $2l_0$

повреждений (поперечная трещина на беговой дорожке РАГ между средними закладными элементами на глубину до тросового полотна).

Нагружение образцов РАГ растягивающей и изгибающей нагрузками осуществлялось на испытательном стенде ИГ-11М в лаборатории отдела ходовых и несущих систем ОАО «НИИ стали». Основные технические характеристики стенда ИГ-11М: частота приложения изгибающей нагрузки $f = 4$ Гц, пределы измерения угла изгиба образца гусеницы $\varphi = 0...50^\circ$, пределы измерения растягивающего усилия образца гусеницы $F = 0...50$ кН.

Стенд ИГ-11М позволяет оценивать жесткость фрагментов РАГ и гусениц с резиноме-

таллическими шарнирами при продольном растяжении и поперечном изгибе (при совместном или раздельном действии нагрузок), а также их циклическую долговечность при совместном действии этих нагрузок в динамике.

Жесткость образца РАГ при растяжении определялась по выражению:

$$C_i = \sum_{i=1}^n C_{l_i} / n,$$

где $C_{l_i} = F_i / \Delta l_i$ – значение жесткости при растяжении для i -го измерения, n – число измерений, $F_i = 0...30$ кН – диапазон растягивающих усилий, Δl_i – линейная деформация образца РАГ для i -го измерения.

Перед снятием характеристики жесткости образца при растяжении производилось трехкратное нагружение образца усилием 0...30 кН. Снятие характеристики производилось при трехкратном повторении опыта и постоянной температуре в помещении (время нагружения образца в пределах ступени составляло 20 с, а интервал изменения нагрузки – 5 кН).

Перед снятием характеристики жесткости образца при изгибе производился его трехкратный изгиб с угловой деформацией 28...30° и растягивающим усилием 10...40 кН. Снятие характеристики осуществлялось при изменении угла изгиба φ от 0 до 30° и растягивающего усилия F от 0 до 30 кН. При этом выполнялось трехкратное повторение опытов и постоянство временной выдержки (10 мин) между ними при постоянной температуре в помещении.

Время нагружения до максимального угла изгиба при постоянной растягивающей нагрузке составляло 1 мин. Ступени нагружения об-

разца резиноармированной гусеницы при испытаниях по углу изгиба составляли $\Delta\varphi = 10^\circ$, а по растягивающему усилию – $\Delta F = 5$ кН.

Величина изгибающего момента при постоянной заданной величине растягивающего усилия F определялась по выражению:

$$M_x = \sum M - \sum M_c / n,$$

где M_x – изгибающий момент образца РАГ, M – суммарный замеряемый момент на стенде, M_c – момент сопротивления качающегося узла стенда, n – количество опытов.

Жесткость образца РАГ при изгибе определялась по выражению:

$$C_\varphi = M_x / \varphi.$$

Средняя квадратическая погрешность измерений по растяжению составила 0,35 %, а по изгибу – 2,83 %.

Таблица 1

Результаты экспериментального исследования жесткости РАГ при растяжении

Образец РАГ тросовый	$\tilde{N}_l$, кН/м		Образец РАГ кордный	C_l , кН/м	
	целый	поврежденный		целый	поврежденный
1Т	4009,66	3325,69	1К	1085,18	
2Т	3534,33	4756,91	2К	4177,46	4865,28
3Т	4242,69	5077,79	3К	3919,38	5297,81
4Т	1949,88		4К	3536,46	2875,37
C_{tp} , кН/м	3928,89	4386,80	C_{tp} , кН/м	3877,77	4346,15
Расхождение (по повреждениям), %	10,44		Расхождение (по повреждениям), %	10,78	
Расхождение (по силовому слою), %	1,11				

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования жесткости РАГ при изгибе

Образец РАГ тросовый	C _φ , кН·м/рад		Образец РАГ кордный	C _φ , кН·м/рад	
	целый	поврежденный		целый	поврежденный
1Т	1,90	0,85	1К	0,17	
2Т	1,35	1,29	2К	1,30	0,95
3Т	1,56	0,69	3К	1,40	1,23
4Т	0,79		4К	1,16	0,79
C _{φ ср} , кН·м/рад	1,60	0,95	C _{φ ср} , кН·м/рад	1,29	0,99
Расхождение (по повреждениям), %	41,08		Расхождение (по повреждениям), %	22,88	
Расхождение (по силовому слою). %	12,26				

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментального исследования жесткости образцов РАГ при растяжении и изгибе до и после повреждения представлены в табл. 1 и табл. 2, а сопоставление результатов теоретического и экспериментального исследований жесткости образцов РАГ при растяжении и изгибе с металлотросовым армирующим полотном представлены в табл. 3 и табл. 4.

Для расчета жесткости РАГ при растяжении и изгибе исходные значения геометрических величин были получены по 3D-модели РАГ, а физико-механических свойств – по соответствующим таблицам свойств материалов.

С помощью выражения 2 можно также определить жесткость C_{γ} РАГ при изгибе в плане, возникающем при уводе опорной ветви гусеницы при повороте машины. При этом сохраняются принятые допущения и условия, а различие будет заключаться в геометрических характеристиках сечения в виду изменения плоскости действия изгибающего момента.

Выводы

Разработаны расчетные схемы и аналитические выражения для расчета жесткости РАГ при растяжении и изгибе с учетом многокомпонентности и многослойности конструкции. Расхождение между результатами расчетов по полученным аналитическим выражениям и экспериментальными данными не превышает 3 % в обоих случаях, что подтверждает возможность использования расчетных схем и аналитических выражений в практических расчетах.

В результате экспериментальных исследований РАГ установлено:

- расхождение между значениями жесткости при растяжении целых и поврежденных образцов РАГ составляет 10,44 % для образцов тросовой конструкции и 10,78 % для образцов кордной конструкции, что говорит о незначительном влиянии наличия повреждений в виде поперечных трещин на величину жесткости РАГ при растяжении (при условии отсутствия расслоений);
- расхождение между значениями жесткости при растяжении образцов РАГ тросовой и кордной конструкции составляет около 1 %, что говорит о незначительном влиянии конструктивного исполнения силового слоя на величину жесткости РАГ при растяжении (при условии одинаковой несущей способности рассматриваемых силовых слоев);
- расхождение между значениями жесткости при изгибе целых и поврежденных образцов РАГ составляет 41,1 % для образцов тросовой конструкции и 22,9 % для образцов кордной конструкции, что говорит об ощутимом влиянии наличия повреждений в виде поперечных трещин на величину жесткости РАГ при изгибе;
- расхождение между значениями жесткости при изгибе образцов РАГ тросовой и кордной конструкции составляет около 12 %, что объясняется влиянием конструктивного исполнения силового слоя на величину жесткости РАГ при изгибе.

Таблица 3

Сопоставление результатов исследования жесткости РАГ при растяжении

Математическое ожидание $\tilde{m}$	Несмещенная оценка дисперсии $\tilde{D}$	Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\tilde{m}}$	Доверительная вероятность β	Коэффициент Стьюдента t_{β}
3928,751	935033,718	258,434	0,999	3,290
Доверительный интервал I_{β}	Экспериментальные значения, входящие в I_{β}	Интервал расчетных значений	Расхождение, %	
3078,50...4779,0 кН/м	3142,34...4706,64 кН/м	2815,44...4822,65 кН/м	2,69	

Таблица 4

Сопоставление результатов исследования жесткости РАГ при изгибе

Математическое ожидание $\tilde{m}$	Несмещенная оценка дисперсии $\tilde{D}$	Среднее квадратическое отклонение $\sigma_{\tilde{m}}$	Доверительная вероятность β	Коэффициент Стьюдента t_{β}
1,682	0,071	0,119	0,999	3,290
Доверительный интервал I_{β}	Экспериментальные значения, входящие в I_{β}	Интервал расчетных значений	Расхождение, %	
1,29...2,08 кН·м/рад	1,35...2,00 кН·м/рад	1,19...2,01 кН·м/рад	2,34	

Литература

1. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение, 2009. 752 с.
2. 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.
3. Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Евтюшенков Н.Е., Крюков М.Л. К вопросу создания экологически безопасных всесезонных автомобилей сельскохозяйственного назначения // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 3. С. 48–52.
4. Ревенко В.Ю., Купрюнин Д.Г., Бейненсон В.Д., Федоткин Р.С., Белый И.Ф., Веселов Н.Б., Зверев Н.В. Оценка воздействий на почву трактора ВТ-150 с различными типами гусеничных движителей // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 9. С. 30–33.
5. Купрюнин Д.Г., Щельцын Н.А., Бейненсон В.Д., Федоткин Р.С., Белый И.Ф., Ревенко В.Ю. Сравнение основных показателей гусеничных движителей сельскохозяйственных тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 9. С. 16–20.
6. Федоткин Р.С., Бейненсон В.Д., Перельцвайг И.М. Оценка изгибной жесткости резиноармированной гусеницы // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. М.: ФГУП НТЦ «Информ-техника». 2012. Вып. 4 (167). С. 32–36.

References

1. Sharipov V.M. *Konstruirovaniye i raschet traktorov* [Design and calculation of tractors]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009, 752 p.
2. Sharipov V.M., Dmitrieva L.A., Sergeev A.I., Shevelev A.S., Shchetinin Yu.S. *Proektirovaniye khodovykh sistem traktorov* [Design of chassis of tractors]. Moscow, MGТУ «MAMI» Publ., 2006, 82 p.
3. Godzhaev Z.A., Izmaylov A.Yu., Evtushenkov N.E., Kryukov M.L. Development of environmentally friendly all season vehicles for agricultural purposes. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016, No 3, pp. 48–52 (in Russ.).
4. Revenko V.Yu., Kupryunin D.G., Beynenson V.D., Fedotkin R.S., Belyy I.F., Veselov N.B., Zverev N.V. Influence assessment of tractor BT-150 with various types of caterpillar tracks on soil. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2014, No 9, pp. 30–33 (in Russ.).
5. Kupryunin D.G., Shchel'tsyn N.A., Beynenson V.D., Fedotkin R.S., Belyy I.F., Revenko V.Yu. Comparison of main indicators of caterpillars of agricultural tractors. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2013, No 9, pp. 16–20 (in Russ.).
6. Fedotkin R.S., Beynenson V.D., Perel'tsvayg I.M. Evaluation of flexural rigidity of rubber-reinforced caterpillar tracks. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 15. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroyeni* [...]. Moscow, FGUP NTTs «Inform-tekhnika» Publ. 2012, Vyp. 4 (167), pp. 32–36 (in Russ.).

RUBBER-REINFORCED CATERPILLAR TRACKS OF AGRICULTURAL TRACTORS. STIFFNESS AT TENSION AND BENDING

Ph.D. R. S. Fedotkin¹, Ph.D. V.D. Beynenson¹, Ph.D. V.A. Kryuchkov¹, Dr.Eng. V.M. Sharipov², Ph.D. Y.S. Shchetinin²

¹NII STALI JSC, ²Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI)

+7 495 223-05-23, ext. 1111, trak@mami.ru

The theoretical and experimental study of tensile stiffness and bending strength of rubber-reinforced caterpillar tracks of agricultural tractors is provided with the development of design models and analytical expressions and the assessment of their reliability. The discrepancy between the results of calculations of rubber-reinforced caterpillar tracks rigidity obtained by analytic expressions and experimental data does not exceed 3%, which confirms the possibility of the use of design models and analytical expressions in practical calculations. The effect of design of the power layer and the presence of damage at rubber-reinforced caterpillar tracks on stiffness indicators in tension and bending was experimentally evaluated. On the basis of experimental studies of rubber-reinforced caterpillar tracks was discovered that the difference between the values of tensile stiffness of entire samples and damaged parts with cable structure is 10.44% and for cord design samples – 10.78%. This proves a minor impact of damage presence in the form of transverse cracks on caterpillar track stiffness value in tension (in the absence of bundles). The negligible effect of rubber-reinforced caterpillar tracks power layer design on the value of its tensile stiffness (when supporting capability of the considered power layers is constant) and significant influence of damage presence in the form of transverse cracks on the bending stiffness value of rubber-reinforced caterpillars were determined. Difference between the values of bending stiffness of entire samples and damaged parts of rubber-reinforced caterpillar tracks is 41,1 % for parts with cable structure and 22,9 % for cord design samples. This proves a major impact of damage presence in the form of transverse cracks on caterpillar track bending stiffness value.

Keywords: agricultural tractor, rubber-reinforced caterpillar track, static loading, tensile stiffness, bending stiffness, theoretical research, design scheme, analytical expression, experimental study, research results.