

14. Уханов, Д. А. Показатели рабочего процесса карбюраторного двигателя на типовом и экспериментальном режимах самостоятельного холостого хода / Д. А. Уханов, А. П. Уханов, М. Ф. Глебов // Нива Поволжья. – 2015. – №2 (35). – С. 99-105.

15. Уханов, А. П. Алгоритмы функционирования и конструктивные варианты исполнения системы автоматического управления подачей топливовоздушной смеси на экспериментальном режиме самостоятельного холостого хода карбюраторного двигателя / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, М. Ф. Глебов // Нива Поволжья. – 2015. – №1 (34). – С. 71-78.

16. Уханов, Д. А. Закономерности перемещения клапана системы холостого хода карбюратора при работе двигателя на экспериментальном безнагрузочном режиме / Д. А. Уханов, А. П. Уханов, А. В. Гущин // Научное обозрение. – 2016. – №23. – С. 57-61.

DOI

УДК 621.436

ВЛИЯНИЕ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВ ДЛЯ АВТОТРАКТОРНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Быченин Александр Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Тракторы и автомобили», ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: tia_sci_ssaa@mail.ru

Володько Олег Станиславович, канд. техн. наук, зав. кафедрой «Тракторы и автомобили», ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: tia_sci_ssaa@mail.ru

Ерзамаев Максим Павлович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис», ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: tia_sci_ssaa@mail.ru

Сазонов Дмитрий Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис», ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2.

E-mail: tia_sci_ssaa@mail.ru

Ключевые слова: биокomпонент, жирнокислотный, кислота, олеиновая, присадка, противоизносная.

Цель исследования – повысить противоизносные свойства дизельного топлива введением малых (до 10% по объему) доз олеиновой кислоты, применяемой в качестве противоизносной присадки. Приведены методика и результаты оценки жирнокислотного состава растительных масел, используемых в качестве компонентов смесевых топлив, которые показали, что все они содержат значительное количество ненасыщенных жирных кислот – олеиновой, линолевой и линоленовой. По результатам исследования выдвинута гипотеза о возможности использования в качестве противоизносной присадки к дизельному топливу олеиновой кислоты. Для подтверждения гипотезы были проведены поисковые исследования противоизносных свойств товарного летнего дизельного топлива с присадкой олеиновой кислоты. Исследования проводились на универсальном трибометре типа ТУ на четырехшариковом узле трения. Концентрация олеиновой кислоты в топливе менялась от 0 до 10% по объему с шагом в 2%. Нагрузка, частота вращения шпинделя и материал деталей узла трения не изменялись. Исследования показали, что, например, при концентрации олеиновой кислоты 2% по объему средний диаметр пятна износа снизился на 17,7% (с 0,508 мм при использовании дизельного топлива без добавок до 0,418 мм при добавлении 2% олеиновой кислоты). При концентрации олеиновой кислоты 4% средний диаметр пятна износа снизился на 22,9% от первоначального. При дальнейшем увеличении концентрации олеиновой кислоты (6, 8 и 10% по объему) снижение диаметра пятна износа составило соответственно 21,6, 18,9 и 13,7%, т.е. при повышении концентрации олеиновой кислоты свыше 4% противоизносные свойства дизельного топлива ухудшаются, что связано, по-видимому, с возникновением в сопряжении эффекта Ребиндера. Установлено, что для значительного повышения противоизносных свойств товарного летнего дизельного топлива достаточно ввести в его состав 2-4% олеиновой кислоты по объему. Дальнейшее увеличение концентрации противоизносной присадки приводит к снижению эффекта от ее использования.

В настоящее время основу машинно-тракторного парка в сельском хозяйстве Российской Федерации составляют мобильные энергетические средства (тракторы и автомобили), оснащенные дизельными двигателями внутреннего сгорания. Данные двигатели потребляют топливо минерального происхождения, в частности, малосернистые летние дизельные топлива, трибологические свойства которых, в частности, противоизносные, не обеспечивают длительного ресурса прецизионных пар топливной аппаратуры всех типов. Данное утверждение справедливо как для аппаратуры непосредственного действия, так и для более совершенной топливоподающей аппаратуры (ТПА) типа Common Rail или насос-форсунок с электромагнитными клапанами. Одним из способов решения данной задачи является использование смесевых минерально-растительных топлив, позволяющих повысить ресурс дизельной ТПА за счет оптимизации режима трения в прецизионных парах. Данному вопросу посвящено значительное количество научных работ. Результаты исследований [1, 5] показали, что использование рапсового масла в качестве компонента смесевого топлива (до 30% по объему) позволяет повысить ресурс прецизионных пар дизельной ТПА непосредственного действия. Противоизносные свойства растительных масел оценивались в работах [2, 3]. Вопрос использования малых (до 10% по объему) доз растительных масел в качестве противоизносных присадок затронут в работах [4, 6]. Например, в работе [4] было рассмотрено влияние рыжикового масла в количестве до 10% по объему на трибологические свойства смесевого минерально-растительного топлива, а в работе [6] – горчичного, льняного и рапсового масел. Все эти масла характеризуются наличием в их составе значительного количества ненасыщенных жирных кислот, являющихся природными поверхностно-активными веществами (ПАВ), способными образовывать на поверхностях трения демпфирующую пленку [1]. Однако вопросу использования в качестве противоизносных присадок к дизельному топливу отдельных ненасыщенных жирных кислот уделено мало внимания. Обычно оценивается действие комплекса таких веществ, как в вышеприведенных примерах. Таким образом, существует актуальная научная проблема повышения трибологических, в частности, противоизносных, свойств товарных дизельных топлив. Одним из наиболее распространенных способов ее решения является введение в состав топлива противоизносной присадки. В контексте данной работы в роли противоизносной присадки может выступать ненасыщенная жирная кислота органического происхождения, например, олеиновая.

Цель исследования – повысить противоизносные свойства товарного летнего дизельного топлива введением малых (до 10% по объему) доз ненасыщенных жирных кислот, в частности, олеиновой.

Задачи исследования – экспериментально оценить жирнокислотный состав растительных масел, применяемых в качестве биокомпонентов смесевых топлив; обосновать рациональный выбор ненасыщенной жирной кислоты для использования в качестве противоизносной присадки к дизельному топливу; экспериментально оценить влияние ненасыщенных жирных кислот, в частности, олеиновой, на диаметр пятна износа при испытаниях на универсальном трибометре типа ТУ на примере топлив с концентрацией присадки до 10% по объему.

Материалы и методы исследований. Влияние биокомпонентов на трибологические свойства смесевых топлив подтверждено экспериментально, в работах [1, 5] приведено теоретическое обоснование влияния биокомпонентов на режим трения в сопряжениях топливоподающей аппаратуры дизельных двигателей. Согласно этим источникам, на режим трения значительно влияют жирные органические кислоты, являющиеся природными поверхностно-активными веществами ввиду ярко выраженной полярности молекул и, как следствие, способности образовывать моно- и полимолекулярные демпфирующие слои на поверхностях трения. Данные слои препятствуют внедрению в материал деталей абразивных частиц, что ведет к уменьшению абразивного изнашивания ресурсопределяющих прецизионных пар топливной аппаратуры. Они же снижают усталостное воздействие от знакопеременных циклических нагрузок ввиду большой прочности на сжатие. Как показали исследования, например [6], для проявления этого эффекта достаточно относительно небольшой (до 10% по объему) концентрации биокомпонента.

Изучению элементного состава растительных масел посвящено достаточно большое количество исследований, например, жирнокислотный состав масла, полученного из рапса сорта «Галант», приведен в работе [5]. Однако в текущей работе используются масла, подвергнутые предваритель-

ной химической обработке и очистке в процессе подготовки для использования в технических целях. Процентное содержание основных компонентов в них может отличаться от состава исходных масел-сырцов, поэтому в соответствии с первой задачей в процессе эксперимента определялся жирнокислотный состав горчичного, льняного, рыжикового, соевого и рапсового масел. Исследования проводились на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором Shimadzu GS-2010 по стандартизированной методике ГОСТ 30418 «Масла растительные. Метод определения жирнокислотного состава». В качестве примера на рисунке 1 приведена характерная хроматограмма рапсового масла, в таблице 1 – результаты ее программной обработки.

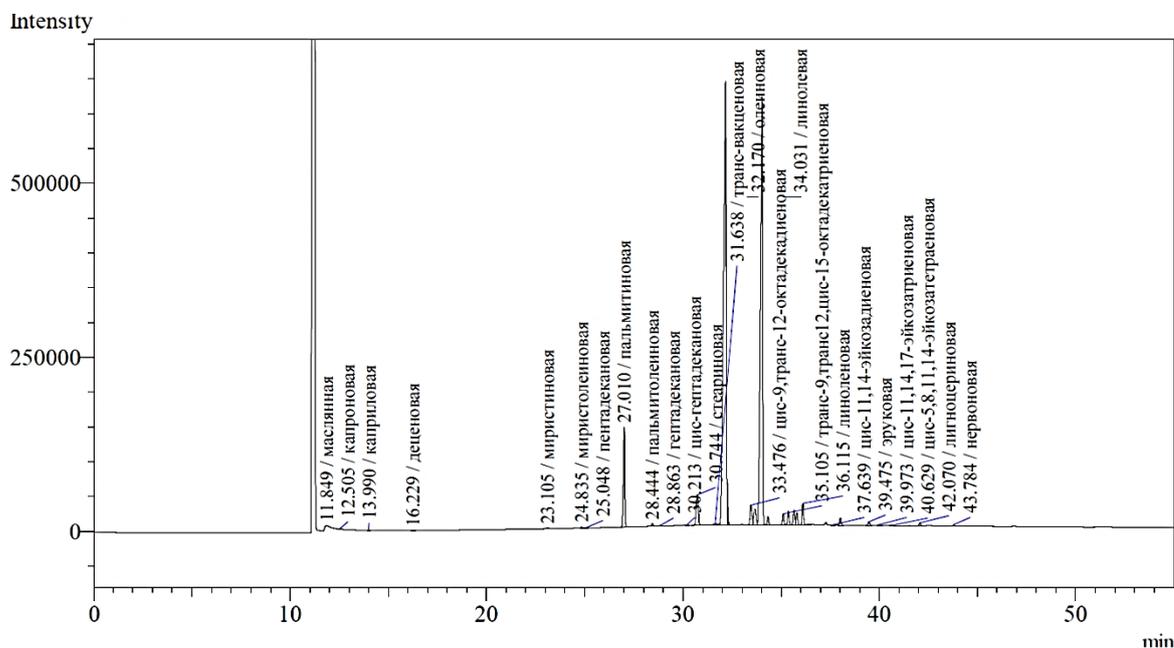


Рис. 1. Хроматограмма рапсового масла

Таблица 1

Таблица пиков – Канал 1

Пик, №	Время удерж.	Площадь	Высота	Конц.	Единицы	Имя
1	2	3	4	5	6	7
1	11,849	1647	486	0,013	%	маслянная
2	12,505	-3	-10	-0,000	%	капроновая
3	13,990	392	134	0,003	%	каприловая
4	16,229	695	175	0,005	%	деценовая
5	23,105	7680	1609	0,060	%	миристиновая
6	24,835	2518	1700	0,020	%	миристолеиновая
7	25,048	2303	476	0,018	%	пентадекановая
8	27,010	721641	143002	5,618	%	пальмитиновая
9	28,444	17890	3746	0,139	%	пальмитолеиновая
10	28,863	4825	926	0,038	%	гептадекановая
11	30,213	4502	920	0,035	%	цис-гептадекановая
12	30,744	329837	43456	2,568	%	стеариновая
13	31,638	23285	1629	0,181	%	транс-вакценовая
14	32,170	5833628	636581	45,414	%	олеиновая
15	32,257	164244	61124	1,279	%	цис-вакценовая
16	32,837	193	49	0,002	%	линозлаидиновая
17	33,476	188613	28169	1,468	%	цис-9, транс-12-окт.
18	33,675	187508	22696	1,460	%	транс-9, цис-12-окт.
19	34,031	4586256	618254	35,703	%	линолевая
20	34,337	58379	12082	0,454	%	арахиновая
21	35,105	84333	16035	0,657	%	транс-9, транс12, цис.
22	35,381	105085	20150	0,818	%	гамма-линоленовая
23	35,657	117616	21641	0,916	%	цис-11-эйкозеновая

1	2	3	4	5	6	7
24	35,806	102567	17635	0,798	%	транс-9,цис-12, цис.
25	36,115	157354	31249	1,225	%	линоленовая
26	36,455	15956	1284	0,124	%	генийкозановая
27	37,639	3928	826	0,031	%	цис-11,14-эйкозад.
28	38,025	54222	10554	0,422	%	бегеновая
29	39,475	29317	5189	0,228	%	эруковая
30	39,973	4922	921	0,038	%	цис-11,14,17-эйкоз.
31	40,629	2908	524	0,023	%	цис-5,8,11,14-эйкоз.
32	42,070	22324	3985	0,174	%	лигноцериновая
33	43,784	8844	1449	0,069	%	нервоновая
Сумма		12845409	1708646			

Анализ таблицы 1 показал, что в составе исследованного рапсового масла основными кислотами (с суммарной массовой долей более 70%) являются олеиновая (массовая доля 45,4%) и линолевая (35,7%). Остальные компоненты относятся либо к второстепенным, либо к минорным (следовым). Анализ результатов исследования жирнокислотного состава льняного, горчичного, рыжикового и соевого масел показал, что в рыжиковом масле помимо олеиновой и линолевой в число главных входит также линоленовая кислота. Обобщенный жирно-кислотный состав, учитывающий массовую долю главных кислот исследованных биокомпонентов, представлен в таблице 2.

Таблица 2

Жирно-кислотный состав биокомпонентов смесевых топлив

№ п/п	Биокомпонент	Жирная кислота	Массовая доля, %
1	Рапсовое масло	Олеиновая	45,4
		Линолевая	35,7
		Линоленовая	1,2
2	Рыжиковое масло	Олеиновая	22,5
		Линолевая	19,6
		Линоленовая	14,8
3	Горчичное масло	Олеиновая	43,5
		Линолевая	31
		Линоленовая	1,1
4	Льняное масло	Олеиновая	21,6
		Линолевая	22,7
		Линоленовая	1,8
5	Соевое масло	Олеиновая	24,4
		Линолевая	54,1
		Линоленовая	1,1

Наибольшую массовую долю в исследованных маслах имеют ненасыщенные жирные кислоты – олеиновая и линолевая, являющиеся природными поверхностно-активными веществами (табл. 2). Результат анализа данных, полученных в ходе исследования жирнокислотного состава растительных компонентов смесевых топлив, – в соответствии со второй задачей была выдвинута гипотеза, что данные ненасыщенные жирные кислоты могут использоваться в качестве самостоятельных противоизносных присадок к товарному дизельному топливу. Однако анализ коммерческих предложений на территории РФ через сеть Интернет показал, что линолевая и линоленовая кислоты в основном реализуются в качестве биологических активных добавок (БАД) и имеют высокую различную стоимость. Олеиновая же кислота, предназначенная для технических целей, производится в промышленных объемах, реализуется как оптом, так и в розницу, и оптовые цены составляют 50...60 руб. за килограмм, что сравнимо с оптовыми ценами на рапсовое и соевое нерафинированные масла (от 42 руб. за кг), дешевле горчичного (от 80 руб. за кг), рыжикового (от 100 руб. за кг) и льняного (от 100 руб. за кг) масел. Анализ оптовых цен производился по данным ресурса «Флагма – Бизнес объявления России» на 08.09.2017 года. Таким образом, рационально выбрать в качестве противоизносной присадки к товарному летнему дизельному топливу олеиновую кислоту.

Результаты исследований. В соответствии с целью исследования в процессе эксперимента выявлялось повышение противоизносных свойств дизельного топлива при использовании олеиновой кислоты в качестве противоизносной присадки. Объект исследования – процесс смазывания прецизионных пар дизельной топливной аппаратуры при применении олеиновой кислоты в качестве противоизносной присадки к дизельному топливу. Предмет исследования – взаимосвязь параметров процесса работы топливной аппаратуры при применении топлива с присадкой олеиновой кислоты, условия трения в сопряжениях прецизионных пар, изнашивание их деталей.

Суть предложенного способа повышения трибологических свойств, в частности, противоизносных, товарного дизельного топлива состоит в создании более благоприятного режима смазывания сопряжения образованием на поверхностях трения демпфирующих пленок органического ПАВ, которым является олеиновая кислота. В учебно-научно-исследовательской лаборатории «Повышение надежности и эффективности механических систем» ФГБОУ ВО Самарской ГСХА были проведены поисковые исследования товарного летнего дизельного топлива с концентрацией олеиновой кислоты до 10% по объему, которые подтвердили ранее выдвинутую гипотезу.

Исследования проводились на универсальном трибометре типа ТУ по следующей методике: время опыта 900 с; частота вращения приводного вала 580 мин⁻¹; нагрузка 450±5 Н; концентрация олеиновой кислоты от 0 до 10% с шагом 2%. Схема работы – четырехшариковый узел трения. Отличия методики испытаний от приведенной в работе [6] состояли в повышении жесткости опоры обоймы с неподвижными шариками, а также в принудительной фиксации патрона трибометра для снижения демпфирования нагрузки и колебаний в приводе подвижного шарика. В результате удельное давление в сопряжении было увеличено, что привело к увеличению диаметров пятен износа. Контролируемый параметр – средний диаметр пятна износа неподвижных шариков, мм. В каждом цикле испытаний использовались одни и те же шарики, которые выдерживались в испытуемой смазочной среде не менее одного часа. Оценивался средний диаметр пятна износа, измеренный на трех неподвижных шариках в двух взаимоперпендикулярных направлениях на каждом. Измерения проводились при помощи оптического микроскопа МБС-1. Испытаниям подвергались: дизельное летнее топливо с присадкой олеиновой кислоты (концентрация биокомпонента 2, 4, 6, 8 и 10% по объему); контрольный замер: дизельное летнее топливо.

Помимо собственно среднего диаметра пятна износа неподвижных шариков оценивался также параметр Δ , характеризующий прирост изменения диаметра пятна износа в процентах. За точку отсчета принят средний диаметр пятна износа, полученный при испытании на летнем дизельном топливе. В таблице 3 представлена обработка серии опытов с олеиновой кислотой. Графически полученные зависимости представлены на рисунке 2.

Таблица 3

Результаты исследования дизельного летнего топлива с присадкой олеиновой кислоты

№ опыта	№ шара	d, мм	d _{ср} , мм	Изменение параметра Δ , %	Концентрация присадки, %
1	1	0,51; 0,49	0,508	0	0
	2	0,49; 0,50			
	3	0,54; 0,52			
2	1	0,43; 0,41	0,418	<17,7	2
	2	0,41; 0,41			
	3	0,43; 0,42			
3	1	0,40; 0,39	0,392	<22,9	4
	2	0,37; 0,39			
	3	0,51; 0,39			
4	1	0,39; 0,40	0,398	<21,6	6
	2	0,40; 0,40			
	3	0,41; 0,39			
5	1	0,42; 0,40	0,412	<18,9	8
	2	0,40; 0,40			
	3	0,42; 0,43			
6	1	0,45; 0,44	0,438	<13,7	10
	2	0,44; 0,44			
	3	0,44; 0,42			

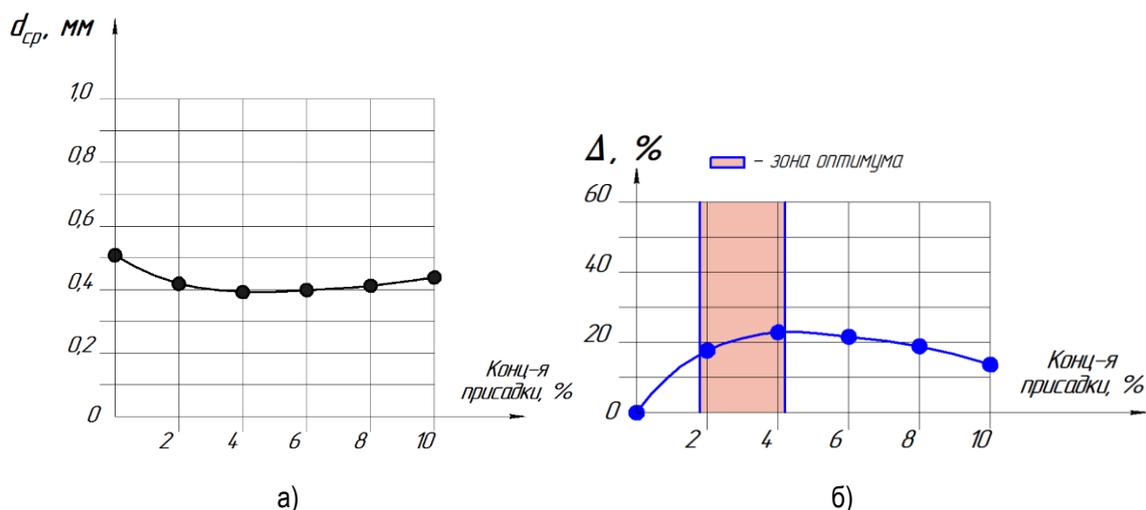


Рис. 2. Результаты испытаний дизельного летнего топлива с присадкой олеиновой кислоты на универсальном трибометре типа ТУ:

- а) зависимость среднего диаметра пятна износа от концентрации присадки;
 б) зависимость изменения параметра Δ (%) от концентрации присадки

Из анализа результатов исследований, представленных графиком зависимости среднего диаметра пятна износа от концентрации присадки (рис. 2, а), можно сделать вывод, что средний диаметр пятна износа уменьшается по сравнению с товарным летним дизельным топливом при использовании в качестве противоизносной присадки олеиновой кислоты. Однако зависимость среднего диаметра пятна износа от концентрации присадки не является обратно пропорциональной и линейной. Из графика видно, что сильнее всего (в среднем на 0,09 мм) диаметр пятна износа уменьшается уже при концентрации олеиновой кислоты 2% по объему. С дальнейшим ростом концентрации присадки уменьшение среднего диаметра пятна износа уже не так значительно – на 0,026 мм от предыдущего результата при концентрации 4% олеиновой кислоты по объему, а при еще большем увеличении концентрации присадки (6, 8 и 10%) наблюдается увеличение диаметра пятна износа. Анализ зависимости изменения параметра Δ (%) (рис. 2, б) подтверждает этот вывод: наибольший прирост изменения среднего диаметра пятна износа приходится на диапазон от 2 (изменение параметра $\Delta=17,7\%$) до 4% ($\Delta=22,9\%$) олеиновой кислоты по объему. При концентрации олеиновой кислоты 6% параметр $\Delta=21,6\%$, при концентрации 8% $\Delta=18,9\%$, а при концентрации олеиновой кислоты 10% $\Delta=13,7\%$. Данное явление может быть объяснено проявлением эффекта адсорбционного понижения прочности кристаллического твердого тела в жидкой среде, состоящей из поверхностно-активного вещества (эффект Ребиндера). Таким образом, можно предположить, что уже при концентрации олеиновой кислоты 2-4% по объему происходит образование демпфирующего слоя органических ПАВ на поверхностях трения, препятствующего их изнашиванию. Дальнейшее увеличение концентрации олеиновой кислоты с точки зрения улучшения трибологических свойств дизельного летнего топлива нерационально.

Заключение. В статье приведены результаты лабораторных исследований, подтверждающие повышение трибологических свойств, в частности, противоизносных, дизельного летнего топлива, содержащего в качестве противоизносной присадки поверхностно-активное вещество – олеиновую кислоту. Наличие олеиновой кислоты в небольших концентрациях (до 10% по объему) улучшает режим трения прецизионных пар топливоподающей аппаратуры автотракторных дизелей. Поисковые исследования на универсальном трибометре типа ТУ показали, что для увеличения противоизносных свойств дизельного летнего топлива оптимально использовать олеиновую кислоту в концентрации 2-4% по объему. Дальнейшее увеличение концентрации олеиновой кислоты снижает эффект ее применения из-за возникновения эффекта адсорбционного понижения прочности поверхностей трения.

Библиографический список

1. Быченин, А. П. Повышение ресурса плунжерных пар топливного насоса высокого давления тракторных дизелей применением смесового минерально-растительного топлива : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Быченин Александр Павлович. – Пенза, 2007. – 172 с.
2. Быченин, А. П. Влияние смесовых минерально-растительных топлив на ресурс прецизионных пар топливоподающей аппаратуры дизельных двигателей / А. П. Быченин, М. А. Быченина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2013. – №3. – С. 54-59.
3. Болдашев, Г. И. Сравнительный анализ противоизносных свойств растительных масел / Г. И. Болдашев, А. П. Быченин, М. А. Быченина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т.15, №1. – С. 197-200. – (Специальный выпуск «Актуальные проблемы трибологии»).
4. Болдашев, Г. И. Влияние рыжикового масла на противоизносные свойства смесового топлива / Г. И. Болдашев, А. П. Быченин, М. А. Быченина, М. С. Приказчиков // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – №3. – С. 92-95.
5. Уханов, Д.А. Снижение износа плунжерных пар ТНВД применением смесового рапсово-минерального топлива : монография / Д. А. Уханов, А. П. Уханов, Е. Г. Ротанов, А. С. Аверьянов. – Пенза : РИО ПГАУ, 2017. – 212 с.
6. Быченин, А. П. Влияние растительных компонентов на трибологические свойства топлив для автотракторных дизелей / А. П. Быченин, О. Н. Черников, М. С. Приказчиков // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – №3. – С. 12-15.

DOI

УДК 631.3.02

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИЙ В КРЕПЛЕНИЯХ ОПОРНОГО РЫЧАГА КОЛЕСНОГО ПРИЦЕПА

Зайцев Владимир Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: vluzai@gmail.com

Коновалов Владимир Викторович, д-р техн. наук, проф. кафедры «Технология машиностроения», ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: konovalov-penza@rambler.ru

Вольников Михаил Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» (цикл «Автоматизация и управление»), ФГБОУ ВО Пензенский ГТУ.

440039, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.

E-mail: vmi1972@yandex.ru

Петров Александр Михайлович, канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой «Сельскохозяйственные машины и механизация животноводства», ФГБОУ ВО Самарская ГСХА.

446442, Самарская область, п.г.т. Усть-Кинельский, Учебная, 2.

E-mail: Petrov_AM@ssaa.ru

Ключевые слова: реакция, рычаг, схема, нагружение, равновесия, критерии, статическое.

Цель исследований – теоретическое обоснование и пример компьютерного моделирования нагрузочных параметров для выявления опасных сечений при конструировании опорных рычагов. При конструировании новых машин или модернизации их ходовой части, а также в случае возникновения поломок элементов ходовой части возникают вопросы, связанные с конструированием и прочностными расчетами элементов ходовой части. Определенной сложностью является выявление причин поломок конструктивных элементов при наличии устройств подъема рамы с кузовом (бункером) за счет поворота опорных рычагов перемещения колес относительно рамы бункера (кузова). В статье строятся расчетные схемы статического нагружения опор колесного рычага мобильного агрегата с изменяемой высотой расположения кузова (бункера) и определяются выражения для определения реакции, которые испытывают опоры рычага при различных геометрических параметрах изделия и угла его расположения. Проведенные теоретические исследования позволили составить расчетную схему нагружения, установить аналитические зависимости внутренних силовых факторов и реакций опор, на основе которых возможно числен-