

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 62-732:662.75

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-71-76>**Очистка биотоплива с помощью высокопористого полимерного фильтра****Е.А. Улюкина¹, О.П. Андреев², С.С. Гусев³, А.А. Андреев⁴, А.В. Меликов⁵**^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ eulykina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3048-6836>² aopmsau@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0738-302X>³ gusev.s@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3619-6848>⁴ ato215@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8715-2286>⁵ melikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2790-2146>

Аннотация. Биотопливо, полученное из растительного сырья, отличается от традиционного нефтяного топлива высокой вязкостью, плотностью, гигроскопичностью и химической активностью. Техническое состояние топливной аппаратуры определяется уровнем чистоты топлива. Для очистки биотоплива от загрязнений и эмульсионной воды предложено использовать полимерные материалы с глобулярной структурой. С целью изучения их свойств проведены испытания образцов полимерных материалов, полученных сополимеризацией резорцина с формальдегидом и стирола с дивинилбензолом. Использовались стандартные методы и оборудование. Испытания на прочность и проницаемость проводились на образцах сополимеров резорцина и формальдегида с содержанием полимерообразующих компонентов 20, 30, 40% и стирола с дивинилбензолом при содержании мономера 25, 40 и 60%. В результате исследований получены показатели прочности полимерных материалов: удельная разрушающая нагрузка при растяжении для сополимеров резорцина с формальдегидом составила 19 МПа, при сжатии – 6 МПа; для сополимеров стирола с дивинилбензолом – 15,5 и 2,5 МПа соответственно. Средний диаметр пор сополимеров составил 0,1...10 мкм, большая удельная поверхность и узкий диапазон распределения пор по размерам (+/-10%) позволяют использовать их в качестве фильтрующих перегородок для различных жидкостей. При взаимодействии образцов резорцинформальдегидного полимерного материала с биодизелем – метиловым эфиром рапсового масла – в течение 14 суток не выявлено изменений в составе полимера. Спектроскопические исследования не выявили изменений и в составе биотоплива. Разработанный резорцинформальдегидный фильтроэлемент для очистки биотоплива может в течение продолжительного времени эффективно работать без замены и технического обслуживания.

Ключевые слова: очистка топлива, очистка биотоплива, биотопливо, фильтроэлемент, полимерный фильтр

Для цитирования: Улюкина Е.А., Андреев О.П., Гусев С.С., Андреев А.А., Меликов А.В. Очистка биотоплива с помощью высокопористого полимерного фильтра // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 6. С. 71-76. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-71-76>

ORIGINAL ARTICLE

Biofuel purification using a highly porous polymer filter**Е.А. Ulyukina¹, О.П. Andreev², S.S. Gusev³, А.А. Andreev⁴, А.В. Melikov⁵**^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ eulykina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3048-6836>² aopmsau@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0738-302X>³ gusev.s@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3619-6848>⁴ ato215@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8715-2286>⁵ melikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2790-2146>

Abstract. Biofuels are a renewable and environmentally friendly resource. Biofuels obtained from vegetable raw materials differ from traditional petroleum fuels in their high viscosity, density, hygroscopicity and chemical activity. The technical condition of the fuel equipment is determined by the level of fuel purity. The authors propose to use polymer materials with a globular structure to purify biofuels from contaminants and emulsion water. In order to study their properties, the authors carried out tests using standard methods and equipment of polymer samples obtained by copolymerization of resorcinol with formaldehyde and styrene with divinyl

benzene. Strength and permeability tests were carried out on samples of resorcinol and formaldehyde copolymers with 20, 30 and 40% polymer-forming components, and styrene with divinyl benzene with a monomer content of 25, 40 and 60%. The research determined the strength indicators of polymer materials: specific tensile stress for resorcinol copolymers with formaldehyde was 19 MPa, for compression – 6 MPa; for styrene copolymers with divinyl benzene, respectively, 15.5 and 2.5 MPa. The average pore diameter of the copolymers is 0.1 to 10 microns, a large specific surface area and a narrow range of pore size distribution (+/-10%) makes them good filter baffles for various liquids. During the interaction of samples of the resorcinol-formaldehyde polymer material with biodiesel – methyl ester of rapeseed oil, no changes in the polymer composition were detected for 14 days. Spectroscopic studies have not revealed any changes in the composition of biofuels. The authors have developed a resorcinol-formaldehyde filter element for biofuel purification, which can work effectively for a long time without replacement and maintenance.

Keywords: fuel purification, biofuel purification, biofuel, filter element, polymer filter

For citation: Ulyukina E.A., Andreev O.P., Gusev S.S., Andreev A.A., Melikov A.V. Biofuel purification using a highly porous polymer filter. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(6):71-76. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-71-76>

Введение

Разработка альтернативных источников энергии обусловлена ростом цен на нефтепродукты и увеличением выбросов токсичных веществ при сгорании нефтяных топлив. Из возобновляемых ресурсов перспективным является использование энергии биомассы, то есть всех видов веществ растительного и животного происхождения, продуктов их жизнедеятельности и органических отходов¹.

Производство биотоплива постоянно совершенствуется. Доля биотоплива в общемировом потреблении топлив увеличивается. На первом этапе в качестве биотоплива применялись спирты и разнообразные масла [1-3]. Использование масел в чистом виде способствовало увеличению нагарообразования на распылителях форсунок и других деталях камеры сгорания. Поэтому в дизелях предпочтительно использовать не масла, а продукты их химической переработки – метиловые и этиловые эфиры растительных масел [4-8]. Наиболее перспективным источником сырья для производства биодизеля являются водоросли. С одного акра (~ 0,4 га) земли можно получить 255 л соевого масла или 2400 л пальмового масла. С такой же площади водной поверхности можно производить до 3570 баррелей биотоплива из микроводорослей (1 баррель = 159 л) [9-11].

Биотопливо по сравнению с традиционными нефтяными топливами относится к возобновляемым ресурсам, не содержит соединений серы и образует при сгорании гораздо меньше вредных веществ, таких, как оксид углерода CO, оксиды серы, многоатомные углеводороды, оксиды

азота и др. Фракционный состав биодизеля существенно отличается от товарного дизельного топлива. При этом эфиры растительных масел весьма гигроскопичны и могут поглощать влагу из воздуха, а резинотехнические изделия и защитные покрытия из топливостойкой эмали не выдерживают контакта с эфирами [12].

Надежность работы сельскохозяйственной техники зависит от применяемых материалов, качества обработки поверхностей, допусков и посадок деталей, герметичности уплотнительных устройств [13], а также от эффективной работы дизельных двигателей, надежность и топливная экономичность которых зависят от технического состояния топливной аппаратуры, в значительной степени определяемого уровнем чистоты топлива [14]. Для очистки биотоплива следует использовать фильтрующие материалы, инертные к биотопливу, способные отделять не только твердые частицы, но и влагу. Текстурированные полимеры с пористой структурой обладают фильтрационными, абсорбционными свойствами, инертностью по отношению к различным видам топлива и способностью к регенерации [15].

Цель исследований: изучение свойств высокопористых полимерных фильтрующих материалов с глобулярной структурой, предназначенных для очистки и обезвоживания биотоплива.

Материалы и методы

Лабораторные исследования прочностных свойств фильтрующих материалов проводились путем определения предельных разрушающих нагрузок при растяжении (прочность на разрыв) и при сжатии (прочность на продавливание). Сопротивление растяжению определялось на вертикальной разрывной машине, сопротивление

¹ Сравнительный анализ технологий получения биотоплива для дизельных двигателей / А.Н. Зауля, С.А. Нагорнов, С.В. Романцова, В.Ф. Федоренко, Д.С. Буклагин, И.Г. Голубев. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2013. 96 с.

продавливанию – на механическом прессе. Исследовались проницаемость текстурных материалов и их пропускная способность, а также их взаимодействие с биотопливом – метиловым эфиром рапсового масла.

Испытания на прочность и проницаемость проводились на образцах сополимеров резорцина и формальдегида с содержанием полимерообразующих компонентов 20, 30, 40% и стирола с дивинилбензолом при содержании мономеров 25, 40 и 60%.

Микроскопические исследования проводились на микроскопе ADF I350.

Технология изготовления высокопористых полимерных материалов с глобулярной структурой отработана и достаточно проста. Рассмотрим ее на примере резорцинформальдегидного фильтра. Этот материал изготавливают поликонденсацией мономеров в кислой среде при pH от 0,1 до 4. Сначала готовят водные растворы резорцина и формальдегида с концентрацией мономеров 30...60% от общего объема. Растворы мономеров смешивают, добавляют катализатор (соляную кислоту), выдерживают

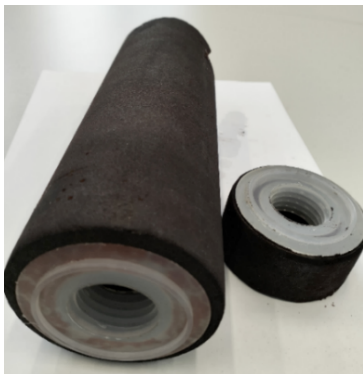
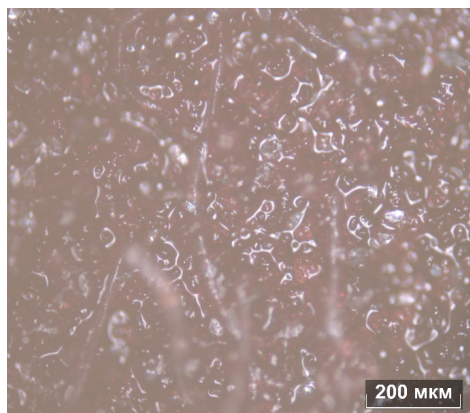
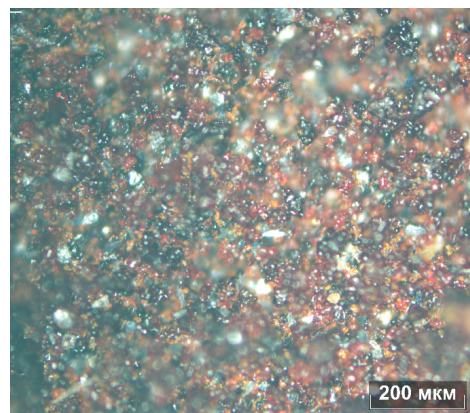


Рис. 1. Фильтроэлемент резорцинформальдегидный

Fig. 1. Resorcinol-formaldehyde filter element



а



б

Рис. 2. Микроснимок среза резорцинового фильтра после фильтрации топлива (а) и после сушки в течение 16 ч при температуре 60°C (б) (100-кратное увеличение)

Fig. 2. Micrography of the resorcinol filter (100x magnification):

a – after filtering the fuel; b – after drying for 16 hours at a temperature of 60°C

при комнатной температуре и разливают по формам, затем осуществляют отверждение в полимеризационной камере при температуре 80...85 °С.

Общий вид резорцинформальдегидного фильтра с подготовленным образцом для микроскопии представлен на рисунке 1.

Результаты и их обсуждение

Абсолютная тонкость фильтрования для всех исследованных образцов полимерных фильтрационных материалов составляет 10 мкм, а полнота очистки биотоплива – 92...95%.

На микроснимке среза фильтра после фильтрации, выполненного с помощью микроскопа ADF I350, хорошо видны следы топлива, которое осталось в порах фильтра (рис. 2а). На снимке среза фильтра после сушки можно рассмотреть структуру полимерных микроглобул, образующих регулярную пространственную структуру (рис. 2б).

Микроскопическими исследованиями определены размеры пор, средний диаметр которых составил 0,1...10 мкм. Большая удельная поверхность, узкий диапазон распределения пор по размерам (+/- 10%) придают этим материалам хорошие механические и эксплуатационные свойства, что позволяет использовать их в качестве фильтрующих перегородок для различных жидкостей.

Текстурные полимеры в виде жестких образцов толщиной 5 мм подвергались испытаниям на разрыв и сжатие. Результаты исследований прочности полимерных материалов представлены в таблице.

У всех образцов полимеров полученные прочностные характеристики соответствуют требованиям, предъявляемым к фильтрующим материалам для очистки топлива. Однако наилучшие показатели прочности наблюдались у образца сополимера

резорцина с формальдегидом, и именно этот материал был выбран для изготовления фильтроэлемента для очистки биотоплива.

Результаты испытаний на прочность и проницаемость образцов высокопористых полимерных материалов с различным содержанием полимерообразующих компонентов представлены на рисунках 3, 4.

Экспериментальные данные показали, что прочность на сжатие текстурных полимерных материалов с пористой структурой увеличивается с повышением концентрации полимерообразующих компонентов (рис. 3), но при этом уменьшается проницаемость материала, что связано с уменьшением пористости образцов (рис. 4).

Таблица

Показатели прочности полимерных материалов

Table

Strength values of polymeric materials

Удельная разрушающая нагрузка, МПа <i>Specific breaking load, MPa</i>	Образцы полимеров / <i>Polymer samples</i>	
	резорцин с формальдегидом <i>resorcinol with formaldehyde</i>	стирол с дивинилбензолом <i>styrene with divinylbenzene</i>
При растяжении / <i>In tension</i>	19	15,5
При сжатии / <i>In compression</i>	6	2,5

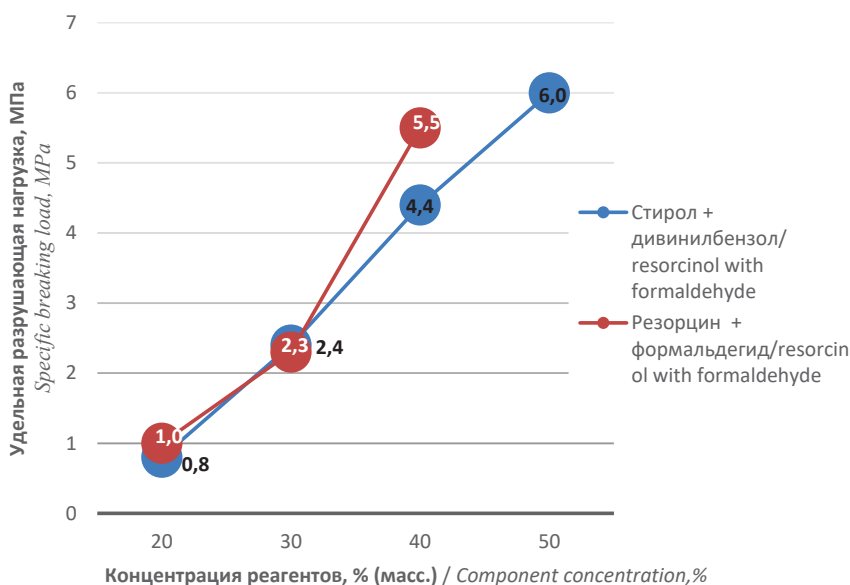


Рис. 3. Зависимость удельной разрушающей нагрузки от концентрации полимерообразующих компонентов

Fig. 3. Relationship between the specific load and the concentration of polymer-forming components

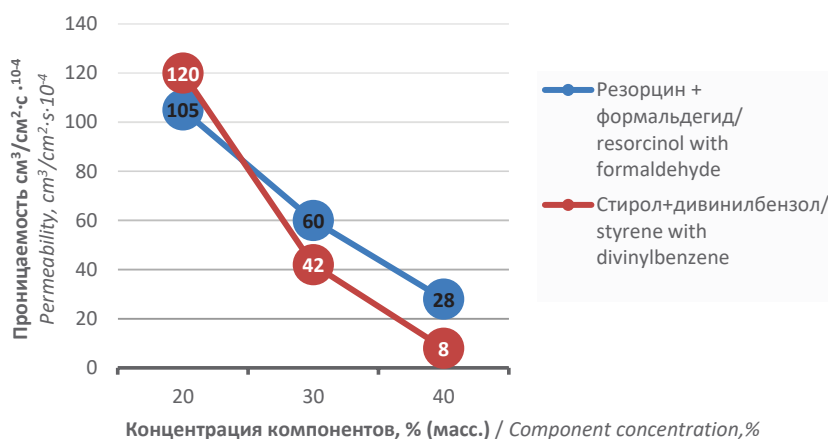


Рис. 4. Зависимость проницаемости от концентрации полимерообразующих компонентов

Fig. 4. Relationship between the permeability and the concentration of polymer-forming components

При взаимодействии образцов резорцинформальдегидного полимерного материала с биодизелем (метиловым эфиром рапсового масла) в течение 14 суток не выявлено изменений в составе полимера. Спектроскопические исследования не выявили изменения и в его составе биотоплива, контактировавшего с образцами полимеров.

Для очистки биотоплива разработан фильтр, в котором одновременно происходят очистка топлива от механических примесей и регенерация фильтрующих перегородок [16, 17]. Проверка эффективности регенерации образцов полимерных фильтров, изготовленных из резорцинформальдегидного полимерного материала, показала, что при противоточной продувке сжатым воздухом или промывке топливом удельная пропускная способность полимерных фильтров восстанавливается на 95...97%.

Полимерный фильтр показал хорошие результаты и может эффективно применяться для очистки биотоплива.

Выводы

1. Текстурные полимерные материалы с пористой структурой, полученные сополимеризацией резорцина с формальдегидом и стирола с дивинилбензолом, пригодны для очистки биотоплив.

2. Исследуемые полимерные материалы инертны к биотопливу. Удельная разрушающая нагрузка образцов материалов при растяжении составила 15,5...19,0 МПа, при сжатии – 2,5...6,0 МПа, толщина фильтрации – 10 мкм, полнота очистки – 92...95%.

3. В разработанном резорцинформальдегидном фильтроэлементе одновременно происходит очистка биотоплива от механических примесей, а также его регенерация с помощью противоточной промывки в выделенном сегменте. Разработанный полимерный фильтр может эффективно работать в течение продолжительного времени без замены и технического обслуживания.

Список источников / References

1. Barsic N., Humke A. Performance and emissions characteristics of a naturally aspirated diesel engine with vegetable oil fuels. *SAE Technical Paper*. 1981:810262. <https://doi.org/10.4271/810262>
2. Goering C.E., Schwab A.W., Daugherty M.J., Pryde E.H., Heakin A.J. Fuel Properties of eleven vegetable oils. *Transactions of the ASAE*. 1982;25(6):1472-1477. <https://doi.org/10.13031/2013.33748>
3. Cigizoglu K.B., Özaktas T., Karaosmanoğlu F. Used sunflower oil as an alternative fuel for diesel engines. *Energy Sources*. 1997;19(6):559-566. <https://doi.org/10.1080/00908319708908872>
4. Wagner L.E., Clark S.J., Schrock M.D. Effects of soybean oil esters on the performance, lubricating oil and water of diesel engine. *SAE Transactions*. 1984;93:57-72. <http://www.jstor.org/stable/44467120>
5. Clark S.J., Wagner L., Schrock M.D. Pienaar, P.G. Methyl and ethyl soybean esters as renewable fuels for diesel engines. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 1984;61:1632-1638. <https://doi.org/10.1007/BF02541648>
6. Bose P.K., Beg R.A., Ghosh B.B., Chakrabarti R.K., Saha S.K. Performance and emission characteristics of a naturally aspirated diesel engine with esterified vegetable oil. *SAE Technical Paper Series*. 2001;2001-01-3386. <https://doi.org/10.4271/2001-01-3386>
7. Hamasaki K., Tajima H., Takasaki K., Satohira K., Enomoto M., Egawa H. Utilization of waste vegetable oil methyl ester for diesel fuel. *SAE Transactions*. 2001;110:1499-1504. <http://www.jstor.org/stable/44742751>
8. Park S.H., Kim H.J., Suh H.K., Lee C.S. A study on the fuel injection and atomization characteristics of soybean oil methyl ester (SME). *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2009;30(1):108-116. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.11.002>
9. Shaishow S., Singh R.N., Tripathi Satyendra. Biohydrogen from algae: fuel of the future. *International Research Journal of Environment Sciences*. 2013;2(4):44-47.
10. Rosenberg J.N., Oyler A.G., Wilkinson L., Betenbaugh M.J. A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. *Current Opinion in Biotechnology*. 2008;19(5):430-436. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.07.008>
11. Lee A.K., Lewis D.M., Ashman P.J. Microbial flocculation, a potentially low-cost harvesting technique for marine microalgae for the production of biodiesel. *Journal of Applied Phycology*. 2009;21:559-567. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9391-8>
12. Улюкина Е.А. Особенности применения биотоплива в сельскохозяйственном производстве // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. № 6 (94). С. 23-27. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-23-27>
13. Улюкина Е.А. Особенности применения биотоплива в сельскохозяйственном производстве // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019;6(94):23-27. <https://doi.org/10.34677/1728-7936-2019-6-23-27> (In Russ.)
13. Ерохин М.Н., Белов М.И., Мельников О.М. Методика расчета контактного давления манжеты на вал // Вестник машиностроения. 2020. № 11. С. 39-45. EDN: PLAAFT
14. Ерохин М.Н., Белов М.И., Мельников О.М. Method of calculating the contact pressure of the cuff on the shaft. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2020;11:39-45. (In Russ.)
14. Коваленко В.П., Улюкина Е.А. Снижение износа деталей топливной аппаратуры дизельных двигателей // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. № 9. С. 12-15. EDN: PCKSZJ
15. Коваленко В.П., Улюкина Е.А. Reducing the wear of fuel equipment parts used in diesel engines. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2012;9:12-15. (In Russ.)
15. Способ получения полимера с пространственно-глобулярной структурой: Пат. RU2470948 C1 / Г.С. Жданов, С.С. Новиков, А.Ю. Сандеров; Бюл. № 36; опубл. 27.12.2012. EDN: ZGORN
15. Zhdanov G.S., Novikov S.S., Sanderov A.Y. Method for producing polymer with a spatially globular structure: Pat. RF 2470948, bul. No. 36, issued on December 27, 2012. (In Russ.)
16. Коваленко В.П., Улюкина Е.А., Гусев С.С. Удаление загрязнений из нефтепродуктов самоочищающимся фильтром // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2013. № 3 (59). С. 35-37. EDN: TEFXLR
16. Коваленко В.П., Улюкина Е.А., Гусев С.С. Decontamination of oil self-cleaning filter. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2013;3:35-37. (In Russ.)

17. Самоочищающийся фильтр: Пат. RU205889 U1 / А.А. Андреев, Е.А. Улюкина, С.С. Гусев, А.С. Апатенко; Бюл. № 23, опубл. 11.08.2021. EDN: PKSHQU

Информация об авторах

Елена Анатольевна Улюкина^{1,✉}, д-р техн. наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология машиностроения»; eulykina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3048-6836>; Scopus ID57218137673

Олег Петрович Андреев², канд. техн. наук, доцент кафедры «Тракторы и автомобили»; aopmsau@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0738-302X>; Scopus ID57224412292

Сергей Сергеевич Гусев³, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технический сервис машин и оборудования»; gusev.s@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3619-6848>; Scopus ID58399738100

Александр Александрович Андреев⁴, аспирант кафедры «Технический сервис машин и оборудования»; ato215@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8715-2286>

Алексей Владимирович Меликов⁵, канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизации и роботизации технологических процессов имени академика И.Ф. Бородина»; melikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2790-2146>; Scopus ID57188849547
^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Е.А. Улюкина – концептуализация, проведение экспериментов; О.П. Андреев – организация экспериментов; С.С. Гусев – обработка результатов, анализ, отчет; А.А. Андреев – формирование выводов, описание результатов; А.В. Меликов – оформление статьи, перевод на английский язык.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 04.06.2024; поступила после рецензирования и доработки 04.09.2024; принята к публикации 04.09.2024

Andreev A.A., Ulyukina E.A., Gusev S.S. Self-cleaning filter: Pat. RF No. 205889, Apatenko A.S. Bul. No. 23, issued on August 11, 2021. (In Russ.).

Author Information

Elena A. Ulyukina^{1,✉}, DSc (Eng), Professor, eulykina@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3048-6836>; Scopus ID57218137673

Oleg P. Andreev², CSc (Eng), Associate Professor; aopmsau@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0738-302X>

Sergey S. Gusev³, CSc (Eng), Associate Professor; gusev.s@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3619-6848>

Aleksandr A. Andreev⁴, postgraduate student; ato215@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8715-2286>

Aleksei V. Melikov⁵, CSc (Eng), Associate Professor; melikov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2790-2146>
^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

E.A. Ulyukina – conceptualization, investigation; O.P. Andreev – investigation; S.S. Gusev – processing of results, analysis, report; A.A. Andreev – conclusions, description of results; A.V. Melikov – writing – original draft preparation, review and editing.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism

Received 04.06.2024; Revised 04.09.2024; Accepted 04.09.2024.