Тип статьи: научная

УДК 662.75

DOI: 10.35887/2305-2538-2023-4-96-106

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ МОТОРНОГО ТОПЛИВА

Юлия Владимировна Мещерякова ¹, Игорь Вячеславович Бусин ², Станислав Александрович Нагорнов ³, Александр Викторович Щегольков ⁴

1,2,3 Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Россия,

1 yulya-belova@yandex.ru, 2 igorek19883108@mail.ru, 3 snagornov@yandex.ru,

4 Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия,

4 energynano@yandex.ru

Автор, ответственный за переписку: Юлия Владимировна Мещерякова, yulyabelova@yandex.ru

Corresponding author: Yulia Meshcheryakova, yulya-belova@yandex.ru

Реферат. В статье рассмотрен пример ультразвуковой кавитации, создаваемой пьезоэлектрическим излучателем. Для выявления режимов ультразвуковой кавитационной обработки использовали лабораторную установку Qsonica sonicators Q-700. Целью работы является определение режимов ультразвуковой обработки моторного топлива для создания кавитационной области. Определение областей кавитации осуществляли по площади разрушения образиов алюминиевой фольги, толщиной 0,008-0,009 мм. Лист алюминиевой фольги помещали в исследуемую среду параллельно и перпендикулярно наконечнику на различном расстоянии h, l. C выявления интенсивности возникающей кавитации осуществлялось кавитационного шума из сигнала первичного измерительного преобразователя на основе наномодифицированного эластомера погруженного в моторное топливо на различном расстоянии от излучателя и подключенного к мультиметру UNI-T UT61E+. Интенсивность кавитации оценивалась по изменению сопротивления среды, R. Для обработки использовали следующие виды моторного топлива: дизельное товарное топливо, биодизельное топливо на основе масла рыжика, смесевое дизельное топливо (содержащее 20% биодизельного). После исследования, фольгу высушивали и определяли площадь разрушения. Установлено, что на создание кавитации влияют следующие параметры – расстояние от излучающей поверхности, интенсивность, амплитуда и время ультразвуковой обработки $Spas. \phi = f(l, h, I, A, t)$. Определены четыре области кавитации: область активной или оптимальной кавитации, область начала кавитации, область зарождающейся кавитации, область отсутствия кавитации. В зависимости от амплитуды и интенсивности выделены 6 режимов работы. Установлено, что обработку используемого моторного топлива следует проводить на 3 кавитационном режиме работы $(A=21-40\%,\ I=12,5-24,8\ Bm/cm^2)$ лабораторной установки в используемом технологическом объеме или в более крупных объемах с отражающими поверхностями. Установлено, что кавитационный шум в биодизельном топливе ниже, чем в дизельном топливе, так как оно более вязкое. В вязких жидкостях кавитация менее развита и, следовательно, для них коэффициент поглощения ультразвука ниже. В связи с этим под среды с более высокой вязкостью необходимо проектировать аппараты исходя из оптимального расстояния от излучателя до дна.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, моторное топливо, амплитуда, площадь разрушения, сопротивление, режимы, области кавитации.

DETERMINATION OF ULTRASONIC CAVITATION TREATMENT MODES MOTOR FUEL

Yulia Meshcheryakova¹, Igor Busin², Stanislav Nagornov³, Alexander Shchegolkov⁴

^{1,2,3} All-russian research institute for use of machinery and petroleum products in agriculture Tambov, Russia,

¹yulya-belova@yandex.ru, ²igorek19883108@mail.ru, ³snagornov@yandex.ru, ⁴ Tambov State Technical University, Tambov, Russia, ⁴energynano@yandex.ru

Abstract. The article considers an example of ultrasonic cavitation created by a piezoelectric emitter. To identify the modes of ultrasonic cavitation treatment, the Osonica sonicators Q-700 laboratory unit was used. The aim of the work is to determine the modes of ultrasonic treatment of motor fuel to create a cavitation region. Cavitation areas were determined by the area of destruction of aluminum foil samples. 0.008-0.009 mm thick. A sheet of aluminum foil was placed in the test medium parallel and perpendicular to the tip at different distances h, l. In order to identify the intensity of the resulting cavitation, cavitation noise was isolated from the signal of a hydrophone immersed in motor fuel at different distances from the radiator and connected to a multimeter model UT61E. The intensity of cavitation was estimated by the change in the resistance of the medium, R. The following types of motor fuel were used for processing: commercial diesel fuel, biodiesel based on ginger oil, mixed diesel fuel (containing 20% biodiesel). After the study, the foil was dried and the area of destruction was determined. It has been established that the following parameters influence the creation of cavitation – the distance from the radiating surface, intensity, amplitude and time of ultrasonic treatment of the sample f = f(l, h, I, A, t). Four cavitation areas are defined: the area of active or optimal cavitation, the area of the beginning of cavitation, the area of incipient cavitation, the area of absence of cavitation. Depending on the amplitude and intensity, 6 operating modes are highlighted. It is established that the processing of the used motor fuel should be carried out on the 3 cavitation mode of operation (A =21-40%, I= 12.5-24.8 W/cm2) of the laboratory installation in the used technological volume or in larger volumes with reflective surfaces. It has been found that the cavitation noise in biodiesel is lower than in diesel fuel, since it is more viscous. In viscous liquids, cavitation is less developed and, consequently, the ultrasound absorption coefficient is lower for them. In this regard, it is necessary to design devices for media with a higher viscosity based on the optimal distance from the radiator to the bottom.

Keywords: ultrasound, cavitation, motor fuel, amplitude, fracture area, resistance, modes, cavitation areas.

Для цитирования: Мещерякова Ю.В., Бусин И.В., Нагорнов С.А., Щегольков А.В. Определение режимов ультразвуковой кавитационной обработки моторного топлива // Наука в Центральной России. 2023. Т. 64, № 4. С. 96-106. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-4-96-106.

For citation: Meshcheryakova Y, Busin I., Nagornov S., Shchegolkov A. Determination of ultrasonic cavitation treatment modes motor fuel. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 64(4): 96-106. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-4-96-106.

Введение. Одно из перспективных направлений развития сельскохозяйственного производства является обеспечение в достаточном количестве и требуемого качества смесевого моторного топлива для современной автотракторной техники, существующие методы производства которого неизбежно требуют дальнейшего совершенствования технологического процесса и разработки прогрессивного энергоэффективного аппаратурного оформления. К наиболее востребованным относятся мобильные установки для получения смесевого моторного топлива, снабженные блоком для получения биодизельного топлива. В ранее разработанной мобильной установке [1] в основе технологии получения биотоплива использован эффект Ранка-Хилша, который требует применения компрессора с устройством очистки воздуха. Этот метод по ряду причин не всегда является удобным для эксплуатации разработанной мобильной установки в условиях ряда сельскохозяйственных предприятий, в частности, в ней отсутствует блок улучшения качества моторного топлива за счет деструкции тяжелых углеводородов.

На протяжении многих лет отечественные и зарубежные ученые свое внимание уделяют термодинамически неравновесному пузырьковому состоянию жидкой среды (краеугольным камнем которой является кавитация), поскольку термодинамическая неравновесность одной из

фаз обуславливает протекание интенсивных процессов массообмена и возникновение полей давления высокой интенсивности, что может являться основой для создания новых технологических процессов [2]. В этом направлении наиболее успешно зарекомендовали себя модульные смесители [3], в которых заложено многофакторное воздействие на обрабатываемую жидкую среду, среди которых первостепенная роль отводится кавитации [4], обуславливающее требуемое изменение фракционного состава и физико-химических свойств обрабатываемого топлива.

Применение кавитационной ультразвуковой обработки позволяет интенсифицировать и усовершенствовать технологические процессы в различных отраслях, а также повысить их эффективность и надежность. Как правило, явление кавитации связывают с износом и эрозией на грибных винтах судов и различного рода насосов [5] в системах водоснабжения и отопления. Однако, кавитация способна приводить к разрывам химических связей, увеличению поверхностей и скоростей взаимодействия, ускорению процессов массо- и теплопереноса. На сегодняшний день ультразвуковая воздействие используется для обработки различных по свойствам материалов, для обработки различных по агрегатному состоянию веществ, для воздействия на биологические ткани и многое другое [6-10].

Все процессы, которые реализуются с ультразвуком, носят экстремальный характер и всегда при их реализации необходима его оптимизация. Колебания высокой интенсивности, а также кавитация по определению призваны изменять структуру и свойства материала и веществ. Характер этих изменений свидетельствует, что реализация исследуемых процессов возможна при определенных режимах воздействия. При реализации ультразвукового воздействия необходимо контролировать частоту, интенсивность, амплитуду колебаний, давление, а также регулировать конструктивные параметры - размеры обрабатываемого объема, размеры ультразвукового колебательного элемента и их расположение, чтобы получить оптимальные результаты.

В связи с этим существует необходимость в обосновании режимов ультразвукового воздействия в устройствах, необходимых для создания оптимальной кавитационной области в моторном топливе. Целью данной работы является определение режимов ультразвуковой обработки моторного топлива для создания кавитационной области.

Материалы и методы. Для выявления режимов обработки и областей кавитации использовали лабораторную установку Qsonica sonicators Q700 (рисунок 1a). Ультразвуковой электронный генератор преобразует сетевое питание переменного тока в сигнал частотой 20 кГц, который приводит в действие пьезоэлектрический преобразователь. Этот электрический сигнал преобразуется преобразователем в механическую вибрацию. Вибрация усиливается и передается по длине зонда, где наконечник продольно расширяется и сжимается. Расстояние, на которое перемещается наконечник, зависит от амплитуды. В топливе вибрация наконечника вызывает кавитацию, образование и сильное сжатие микроскопических пузырьков.

Ультразвуковой аппарат позволяет запрограммировать определенный режим обработки, исследуемого топлива. Для этого с помощью сенсорного экрана устанавливается амплитуда ультразвука, время обработки и время отдыха. В случае возникновения неисправности устройство оснащено схемой обнаружения неисправностей для отключения обработки ультразвуком.

С целью выявления интенсивности возникающей кавитации осуществлялось выделение кавитационного шума из сигнала первичного измерительного преобразователя на основе наномодифицированного эластомера [11] погруженного в моторное топливо на различном расстоянии от излучателя (рисунок 1 б) и подключенного к мультиметру *UNI-T UT61E*+ (рисунок 1 с). Интенсивность кавитации оценивалась по изменению сопротивления среды, R.

Для обработки использовали следующие виды моторного топлива: дизельное товарное топливо, биодизельное топливо на основе масла рыжика, смесевое дизельное топливо (содержащее 20% биодизельного).

Определение областей кавитации осуществляли по площади разрушения образцов алюминиевой фольги, толщиной 0,008-0,009 мм. Лист алюминиевой фольги помещали в исследуемое топливо параллельно и перпендикулярно наконечнику на различном расстоянии h, l. После исследования, фольгу высушивали и определяли площадь разрушения.

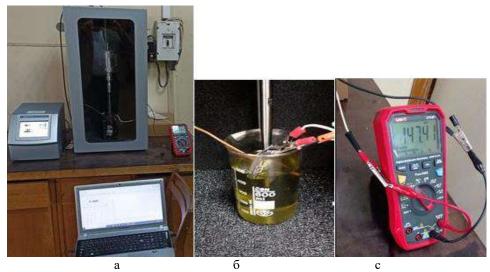


Рисунок 1 – Лабораторная установка для ультразвуковой обработки топлива

Результаты и их обсуждение. На рисунке 2 показана общая схема ультразвуковой кавитационной обработки моторного топлива.



l, l – расстояние от излучающей поверхности до отражающей стенки, м; d – диаметр наконечника, м.

Рисунок 2 – Общая схема и фото ультразвуковой кавитационной обработки топлива

В зависимости от изменения расстояния (h, l) интенсивности ультразвука (I), амплитуды (A) и времени обработки топлива (t) оценивали площадь разрушенной области алюминиевой фольги $(S_{\text{раз.ф}})$ (рисунок 3).



а) расположение фольги перпендикулярно излучающей поверхности на расстоянии h









б) расположение фольги параллельно излучающей поверхности на расстоянии l Рисунок 3 — Фото тестовых разрушенных образцов фольги

На рисунках 4-6 представлено влияние параметров ультразвуковой обработки на площадь разрушения фольги.

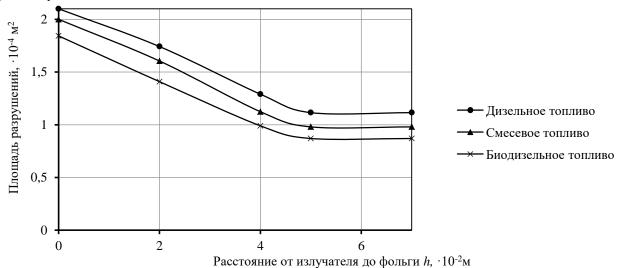


Рисунок 4 – Динамика изменения площади разрушения от расстояния от излучателя до фольги

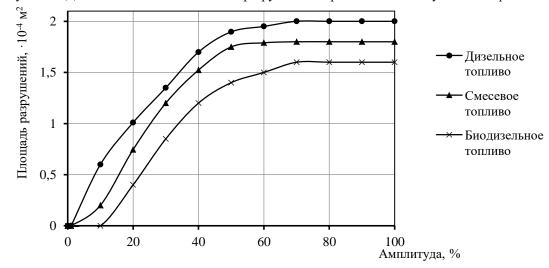


Рисунок 5 – Динамика изменения площади разрушения от амплитуды ультразвуковой обработки

Значительное влияние на разрушение листа фольги оказывает интенсивность, амплитуда и расстояние. С течением времени обработки площадь разрушения увеличивается, но при этом растет температура обрабатываемого топлива. За критерий оптимальной кавитации выбрано разрушение листа алюминиевой фольги площадью более 1,13 см2, более диаметра наконечника. Дальнейшее увеличение расстояния от излучающей поверхности не приводит к заметным разрушениям фольги.

Установлено, что чем ближе к излучателю и чем выше интенсивность или амплитуда ультразвуковой обработки, тем большая часть листа подвергается разрушению, тем активнее кавитационная область. Следовательно, в обрабатываемом топливе можно выделить различные области кавитации, что подтверждается и визуальным наблюдением. Пузырьки топлива образуются на некотором расстоянии от излучателя, поднимаются на поверхность и схлопываются.

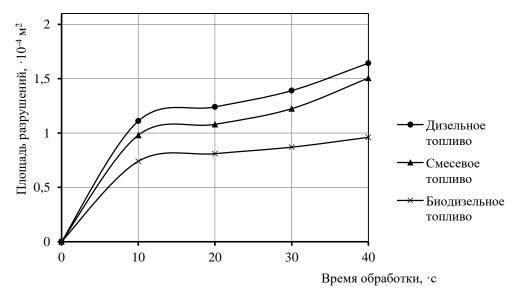


Рисунок 6 – Динамика изменения площади разрушения от времени ультразвуковой обработки

Таким образом, по мере удаления от излучателя при A=100% выделено несколько областей кавитации (рисунок 7): 1- область активной или оптимальной кавитации, характеризуется активным схлопыванием пузырьков с максимальными амплитудами (для данного технологического объема $h_1=2\cdot 10^{-2} \text{м}$); 2- область начала кавитации, характеризуется появлением небольшого количества пузырьков и их схлопыванием, $h_2=4\cdot 10^{-2} \text{м}$; 3- область зарождающейся кавитации, начало образования пузырьков $h_3=6\cdot 10^{-2} \text{м}$; 4- область отсутствия кавитации, характеризуется отсутствием пузырьков $h>6\cdot 10^{-2} \text{м}$. С уменьшением амплитуды или интенсивности обработки размер кавитационных областей может изменяться. На рисунке 7 представлено схематичное расположение кавитационных областей в обрабатываемом объеме. В соответствии с изменением амплитуды в таблице выделены следующие режимы обработки.

Tac	олица 🛚	l – I	ежимы	обра	ботки	MOTO	рного	топлива
-----	---------	-------	-------	------	-------	------	-------	---------

Режимы	1 режим	2 режим	3 режим	4 режим	5 режим	6 режим
	докавитационный	кавитационный				
A, %	1-10	11-20	21-40	41-60	61-80	81-100
I, Вт/см ²	0,62-6,2	6,3-12,4	12,5-24,8	24,9-37,2	37,3-49,6	49,7-62
Области	4	1 – 4				

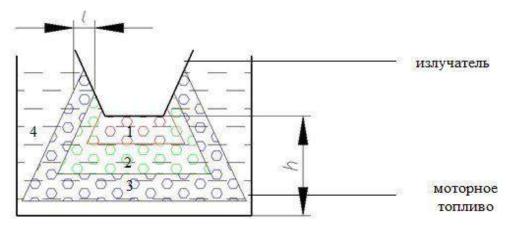
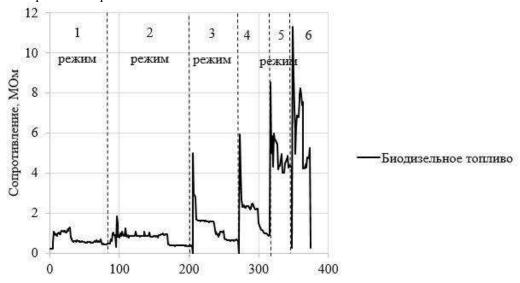


Рисунок 7 – Схематичное распределение кавитационных областей

На рисунке 8 представлено изменение кавитационного шума при обработке биодизельного топлива на различных режимах.



Время, сек

Рисунок 8 – Изменение сопротивления кавитационного шума биодизельного топлива

С увеличением амплитуды и интенсивности обработки наблюдается увеличение кавитационного шума. Для каждого режима характерно появление максимального пика. Также режимы не одинаковы по времени, так как скорость нагрева топлива разная.

По мере приближения излучателя к гидрофону кавитационный шум увеличивается и, наоборот, при его удалении шум снижается. Так на графике 9 показаны эти изменения для биодизельного топлива, а на графике 10 для разных видов топлив.

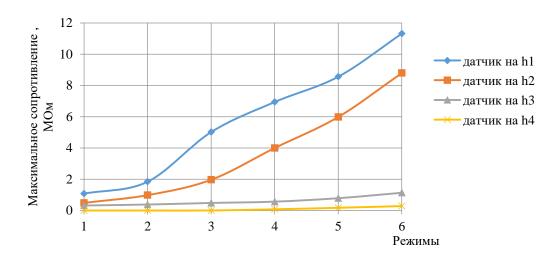


Рисунок 9 – Изменение сопротивления кавитационного шума биодизельного топлива

С увеличением расстояния h уменьшается кавитационный шум, следовательно, осуществлять кавитационную обработку топлива в больших технологических объемах затруднительно. Для вязких жидкостей необходимо проектировать аппараты с оптимальным расстоянием от излучателя до дна. Так же для решения этой проблемы предложено дополнительно использовать отражающие поверхности (рисунок 11).

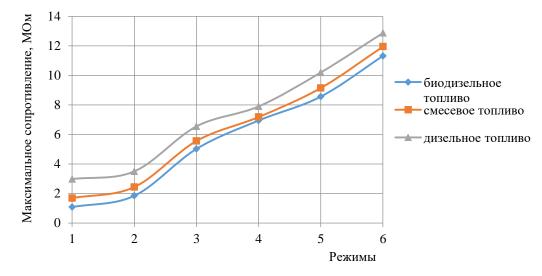


Рисунок 10 — Изменение сопротивления кавитационного шума в активной кавитационной области

Для разных видов топлива максимальные значения кавитационного шума отличаются. Для биодизельного топлива максимальное сопротивление ниже, чем для дизельного, что объясняется вязкостными свойствами топлива.

Использование отражателей позволяет увеличить кавитационный шум и, как следствие, увеличить размер активной (оптимальной) кавитационной области.

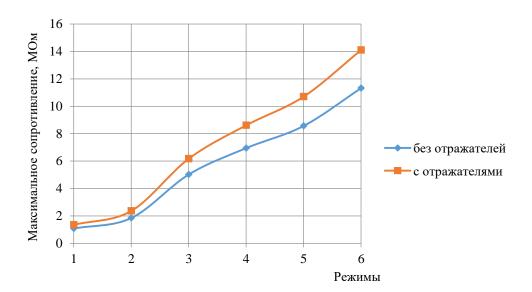


Рисунок 11 — Изменение сопротивления кавитационного шума в активной кавитационной области для биодизельного топлива

На рисунке 12 показана динамика изменения вязкости дизельного топлива при различных режимах работы с отражающими поверхностями. Обработку используемого моторного топлива следует проводить на 3 режиме работы лабораторной установки в используемом технологическом объеме или в более крупных объемах с отражающими поверхностями.

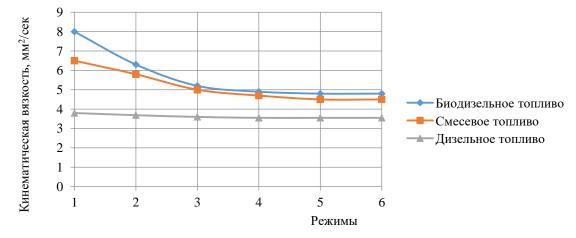


Рисунок 12 – Динамика изменения кинематической вязкости

Заключение. Таким образом, установлено, что на создание кавитации влияют следующие параметры — расстояние от излучающей поверхности, интенсивность, амплитуда и время ультразвуковой обработки Sраз. Φ = f (l, h, l, A, t). Определены четыре области кавитации: область активной или оптимальной кавитации, область начала кавитации, область зарождающейся кавитации, область отсутствия кавитации. В зависимости от амплитуды и интенсивности выделены 6 режимов работы. Установлено, что обработку используемого моторного топлива следует проводить на 3 кавитационном режиме работы (A=21-40%, I=12,5-24,8 BT/см 2)

лабораторной установки в используемом технологическом объеме или в более крупных объемах с отражающими поверхностями. Установлено, что кавитационный шум в биодизельном топливе ниже, чем в дизельном топливе, так как оно более вязкое. В вязких жидкостях кавитация менее развита и, следовательно, для них коэффициент поглощения ультразвука ниже. В связи с этим под среды с более высокой вязкостью необходимо проектировать аппараты исходя из оптимального расстояния от излучателя до дна.

Список источников

- 1. Зазуля А.Н., Нагорнов С.А., Корнев А.Ю. Мобильная установка для получения биодизельного топлива // Сельский механизатор. 2022. № 12. С. 12-14.
- 2. Руденко, М.Г. Кавитация и фазовые превращения в условиях термодинамической неравновесности жидкости: Автореф. дис. на ...док. тех. наук: 01.04.14 / М.Г. Руденко Улан-Удэ, 2011. 36 с.
- 3. Модульный статический смеситель-активатор: пат. 2775588 Рос. Федерация 2021127801 / A. Г. Мещеряков, Ю. В. Мещерякова, А. Ю. Корнев, С. А. Нагорнов: заявл. 21.09.2021: опубл. 05.07.2022. 5 с.
- 4. Batchelor, G.K. An introduction to fluid dynamics / G.K. Batchelor. Cambridge at the University Press, 1970. 760 p.
- 5. Гаврилова, Т.О. Анализ особенностей возникновения кавитации в системах водоснабжения и отопления / Т.О. Гаврилова // Инновации в науке. 2012. № 13-1. С. 55-59.
- 6. Промтов, М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М.А. Промтов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. -2008. − Т. 14, № 4. − С. 861-869.
- 7. Свойства и эффекты кавитации / Ю.М. Аверина, Н.А. Моисеева, Н.П. Нырков [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. -2018. T. 32, № 14(210). C. 37-39.
- 8. Фридман, В.М. Ультразвуковая химическая аппаратура / В.М. Фридман М.: Машиностроение, 1967. 234 с.
- 9. Иванов, Е. Г. Механизм нагрева воды при периодической кавитации/ Е. Г. Иванов, А. В. Пасин, Е. В. Трегубова // Сельский механизатор. 2023, -№1-2. С. 24 26.
- 10. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) / А. Ю. Радзюк, Е. Б. Истягина, Л. В. Кулагина, А. В. Жуйков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. -2022. T. 333, № 9. C. 209-218.
- 11. Щегольков А.В., Щегольков А.В., Земцова Н.В. Исследование тепловыделений в наномодифицированных эластомерах при растяжении и кручении под действием электрического напряжения. Frontier Materials & Technologies. 2022;(2):121-132. https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-121-132.

References

- 1. Zazulya A.N., Nagornov S.A., Kornev A.Yu. Mobile installation for biodiesel production // Rural mechanizer. 2022. No. 12. pp. 12-14.
- 2. Rudenko, M.G. Cavitation and phase transformations under conditions of thermodynamic disequilibrium of a liquid: Abstract. dis. on ...Doctor of Technical Sciences: 01.04.14 / M.G. Rudenko Ulan-Ude, 2011.-36 p.
- 3. Modular static mixer-activator: pat. 2775588 Ros. Federation 2021127801 / A. G. Meshcheryakov, Yu. V. Meshcheryakova, A. Yu. Kornev, S. A. Nagornov: application 21.09.2021: publ. 05.07.2022. 5 p.
- 4. Batchelor, G.K. An introduction to fluid dynamics / G.K. Batchelor. Cambridge at the University Press, 1970. 760 p.
- 5. Gavrilova, T.O. Analysis of the features of the occurrence of cavitation in water supply and heating systems / T.O. Gavrilova // Innovations in science. 2012. No. 13-1. pp. 55-59.
- 6. Promtov, M.A. Prospects of application of cavitation technologies for intensification of chemical and technological processes / M.A. Promtov // Bulletin of the Tambov State Technical University. 2008. Vol. 14, No. 4. pp. 861-869.

- 7. Properties and effects of cavitation / Yu.M. Averina, N.A. Moiseeva, N.P. Nyrkov [et al.] // Advances in chemistry and chemical technology. 2018. Vol. 32, No. 14(210). pp. 37-39.
- 8. Friedman, V.M. Ultrasonic chemical equipment / V.M. Friedman M.: Mashinostroenie, 1967. $234\,p$
- 9. Ivanov, E. G. The mechanism of water heating during periodic cavitation/ E. G. Ivanov, A.V. Pasin, E. V. Tregubova // Rural mechanic. 2023. -№1-2. p. 24-26.
- 10. The current state of the use of cavitation technologies (a brief overview) / A. Y. Radzyuk, E. B. Istyagina, L. V. Kulagina, A.V. Zhuikov // Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. 2022. T. 333, No. 9. pp. 209-218.
- 11. Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V. Investigation of heat release in nanomodified elastomers under tension and torsion under the action of electric voltage. Frontier Materials & Technologies. 2022;(2):121-132. https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-2-121-132.

Информация об авторах

Ю.В. Мещерякова - кандидат технических наук, старший научный сотрудник; Бусин И.В. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник; С.А. Нагорнов - доктор технических наук, профессор; А.В. Щегольков – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

Yu. Meshcheryakova - Candidate of Technical Sciences, Senior researcher; I. Busin - Candidate of Technical Sciences, Senior researcher.; S. Nagornov - Doctor of Technical Sciences, Professor; A. Shchegolkov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Contribution of authors All authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 03.08.2023 Принята к публикации (Accepted): 24.08.2023