Тип статьи: научная
УДК 631.347.3.012.3.001.2
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-1-48-56

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В УЛЬТРАЗВУКОВОМ СМЕСИТЕЛЕ

Юлия Владимировна Мещерякова [1]***, Станислав Александрович Нагорнов*** [2]
[1, 2] *Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Россия*
[1] *Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия*
[1]yulya-belova@yandex.ru, [2]snagornov@yandex.ru

Автор ответственный за переписку: Юлия Владимировна Мещерякова, yulya-belova@yandex.ru
Corresponding author: Yulia Meshcheryakova, yulya-belova@yandex.ru

Реферат. *Инновационным способом решения актуальных проблем энергосбережения и снижения загрязнения окружающей среды при работе автотракторной техники может стать применение в ней специально разработанного ультразвукового смесителя моторного топлива. Создание кавитационных областей в ультразвуковом смесителе способствует дроблению длинных углеводородных цепей и тем самым позволяет улучшать качество топлива (дизельного и смесевого дизельного топлива), снижать расход топлива, продлевать работу топливной системы дизельного двигателя. С целью создания в смесителе оптимальной кавитационной области исследованы возможные режимы ультразвуковой обработки. Установление режимов обработки осуществляли по изменению напорно-расходной зависимости на лабораторной установке, а определение областей кавитации исходя из методики численного моделирования потоков топлива в исследуемой конструкции. Численное моделирование позволило установить области кавитации с различной акустической мощностью. Проведенные экспериментальные исследования гидродинамических параметров реального смесителя указывают на адекватность разработанной модели. В зависимости от перепада давления определены 8 режимов ультразвукового воздействия, которые в свою очередь разделили на докавитационные и кавитационные. Диапазон рабочего давления составил от 0 до 4 атм при перепаде в 0,5 атм для каждого режима. При достижении перепада давления в 2,5 атм наблюдается максимальное снижение кинематической вязкости (в среднем на 23%) для всех видов топлива. Дальнейшее изменение кавитационного режима в сторону увеличения перепада давления не приводит к существенному изменению кинематической вязкости моторных топлив (около 2%). Следовательно, для оптимальной работы установки подходит 5 кавитационный режим.*

Ключевые слова*: ультразвук, кавитация, дизельное топливо, модель, режимы.*

INVESTIGATION OF THE CAVITATION PROCESS IN AN ULTRASONIC MIXER

Yulia Meshcheryakova [1]***, Stanislav Nagornov*** [2]
[1,2]*All-russian research institute for use of machinery and petroleum products in agriculture, Tambov, Russia,*
[2]*Tambov State Technical University, Tambov, Russia*
[1]yulya-belova@yandex.ru, [2]snagornov@yandex.ru

Abstract. *An innovative way to solve pressing problems of energy saving and reducing environmental pollution during the operation of automotive equipment can be the use of a specially designed ultrasonic motor fuel mixer. The creation of cavitation areas in an ultrasonic mixer promotes the fragmentation of long hydrocarbon chains and thereby improves the quality of fuel (diesel and mixed diesel fuel), reduces*

fuel consumption, and prolongs the operation of the diesel engine fuel system. Possible modes of ultrasonic treatment were investigated in order to create an optimal cavitation region in the mixer. The establishment of treatment modes was carried out by changing the pressure-flow relationship in a laboratory installation, and the determination of cavitation areas based on the technique of numerical modeling of fuel flows in the structure under study. Numerical modeling made it possible to establish cavitation regions with different acoustic powers. The experimental studies of the hydrodynamic parameters of a real mixer indicate the adequacy of the developed model. 8 modes of ultrasonic exposure are defined depending on the pressure drop; they, in turn, are divided into pre-cavitation and cavitation. The operating pressure range was from 0 to 4 atm with a difference of 0.5 atm for each mode. The maximum reduction in kinematic viscosity (on average 23%) for all types of fuel is observed when the pressure drop reaches 2.5 atm. A further change in the cavitation regime towards an increase in the pressure drop does not lead to a significant change in the kinematic viscosity of motor fuels (about 2%).

Keywords: *ultrasound, cavitation, diesel fuel, model, modes.*

Для цитирования: Мещерякова Ю.В., Нагорнов С.А. Исследование кавитационного процесса в ультразвуковом смесителе // Наука в Центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 67, № 1. С. 48-56. https://doi.org/10.35887/2305- 2538-2024-1-48-56.

For citation: Meshcheryakova Yu., Nagornov S. Investigation of the cavitation process in an ultrasonic mixer. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 67(1): 48-56. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-1-48-56.

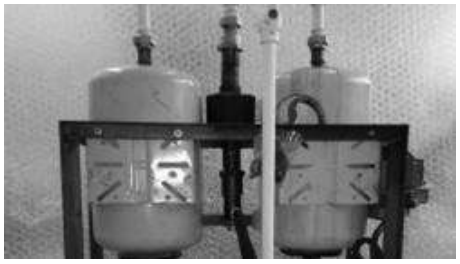
Введение. Применение кавитационной обработки тесно связано ультразвуковым воздействием. При реализации ультразвука в жидких средах возникает сопутствующее явление кавитация. Кавитация характеризуется образованием пузырьков газа в зоне пониженного давления. Пузырек растет, запасая энергию, далее проходит стадия сжатия, и пузырек мгновенно сокращается в объеме и схлопывается. Создание масштабного схлопывания пузырьков, т.е. кавитационного режима в ультразвуковых аппаратах позволяет реализовать множество механохимических, механотехнологических и химических процессов [1-5].

При колебании и схлопывании кавитационных пузырьков в обрабатываемом объеме (например, при обработке дизельного топлива) скапливается энергия, обусловленная высокими значениями давления и температуры, что, вероятнее всего, обуславливает деструкцию тяжелых молекул углеводородов, появление более легких и разветвленных молекул. Все это сказывается на качестве конечного продукта: изменению фракционного состава, снижению содержания смол (при их наличии), изменению физико-химических характеристик. Также благодаря модификации дизельного топлива в однородную гомогенную массу уменьшается расход топлива, повышается его теплотворная способность, обеспечивается более полное сгорание, поскольку наше топливо в конечном итоге трансформируется в виде энергетически насыщенного моторного топлива.

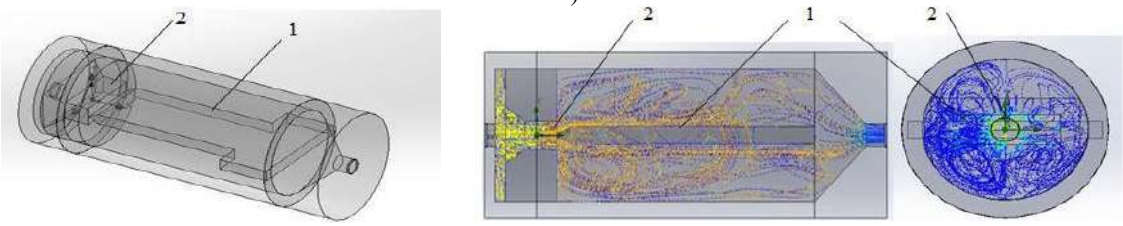
Наиболее востребованы пьезоэлектрические и гидродинамические устройства. Однако, для создания кавитационного режима в них, необходимы данные об оптимальных ультразвуковых параметрах обработки для различных по вязкости моторных топлив. В предыдущих работах показана эффективность обработки моторного топлива на ультразвуковом гидродинамическом смесителе. Однако при его работе не уточнялись необходимые режимы обработки для осуществления кавитации. В связи с этим, целью данной работы является установление кавитационных ультразвуковых режимов обработки моторного топлива на лабораторной установке, на примере дизельного топлива.

Материалы и методы. Установление режимов ультразвуковой обработки осуществляли по изменению напорно-расходной зависимости в разработанной установке, (рисунок 1а) а определение областей кавитации исходя из методики численного моделирования потоков топлива в исследуемой конструкции. На рисунке 1б и 1в представлены модели ультразвукового смесителя в общем виде (б) и с траекториями потока дизельного топлива (в). Ультразвуковой смеситель представляет собой камеру внутри, которой расположена тонкая пластинка. Струя топлива под давлением через сопло подается в смеситель, попадает на пластину и она совершает колебания, обеспечивающие смешение и обработку дизельного топлива. Расчет течения исследуемого

топлива в исследуемой модели осуществляется решением встроенных в программу известных дифференциальных уравнений движения, неразрывности, энергии. Задача решается методом решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для моделирования турбулентных течений [6].



а)



1 - пластина; 2 - сопло.

а) в общем виде б) с траекториями потока

Рисунок 1 – Фото и модель ультразвукового смесителя

Результаты и их обсуждение. Результаты по обработке топлива показали, что использование ультразвуковых смесителей способствует улучшению качества топлива (рисунок 2), снижению расхода топлива, позволяет продлевать работу топливной системы дизельного двигателя (таблица 1), способствует изменению углеводородного состава, что подтверждено хроматографическими исследованиями.

Таблица 1 – Показатели ресурсных характеристик топливной аппаратуры

Показатель	Цикловая подача, мм^3/цикл	Пусковая подача, мм^3/цикл	Давление подкачивающего насоса, КПа	Давление начала впрыскивания, кгс/см^2
без смесителя активатора	62	17,5	175	160
с активатором-смесителем (после 960 моточасов)	65	20	190	165

На рисунке 2 представлена кинематическая вязкость топлив, прошедших кавитационную обработку в ультразвуковом смесителе.

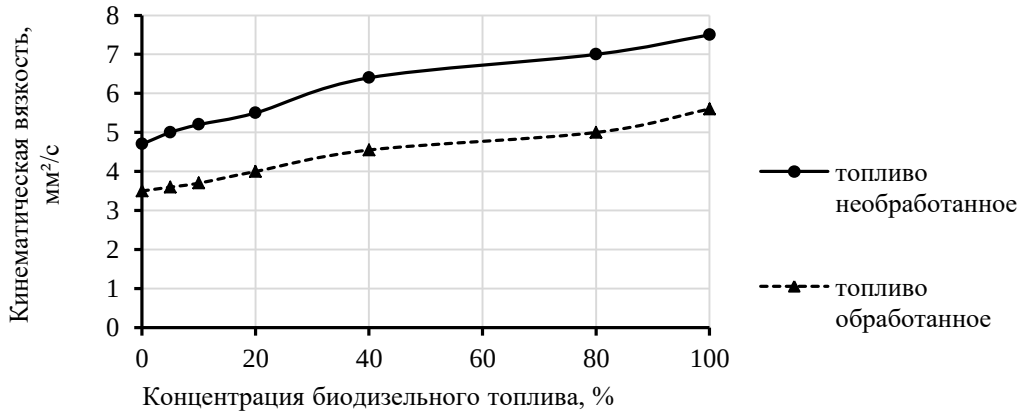


Рисунок 2 – Динамика кинематической вязкости

Обработка дизельного топлива в ультразвуковом кавитационном смесителе, дизельного смесевого топлива (топлива полученного смешением дизельного топлива и метиловых эфиров растительных масел) показала изменение вязкостно-плотностных свойств. Также обработка растительных масел совместно с дизельным топливом в роторном кавитационном смесителе позволяет снижать вязкость получаемого масла, позволяет улучшить свойства обрабатываемого смесевого топлива (топлива полученного смешением обработанного растительного масла и дизельного топлива) и как следствие уменьшить нагар на соплах топливных форсунок и в цилиндрах [7].

При прохождении топлива через данные устройства возникают дополнительные физические явления (кавитация, гомогенизация, вихреобразование), которые воздействую на углеводородные молекулы и способствуют их дроблению и активации, что выражается в изменении физико-химических характеристик дизельного топлива. Подробные исследования по этому направлению представлены в других публикациях [8-10]. Данная статья посвящена установлению причин изменения этих физико-химических параметров, а именно явлению кавитации.

С помощью моделирования, разработанного ультразвукового смесителя, на рисунке 3, 4 показано распределение давления в различных точках конструкции (по всей длине внутренней и внешней части сопла, на заостренной части пластины, верхней и нижней частях пластины). Установлено, что при выходе дизельного топлива из сопла и попадании на заостренную часть пластины происходит резкое повышение давления. Это наглядно прослеживается на рисунке 3 и численно можно увидеть на рисунке 4, давление в области пластины (кривые 1,3, 4, 6) выше, чем давление в сопле (кривая 5).

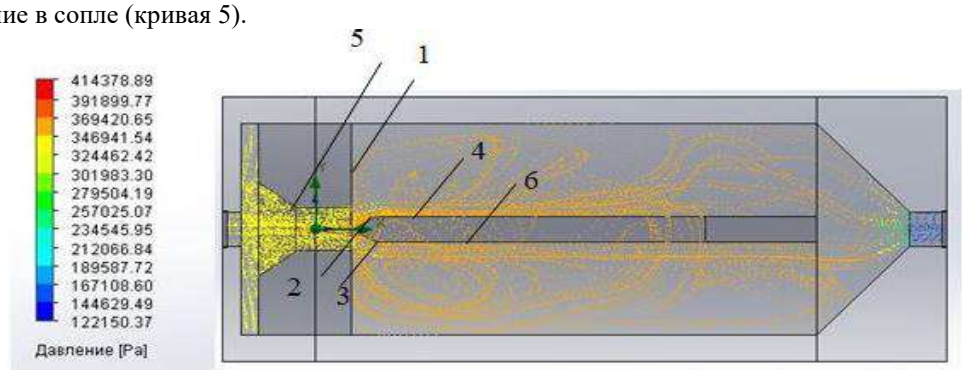


Рисунок 3 – Фото распределения давления внутри смесителя

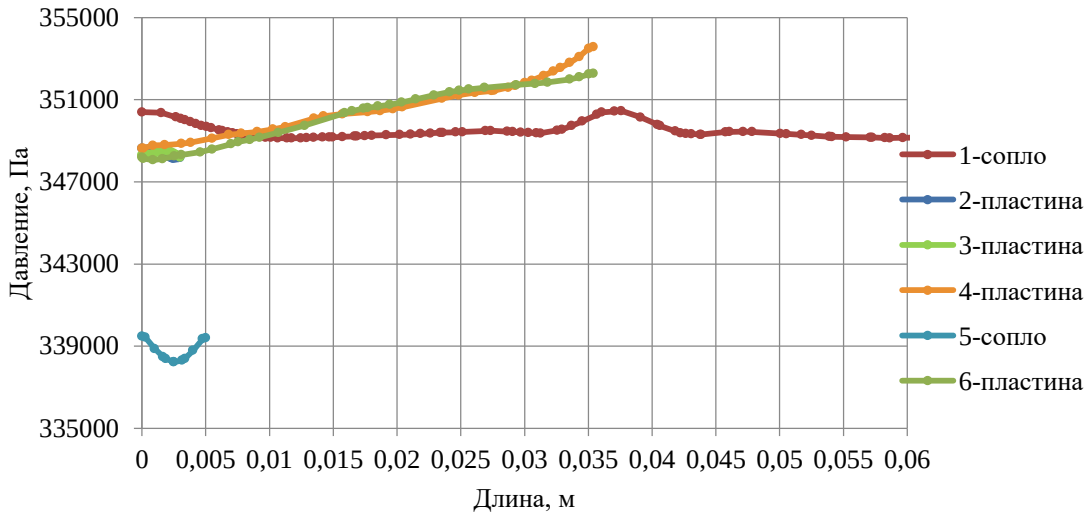


Рисунок 4 – Изменение давления в различных точках смесителя

На рисунке 5 показаны длины траектории потока дизельного топлива в зависимости от акустической мощности или по-другому распределение акустической мощности по длине смесителя. При распределении уровня акустической мощности по длине смесителя замечено, что усиление акустической мощности наблюдается при выходе потока дизельного топлива из сопла и попадании его на заострённую часть колебательного элемента (пластины), что может свидетельствовать о наличии явления кавитации (области активной кавитации). По мере удаления потоков дизельного топлива от сопла и пластины, колебания затухают, уровень акустической мощности снижается, кавитация прекращается (область отсутствия кавитации).

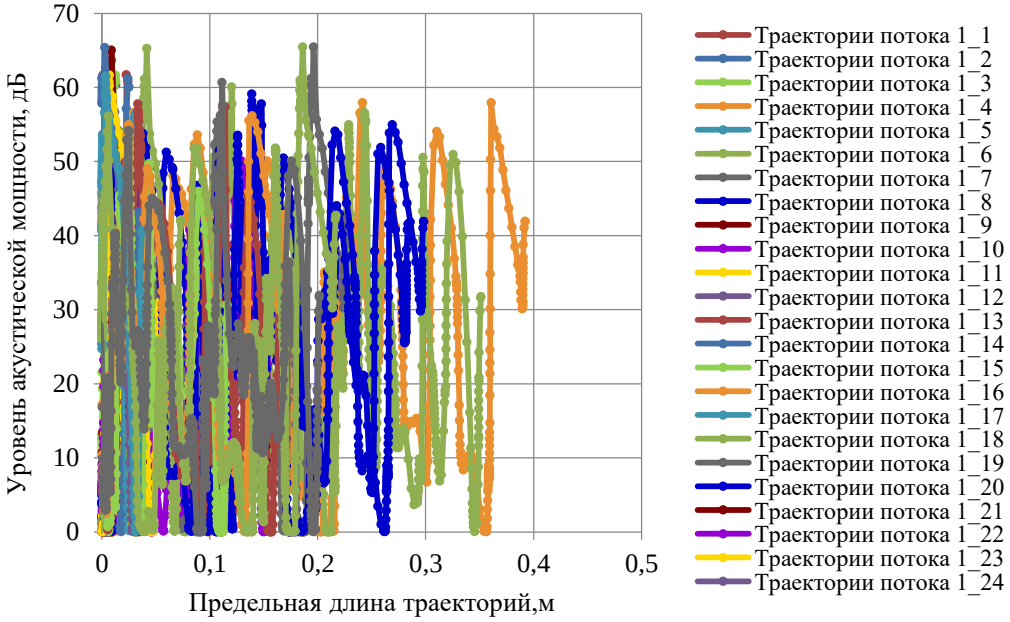


Рисунок 5 – Распределение уровня акустической мощности

При изменении подаваемого давления характер распределения акустической мощности по длине смесителя остается прежним, но значения увеличиваются. Так как при увеличении перепада давления уровень акустической мощности увеличивается, следовательно, размер кавитационной области может увеличиваться (рисунок 6).

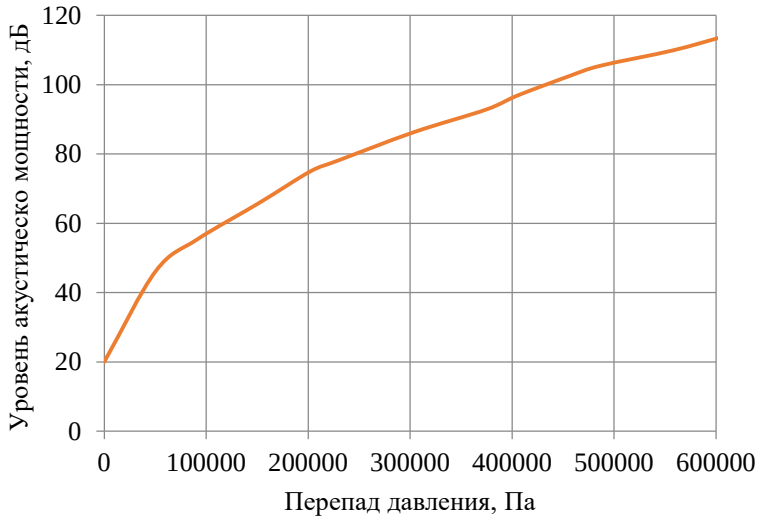


Рисунок 6 – Влияние давления на уровень акустической мощности в смесителе

Для проверки адекватности модели и расчетных зависимостей были выполнены экспериментальные исследования гидродинамических параметров разработанного смесителя (рисунок 7).

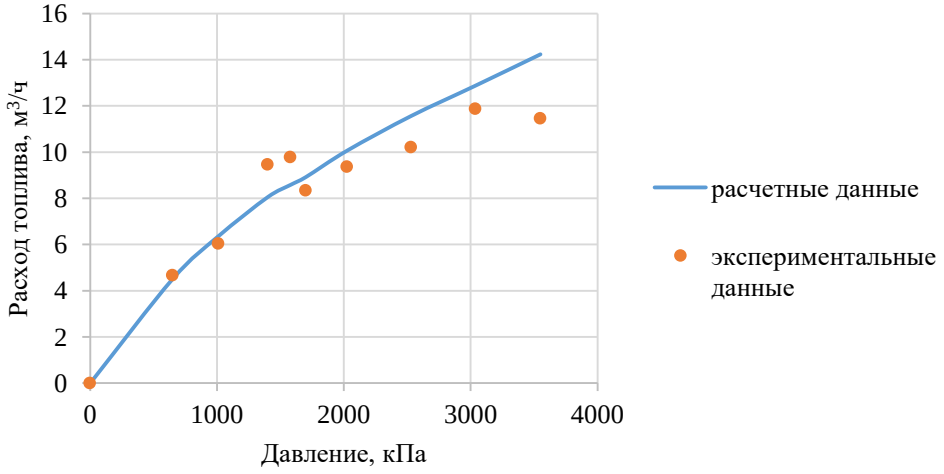


Рисунок 7 – Напорно-расходная зависимость гидродинамического смесителя

Проведенные исследования показали, что погрешность расчета в среднем 7-10% по сравнению с экспериментальными данными, что говорит об адекватности разработанной модели.

В зависимости от перепада давления в таблице 2 представлены 8 режимов ультразвукового воздействия, которые в свою очередь разделили на докавитационные и кавитационные. Диапазон рабочего давления составил от 0 до 4 атм при перепаде в 0,5 атм для каждого режима.

Таблица 2 – Режимы воздействия на моторное топливо

Режимы	1	2	3	4	5	6	7	8
	докавитационный	кавитационный						
ΔP, атм	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4
Области кавитации	3-4	2-4	1-4					

При достижении перепада давления в 2,5 атм наблюдается максимальное снижение кинематической вязкости (в среднем на 23%) для всех видов топлива. Дальнейшее изменение кавитационного режима в сторону увеличения перепада давления не приводит к существенному изменению кинематической вязкости моторных топлив (около 2%). Следовательно, для оптимальной работы установки подходит 5 кавитационный режим (рисунок 8).

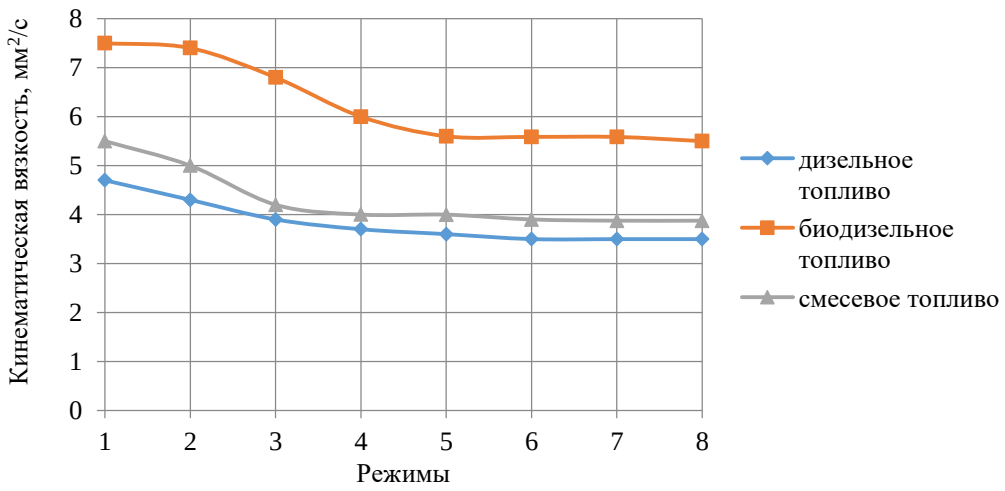


Рисунок 8 – Динамика кинематической вязкости

Заключение. Реализация ультразвукового воздействия в разработанном гидродинамическом ультразвуковом смесителе происходит в докавитационном и кавитационных режимах работы установки. Кавитационные режимы способствуют дроблению длинных углеводородных цепей и тем самым позволяют улучшить основные показатели качества моторного топлива.

Смоделировано течение потоков моторного топлива в акустическом гидродинамическом смесителе. Установлено, наличие областей с различной акустической мощностью. В зависимости от перепада давления для гидродинамического излучателя установлены 8 режимов ультразвукового воздействия. Установлено, что обработку используемого моторного топлива следует проводить на 5 кавитационном режиме работы (перепад давления 2,5 атм).

Список источников

1. Акуличев, В.А. Пульсации кавитационных полостей / В.А. Акуличев // Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Рознеберга.– М.: Наука, 1970.– С. 129–167.

2. Русалин, С.М. Содержательное и математическое представление событий в гидравлической системе с кавитатором и резонатором / С.М. Русалин, В.Л. Юшко, В.В. Кузьмина // Вестник ХПИ. Сборник научных трудов. – 2010. – № 20. – С. 37–45.

3. Иванников, В.И. Кавитация и перспективы ее использования в нефтегазовой отрасли / В.И. Иванников // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2010. – № 3.

4. Хмелев, В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев, О.В. Попова. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.

5. 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. – Т. 333, № 9. – С. 209–218.

6. Яковлев, А.Ю. Численное моделирование и проектирование новых типов движителей / А.Ю. Яковлев // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019, № 1(387). С. 32–50.

7. Мещеряков, А.Г. Исследование работы топливной аппаратуры на смесевом топливе / А. Г. Мещеряков // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции - новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства: Сборник научных докладов XXI Международной научно-практической конференции, Тамбов, 28–29 сентября 2021 года. – Тамбов: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве", 2021. – С. 139-144.

8. Нагорнов, С.А. Работа двигателя на разных видах топлива / С.А. Нагорнов, Р.В. Фокин // Сельский механизатор. – 2008. – № 7. – С. 42-43.

9. Мещеряков, А.Г. Совершенствование комбинированного устройства для получения и активации дизельного смесевого топлива: специальность 05.20.01 "Технологии и средства механизации сельского хозяйства": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мещеряков Александр Геннадьевич, 2022. – 141 с.

10. Романцова, С.В. Улучшение эксплуатационных и экологических свойств дизельного топлива / С.В. Романцова, С.А. Нагорнов // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства, Тамбов, 24 сентября 2013 года / Сборник научных докладов XVII Международной научно-практической конференции. – Тамбов: Издательство Першина Р.В., 2013. – С. 293-297.

References

1. Akulichev, V.A. Pulsations of cavitation bands / V.A. Akulichev // physical foundations of ultrasonic technology. L.D. Rosenberg. – M.: Nauka, 1970. – pp. 129-167.

2. Rusalin, S.M. Meaningful and mathematical representation of events in a hydraulic system with a cavitator and resonator / S.M. Rusalin, V.L. Yushko, V.V. Kuzmina // Bulletin of the KHPI. Collection of scientific papers. 2010. – No. 20. – pp. 37-45.

3. Ivannikov, V.I. Cavitation and prospects of its use in the oil and gas industry / V.I. Ivannikov // construction of oil and gas wells on land and at sea. – 2010. – № 3

4. Khmelev, V.N. Multifunctional ultrasonic devices and their application in conditions of small production, agriculture and household / V.N. Khmelev, O.V. Popova. Barnaul: AltSTU, 1997. 160 P.

5. The current state of the use of cavitation technologies (a brief overview) / A.Y. Radzyuk, E. B. Istyagina,L.V. Kulagina, A.V. Zhuikov // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering. - 2022. – vol. 333, No. 9. – pp. 209-218.

6. Yakovlev, A.Yu. Numerical modeling and design of new types of engines / A.Yu. Yakovlev // proceedings of the Krylov State Scientific Center. – 2019, No. 1(387). pp. 32-50.

7. Meshcheryakov, A.G. Investigation of the operation of fuel equipment on mixed fuel / A. G. Meshcheryakov // Improving the efficiency of the use of resources in the production of agricultural products - new technologies and equipment of a new generation for crop production and animal husbandry: collection of scientific reports of the XXI International Scientific and Practical Conference, Tambov, September 28-29, 2021. - Tambov: Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", 2021. – pp. 139-144.

8. Nagornov, S.A. Engine operation on different types of fuel / S.A. Nagornov, R.V. Fokin // rural mechanizer. – 2008. – No. 7. – pp. 42-43.

9. Meshcheryakov, A.G. Development of a combined device for obtaining and activating diesel mixed fuel: specialty 05.20.01 "technology and means of mechanization agriculture": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Meshcheryakov Alexander Gennadievich, 2022. - 141 p.

10. Romantsova, S.V. Improvement of operational and environmental properties of diesel fuel / S.V. Romantsova, S.A. Nagornov // Improving the efficiency of the use of resources in the production of agricultural products – new technologies and equipment of a new generation for crop and livestock production, Tambov, September 24, 2013 / collection of scientific reports of the XVII International Scientific and Practical Conference. Tambov: Pershin R.V. Publishing House, 2013. pp. 293-297.

Информация об авторах

Ю.В. Мещерякова - кандидат технических наук; С.А. Нагорнов - доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

Yu. Meshcheryakova - Candidate of Technical Sciences; S. Nagornov - Doctor of Technical Sciences, Professor.

Вклад авторов все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the 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): 15.01.2024 Принята к публикации (Accepted): 20.02.2024