Тип статьи: научная
УДК 662.75
DOI: 10.35887/2305-2538-2023-2-17-26

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКОВ МОТОРНОГО ТОПЛИВА В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАМЕРЕ АКТИВАТОРА

Юлия Владимировна Мещерякова [1], Станислав Александрович Нагорнов[2], Екатерина Богдановна Ложкина [3]
[1,2,3]*Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Россия*
[1]yulya-belova@yandex.ru, [2]snagornov@yandex.ru, [3]lozhkina.ekaterina2016@gmail.com

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

Реферат. *Для улучшения качества моторного топлива используются активаторы топлива с наложением полей различной физической природой. Рассмотрен активатор топлива с ультразвуковой обработкой. Работа камеры осуществляется по принципу жидкостного свистка. Основным рабочим элементом ультразвуковой является пластина, изготовленная из коррозионностойкой стали с отполированной поверхностью и сопло. Сопло располагается так, чтобы вытекающая струя моторного топлива симметрично рассекалась пластиной. При пересечении потока моторного топлива пластина возбуждается и колеблется на одной из собственных частот. Она играет роль механического резонатора, управляет работой системы и излучает звук. При введении ультразвуковых колебаний возникает вторичное явление – кавитация, которая влияет на ход процесса обработки и качество конечного продукта. Представлено численное моделирование течения потоков моторного топлива с целью установления параметров излучающей поверхности и рабочего давления, при котором будет происходить кавитация. Установлено, наличие областей с местным понижением давления, увеличением скорости в потоке топлива и усиление акустической мощности, что является признаком акустической гидродинамической кавитации. Для создания кавитации установлены параметры пластины: толщина пластины 1-3 мм, угол заточки 30-40°, отношение ширины пластины к ее длине 1 к 2, расстояние до сопла 0-0,1 мм, подаваемое давление не менее 2 атм. Для создания ультразвуковой гидродинамической акустической развитой кавитации необходимо увеличивать разницу подаваемого давления, например, для стационарного активатора, либо увеличивать количество излучающих поверхностей (пластин) или ставить отражатели (для встроенного активатора).*

Ключевые слова: *моторное топливо, дизельное топливо, активатор, ультразвук, кавитация, моделирование.*

NUMERICAL SIMULATION OF THE FLOW OF MOTOR FUEL FLOWS IN AN ULTRASONIC ACTIVATOR CHAMBER

Yulia Meshcheryakova[1], Stanislav Nagornov [2], Ekaterina Lozhkina [3]
[1,2,3]*All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture, Tambov, Russia*
[1]yulya-belova@yandex.ru, [2]snagornov@yandex.ru, [3]lozhkina.ekaterina2016@gmail.com

Abstract. *To improve the quality of motor fuel, fuel activators with overlapping fields of different physical nature are used. The fuel activator with ultrasonic treatment is considered. The operation of the camera is carried out on the principle of a liquid whistle. The main working element of the ultrasonic is a plate made of corrosion-resistant steel and with a polished surface and a nozzle. The nozzle is positioned so that the flowing jet of motor fuel is symmetrically dissected by the plate. At the intersection of the*

motor fuel flow, the plate is excited and oscillates at one of the natural frequencies. It plays the role of a mechanical resonator, controls the operation of the system and emits sound. When ultrasonic vibrations are introduced, a secondary phenomenon occurs – cavitation, which affects the course of the processing process and the quality of the final product. Numerical simulation of the flow of motor fuel flows is presented in order to determine the parameters of the radiating surface and the operating pressure at which cavitation will occur. It is established that there are areas with a local decrease in pressure in the fluid flow and an increase in acoustic power, which is a sign of acoustic hydrodynamic cavitation. To create cavitation, the parameters of the plate are set: the thickness of the plate is 1-3 mm, the sharpening angle is 30-40 °, the ratio of the width of the plate to its length is 1 to 2, the distance to the nozzle is 0-0.1 mm, the applied pressure is at least 2 atm. To create an ultrasonic hydrodynamic acoustic developed cavitation, it is necessary to increase the difference in the applied pressure, for example, for a stationary activator, or increase the number of radiating surfaces (plates) or install reflectors (for a built-in activator).

Keywords: *motor fuel, diesel fuel, activator, ultrasound, cavitation, modeling*.

Для цитирования: Мещерякова Ю.В., Нагорнов С.А., Ложкина Е.Б. Численное моделирование течения потоков моторного топлива в ультразвуковой камере активатора// Наука в Центральной России. 2023. Т. 62, № 2. С. 17-26. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-17-26.

For citation: Mesheryakova Y, Nagornov S., Lozhkina E. Numerical simulation of the flow of motor fuel flows in an ultrasonic activator chamber. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 62(2): 17-26. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-2-17-26.

Введение. Физико-химическая обработка с наложением ультразвуковых колебаний оказывает положительное влияние на качество моторного топлива: биодизельного топлива, товарного дизельного топлива и дизельного смесевого топлива, ультразвук способствует ускорению процесса синтеза биодизельного топлива [1, 2].

Проведенные исследования показали, что при введении ультразвуковых колебаний в обрабатываемые среды возникают вторичные явления, влияющие на ход процесса и качество конечного продукта. При небольшом значении амплитуды ультразвука возникает явление – акустическое истечение, которое перемещает и перемешивает обрабатываемую жидкость. По мере увеличения амплитуды все более явно прослеживается кавитация. Возникновение схлопывающихся пузырьков внутри, которых высокие температура и давления являются признаком кавитации.

Известно, что наряду с процессом [3,4] кавитации возникает ряд физических процессов, перечисленных на рисунке 1. Все эти физические явления и процессы способны изменять структуру и свойства, обрабатываемого топлива.

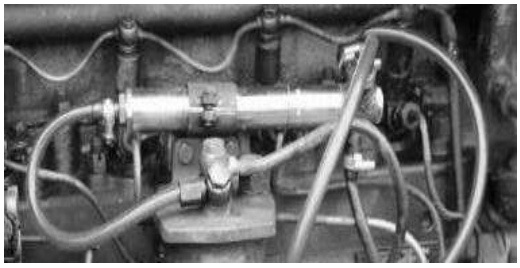
Рисунок 1 – Физические процессы, возникающие при кавитации

Авторами представлено [5,6] объяснение физико-химических кавитационных процессов, происходящих в динамическом активаторе моторного топлива. Утверждается, что, при обработке моторного топлива за счет происходящих кавитационных процессов повышается степень дисперсности частиц остаточных фракций, разрушаются конгломераты продуктов полимеризации. Под воздействием процесса кавитации в вязких топливах углеводородные молекулы расщепляются на более легкие, активные радикалы, обусловливающие улучшение основных качественных характеристик углеводородного топлива. При этом энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, используется для разрыва химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений.

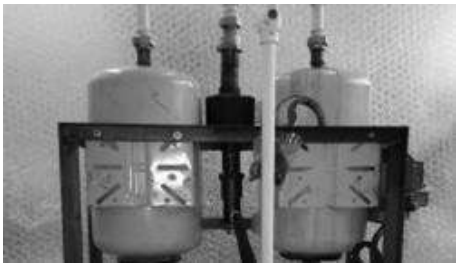
Таким образом, при обработке моторного топлива следует учесть такое явление как кавитация, которая способна вызвать деструкцию молекул. В результате протекания кавитации и сопутствующих ее явлений в моторном топливе накапливаются «обработанные» частицы: радикалы, ионы, ионно-радикальные образования, которые активно атакуют как другие радикалы, так и нейтральные частицы.

В связи с этим целью данного исследования является установление параметров излучающей поверхности и рабочего давления, при котором будет происходить кавитация в активаторе топлива с использованием численного моделирования течения потоков моторного топлива.

Материалы и методы. Моделирование течения потоков дизельного топлива в ультразвуковой камере комбинированного смесителя осуществляли в прикладной графической программе SolidWorks Flow Simulation. В качестве исследуемой модели выступает ультразвуковая камера комбинированного активатора, которая может быть встроена в топливную аппаратуру трактора или использоваться стационарно (рисунок 2).



а) активатор встроенный

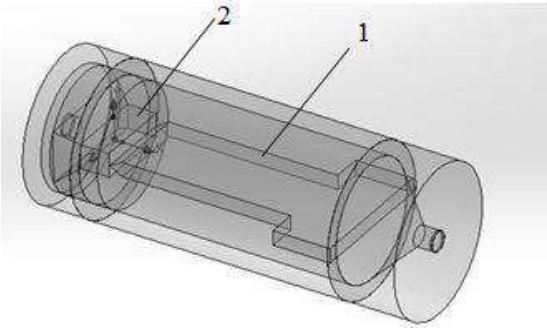


б) активатор стационарный

Рисунок 2 – Комбинированный активатор топлива

Основные этапы моделирования включают: разработка 3d модели (рисунок 3), создание сетки расчетной области, определение граничных условий, визуализация давления, скорости и т.д.

Текучей средой является моторное топливо: дизельное, биодизельное и смесевое топливо. Создана база данных со свойствами исследуемого моторного топлива (плотности, кинематической вязкости, теплопроводности в зависимости от температуры). Под биодизельным топливом в данном примере подразумевается метиловый эфир рыжикового масла, полученный реакцией переэтерифиацией рыжикового масла в присутствии гомогенного катализатора. Под смесевым дизельным топливом – топливо, полученное смешением дизельного и биодизельного топлив в различном процентном соотношении. Граничными условиями выбрано давление, создаваемое и давление на выходе из активатора. Инженерная цель в данном расчете – является усредненное давление в исследуемой камере. Инженерная цель используется для параметров контроля, для получения дополнительной информации, о том какие процессы происходят в исследуемой модели и не оказывают влияния на другие результаты и время расчета.



1 - пластина; 2 - сопло.

Рисунок 3 – Внешний вид 3d модели ультразвуковой камеры

В качестве стартовой и конечной точек выбраны штуцера для ввода и вывода топлива. Расчет течения исследуемой жидкости в исследуемой модели осуществляется решением известных дифференциальных уравнений движения, неразрывности, энергии.

На рисунке 4 представлен внешний вид диалогового окна наблюдения за расчетом. На верхних рисунках представлено предварительное распределение давления (вид сбоку, вид сверху) по всей камере в определенный промежуток времени. Ниже на кривой отображается изменение выбранной инженерной цели во времени, а также сходимости цели, выраженная в процентах. Значение сходимости цели является приблизительным и со временем, как правило, увеличивается.

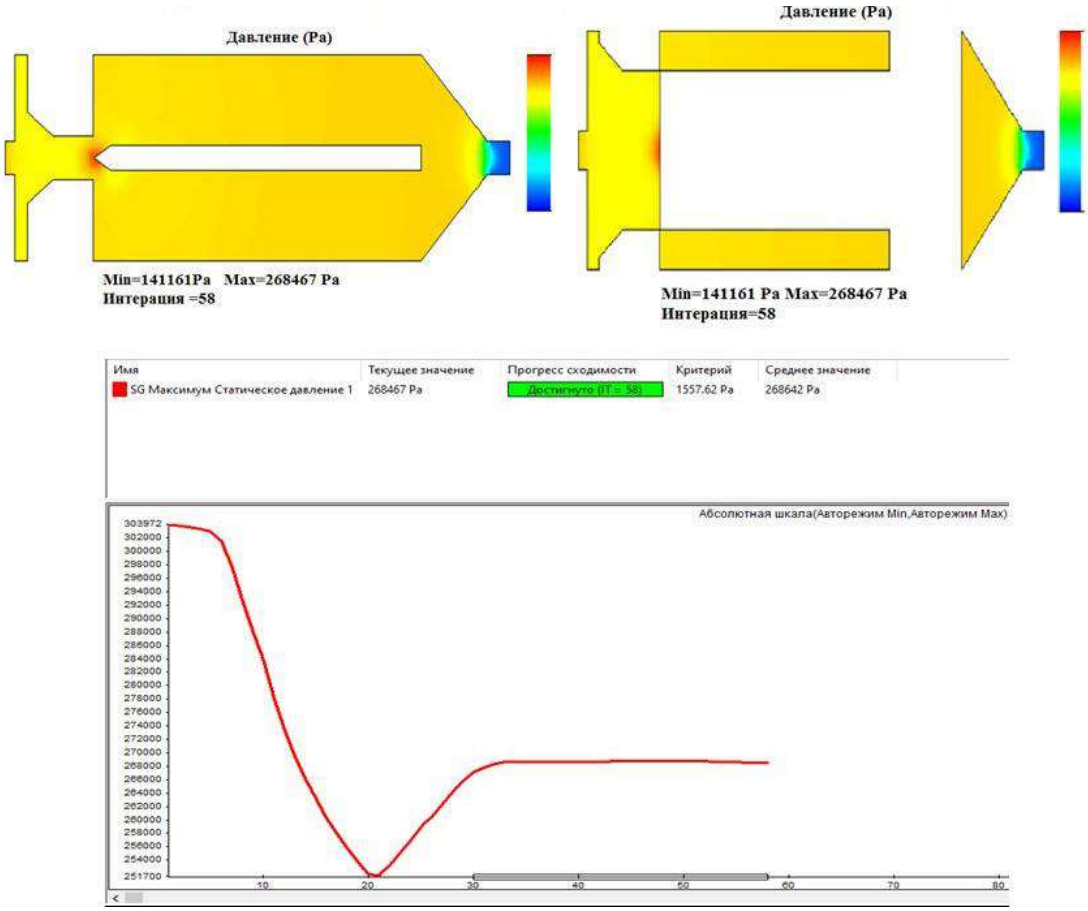


Рисунок 4 – Внешний вид диалогового окна наблюдения за расчетом

Результаты и их обсуждение. Кавитационную ультразвуковую гидродинамическую обработку дизельного топлива осуществляли в активаторе топлива (рисунок 2,3), которая приводит к изменению структуры топлива и дает возможность контролировать его состав. Устройство может использоваться как стационарно, так и быть встроено в сельскохозяйственную технику.

Гидродинамические излучатели с пластинчатым колебательным элементом используются с еще 60 –х годов прошлого столетия в различных технологических процессах. Однако изучение и развитие процесса кавитации в них еще мало изучены.

Основным рабочим элементом ультразвуковой камеры (рисунок 3) является пластина, изготовленная из коррозионностойкой стали и с отполированной поверхностью и сопло. Сопло располагается так, чтобы вытекающая струя топлива симметрично рассекалась пластиной. При пересечении потока дизельного топлива пластина возбуждается и колеблется на одной из собственных частот. Она играет роль механического резонатора, управляет работой системы и излучает звук. Используются пластины разной конфигурации и различными способами крепления. В нашем случае пластина имеет заостренный край, колеблющаяся часть пластины имеет одинаковую ширину.

Основная часть расчета пластин это определение частот их собственных колебаний по известным формулам в зависимости от конфигурации. Параметры пластины играют основную роль в образовании ультразвуковых акустических колебаний. С помощью программы смоделирован частотный анализ колебания ультразвуковой пластины с разными параметрами с наложением внешней нагрузки давления исследуемого топлива.

На рисунке 5 -7 показана модель и зависимость собственных колебаний исследуемой пластины разной длины с различным типом крепления

Рисунок 5 – Скриншоты расчета частотного анализа колебания ультразвуковой пластины

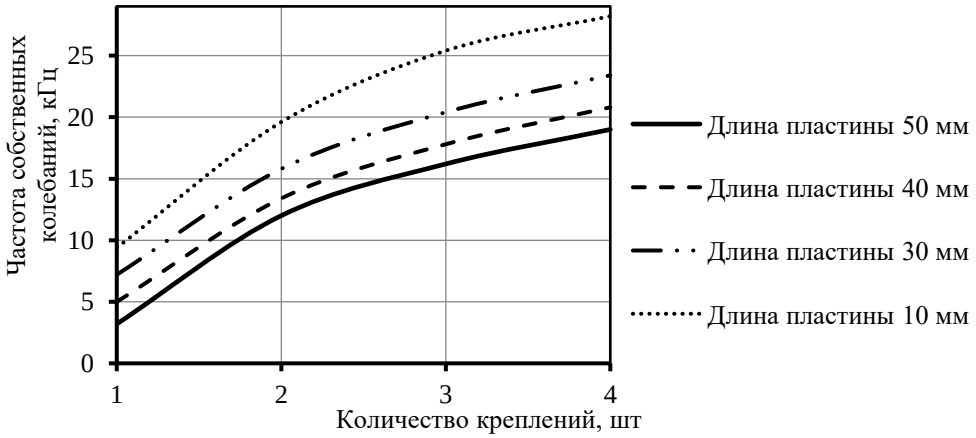


Рисунок 6 – Динамика изменения частоты колебаний пластины

При увеличении длины колебательной части пластины уменьшается частота ее колебаний. В резонанс вступает короткая пластинка при большей частоте, а длинная пластинка при меньшей. Для создания колебаний более высокой частоты необходимо максимально укорачивать пластину. Чем жёстче закреплена пластина, тем выше частота ее колебаний.

В то же время на частоту колебаний пластины оказывает ее ширина. На рисунке 7 представлено влияние параметров (длины и ширины) на частоту колебаний пластины.

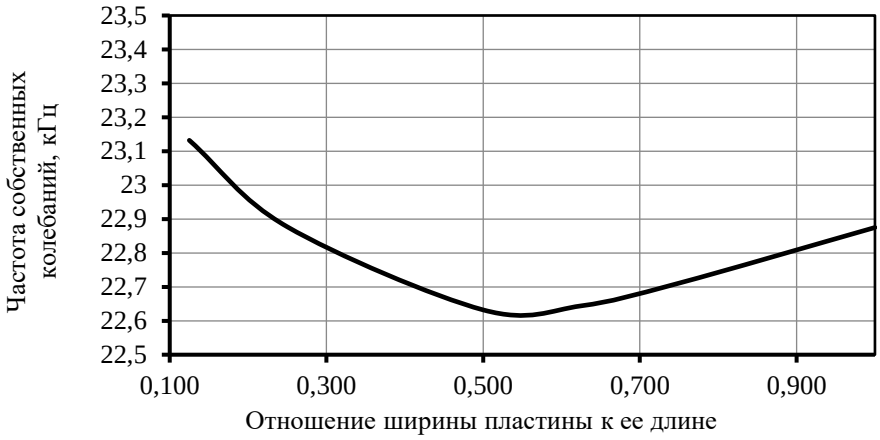


Рисунок 7 – Динамика изменения частоты колебаний от параметров пластины

По оси *x* отмечено отношение ширины к длине пластины. Использовать пластину с шириной больше половины ее длины представляется затруднительным. Более выгодно использовать пластину узкую и длинную, однако в этом случае велика вероятность быстрого выхода ее из строя. Установлено, что ширина пластины должна быть меньше или равна половине ее длины.

На рисунках 8 - 9 показано изменение перепада давления в зависимости от толщины пластины, от расстояния между соплом и пластиной соответственно. При увеличении толщины пластины уменьшается расстояние между пластиной и соплом и как следствие увеличивается скорость и уменьшается давление, тем самым разность давлений увеличивается.

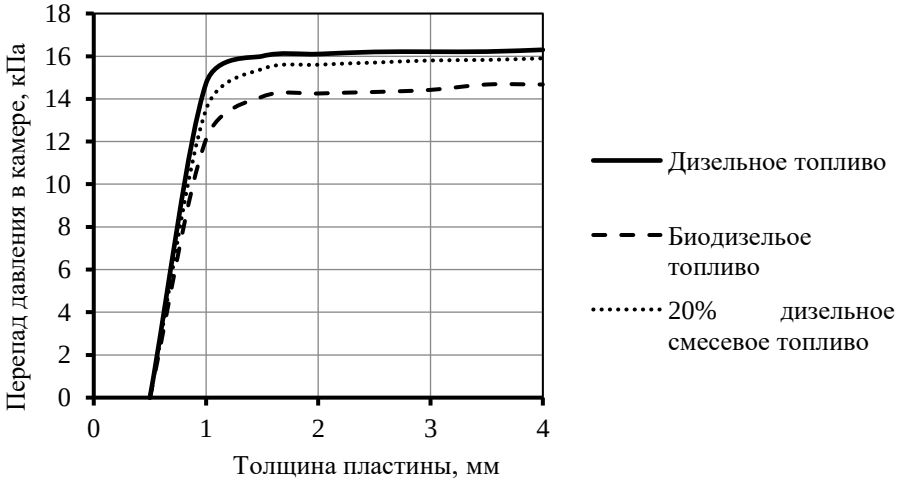


Рисунок 8 – Динамика перепада давления в зависимости от толщины пластины

Установлено, что толщина пластины должна изменяться от 1 до 3 мм. Если толщина менее 1 мм, то пластина очень тонкая, и она сломается и выйдет из строя. Если толщина более 3 мм, то подкачивающему насосу тракторного двигателя возбудить колебания для дизельного топлива

будет не возможно, а использовать насос с более высоким напором в этом случае не представляется возможным.

Угол заточки пластины должен варьировать в пределах 30° - 40°. При меньших значениях угла заточки развивается малая подъемная сила, а при больших увеличивается торможение потока.

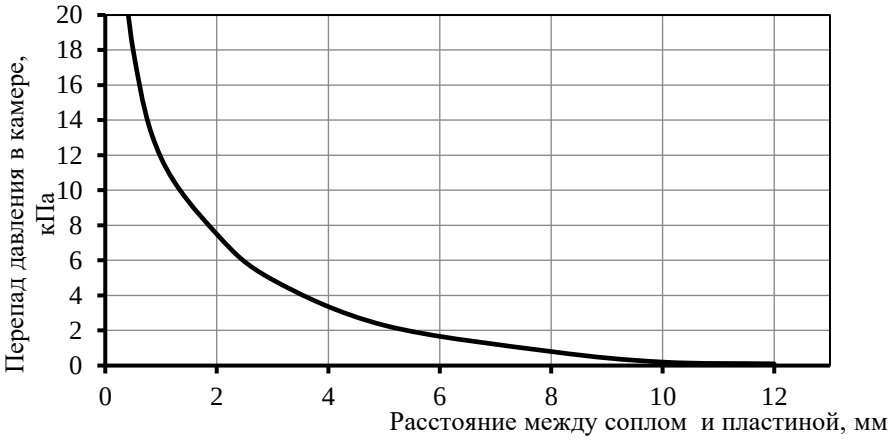


Рисунок 9 – Динамика перепада давления в зависимости от расстояния между соплом и пластиной

В зависимости от выбранной пластины, выбираем параметры сопла, ширина сопла должна быть меньше или равна толщине пластины. Площадь сечения сопла ограничена подаваемым давлением подкачивающего насоса. Одним из важных параметров в распределении потоков является расстояние между соплом и пластиной.

Установлено, что чем ближе расположена пластина к соплу, тем больше увеличивается зона с перепадом давления. В связи с этим пластину необходимо максимально расположить к соплу. Перепад давления уменьшается по мере удаления пластины от сопла и на расстоянии в половину длины пластины совсем прекращается.

Проведено численное моделирование течения потоков топлива в ультразвуковой камере при выбранной геометрии ультразвуковой пластины и сопла, а также подаваемом давлении. На рисунке 10-11 при заданных параметрах визуально показано распределение давления, скорости, уровня акустической мощности в ультразвуковой камере активатора при оптимальных подобранных параметрах, а на рисунке 12 с произвольно выбранными параметрами. На рисунке 12 нет перепада в давлении и скорости потока.

При протекании через суживающийся участок канала скорость потока возрастает, при этом давление снижается (рисунок 10-11).

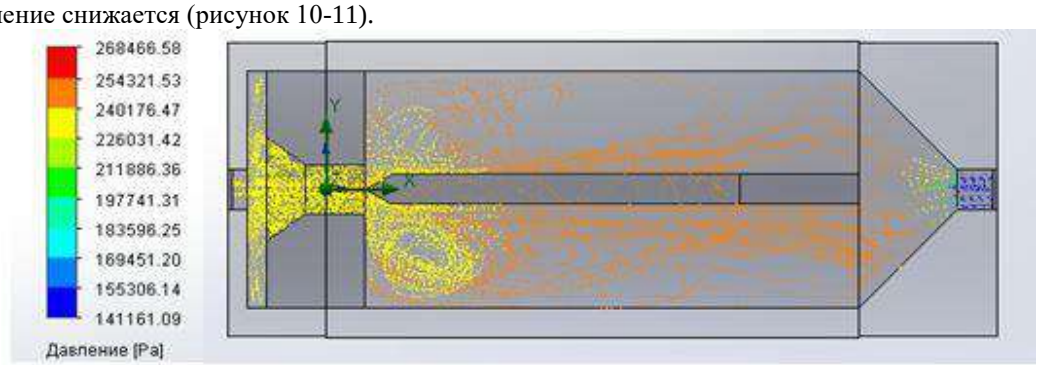


Рисунок 10 – Скриншот расчета распределения давления с оптимальными параметрами

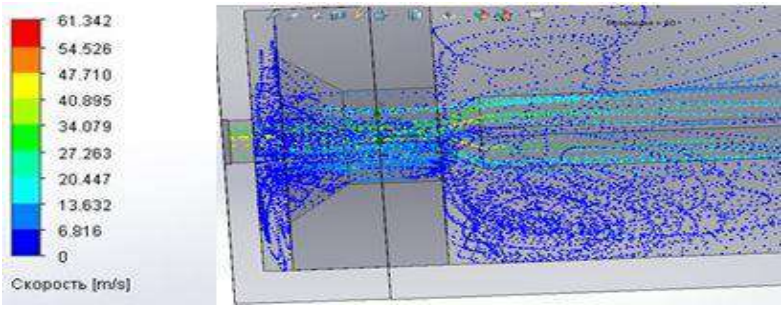


Рисунок 11 – Скриншот расчета распределения скорости потока

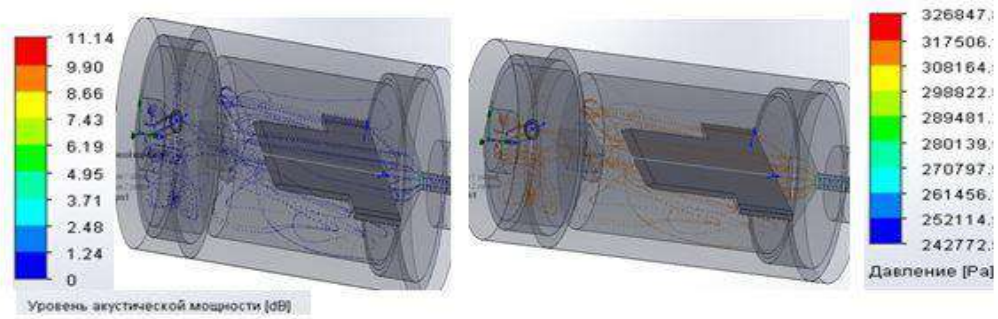


Рисунок 12 – Скриншоты расчета распределения давления и уровня акустической мощности с произвольно выбранными параметрами

На расширяющемся участке происходят обратные процессы уменьшения скорости течения, возрастания давления, что может свидетельствовать о возникновении явления кавитации (образование газовоздушных пузырьков), которая и способствует интенсификации и активации исследуемого топлива.

Другим подтверждением наличия явления кавитации в гидродинамических акустических исследованиях является образование гидравлического шума. Предположительно возникновение шума является результатом процесса схлопывания каверн. Анализ рисунка 13 показывает возникновение шума порядка 44 - 65 Дб при заданных условиях, а на 12 рисунке гидравлический шум отсутствует.

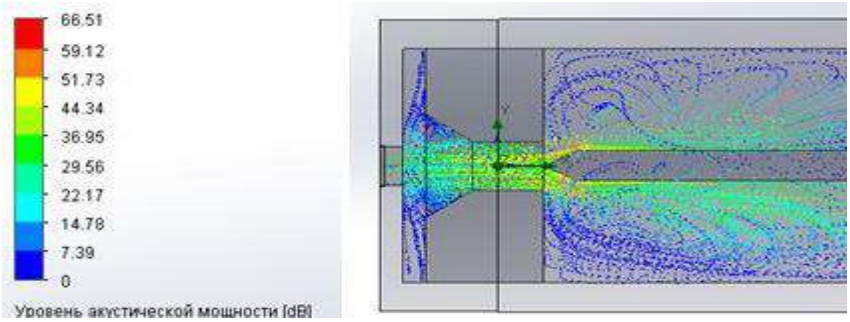


Рисунок 13 – Скриншот программы распределения акустической мощности

Замечено, что характер распределения акустики и давления неравномерный. Акустическая мощность возникает в основном в области заостренной части пластины. В исследуемом объеме можно выделить зоны с разной акустической мощностью: 1 (51-66 дБ) – красная зона, зона развитой акустической мощности, происходит местное повышение скорости течения и значительное усиление шума, зона расположена вблизи заостренной части пластины; 2 (36-51 дБ) – желто-зеленая зона, зона зарождающейся акустической мощности, слабое усиление шума; 3 (14-

36дБ) – бирюзовая зона, зона вырождающейся акустической мощности, шум еле слышен; 4 (14-0дБ) – синяя зона, зона отсутствия акустической мощности, шум стихает.

Зона развитой кавитации при заданных параметрах не значительна. При увеличении перепада подаваемого давления зона развитой кавитации увеличивается. Однако реализация более выраженной зоны развитой кавитации за счет увеличения разницы давления во встроенном активаторе в топливную аппаратуру не представляется возможным.

Заключение. Таким образом, проведено численное моделирование течения потоков моторного топлива в ультразвуковой камере активатора топлива. Установлено, наличие областей с местным понижением давления в потоке жидкости и усиление акустической мощности, что является признаком акустической гидродинамической кавитации. Для создания кавитации установлены параметры пластины: толщина пластины 1-3 мм, угол заточки 30-40°, отношение ширины пластины к ее длине 1 к 2, расстояние до сопла 0-0,1 мм, подаваемое давление не менее 2 атм. Для создания ультразвуковой гидродинамической акустической развитой кавитации необходимо увеличивать разницу подаваемого давления, например, для стационарного активатора, либо увеличивать количество излучающих поверхностей (пластин) или ставить отражатели (для встроенного активатора).

Список источников

1. 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.

2. Воробьев Ю.В., Дунаев А.В. Активация моторных топлив // Автомобильная промышленность. – 2018. – № 9. – С. 28-32.

3. 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. № 020. С. 37-45.

4. Фридман, В.М. Ультразвуковая химическая аппаратура / В.М. Фридман - М.: Машиностроение, 1967. - 234 с.

5. Руденко, М.Г. Кавитация и фазовые превращения в условиях термодинамической неравновесности жидкости: специальность 01.04.14 "Теплофизика и теоретическая теплотехника" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Руденко Михаил Георгиевич. – Улан-Удэ, 2011. – 36 с.

Ломовских, А. Е. Физико-химическое представление кавитационных процессов, происходящих в динамическом активаторе моторного топлива / А. Е. Ломовских, А. А. Шаповалов, О. Н. Морозова // – 2017. – № 6(14). – С. 132-136.

References

1. Meshcheryakov, A. G. Investigation of the operation of fuel equipment on mixed fuel / A. G. Meshcheryakov // Improving the efficiency of resource use 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 Research Institute for the Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture", 2021. – pp. 139-144.

2. Vorobyev Yu.V., Dunaev A.V. Activation of motor fuels // Automotive industry. - 2018. – No. 9. – pp. 28-32.

3. Rusalin S.M. Meaningful and mathematical representation of events in a hydraulic system with cavitator and resonator / S.M. Rusalin, V.L. Yushko, V.V. Kuzmina // Bulletin of the KhPI. Collection of scientific papers. 2010. No. 020. pp. 37-45.

4. Friedman, V.M. Ultrasonic chemical equipment / V.M. Friedman - M.: Mechanical Engineering, 1967. - 234 p.

5. Rudenko, M. G. Cavitation and phase transformations under conditions of thermodynamic disequilibrium of a liquid: specialty 01.04.14 "Thermophysics and theoretical heat engineering" : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Rudenko Mikhail Georgievich. – Ulan-Ude, 2011. – 36 p.

6. Lomovskikh, A. E. Physico-chemical representation of cavitation processes occurring in a dynamic motor fuel activator / A. E. Lomovskikh, A. A. Shapovalov, O. N. Morozova // – 2017. – № 6(14). – Pp. 132-136.

Информация об авторах

С.А. Нагорнов - доктор технических наук, профессор; Ю.В. Мещерякова - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Ложкина Е.Б. – аспирант, младший научный сотрудник.

Information about the authors

S. Nagornov - Doctor of Technical Sciences, Professor; Yu. Meshcheryakova - Candidate of Technical Sciences, Senior Lozhkina E. - postgraduate student, junior researcher.

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): 28.03.2023 Принята к публикации (Accepted): 24.04.2023