

Луговской А. Ф.  
Мовчанюк А. В.  
Пыжиков Ю. А.  
Назарова О. И.

НТУ Украины  
«Киевский  
политехнический  
институт»

УДК 621.647.23

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ФИЛЬТР ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВА

*В статті розглядаються окремі питання підвищення ефективності технології виробництва біопалива. Обґрунтована необхідність застосування в технологічному процесі виробництва біопалива ультразвукових фільтрів, які здатні постійно регенеруватися при засміченні під впливом кавітаційного середовища. Розглянуті принципи побудови ультразвукових фільтрів. Наведено пояснення переваг ультразвукових фільтрів та показана конструкція одного з варіантів ультразвукового фільтра.*

*The article covers certain issues of efficiency boosting in biofuel production techniques. The necessity of application of ultrasonic filters in technological process of biofuel production has been substantiated. When polluted they are subject to constant regeneration in cavitation environment. The principles of construction of ultrasonic filters have been set down. The benefits of ultrasonic filters have been provided and the construction of one of their types illustrated.*

### Введение.

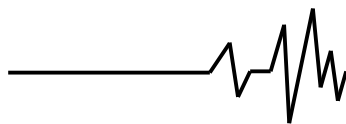
Проблема поиска новых источников энергии становится все более актуальной. Одним из направлений развития современной энергетики является разработка технологий и оборудования для производства экологически чистых биологических топлив и, в частности, так называемого, биодизеля [1]. Биодизель - это метиловый эфир, обладающий свойствами горючего материала и получаемый в результате химической реакции из растительных жиров. Помимо относительно высокого цетанового числа биотопливо имеет и ряд других полезных свойств: растительное происхождение, «биологическая безвредность», меньше выбросов  $\text{CO}_2$ , относительно "чистое" топливо, малое содержание серы, хорошие смазочные характеристики, увеличение срока службы двигателя и высокая температура воспламенения [2]. Биодизель, соответствующий европейскому стандарту EN 14214, являющийся аналогом E590, представляет собой продукт алкоголиза высокомолекулярных жиров, входящих в состав различных растительных масел и животных жиров. [1]. Для получения биодизеля используют любые виды растительных масел — подсолнечное, рапсовое, льняное и т.д. При этом биодизель полученный из разных масел имеет некоторые отличия. Так, например

пальмовый биодизель имеет наибольшую калорийность, но и самую высокую температуру фильтруемости и застывания. Рапсовый биодизель несколько уступает пальмовому по калорийности, но лучше переносит холод, потому более всего подходит для европейских стран и Украины.

Процесс производства биодизеля достаточно прост и заключается в уменьшении различными способами вязкости растительного масла. Любое растительное масло — это смесь триглицеридов, т. е. эфиров, соединенных с молекулой глицерина с- трехатомным спиртом ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ). Именно глицерин придает вязкость и плотность растительному маслу. Задача при производстве биодизеля - удалить глицерин, заместив его на спирт. Этот процесс называется трансэтерификацией.

Из одной тонны растительного масла и 111 кг спирта (в присутствии 12 кг катализатора) получается приблизительно 970 кг (1100 л) биодизеля и 153 кг первичного глицерина [3].

В производстве чаще всего применяют метиловый спирт, а в качестве исходного сырья могут быть использованы различные растительные масла - рапсовое, соевое, подсолнечное, конопляное, хлопковое, арахисовое, пальмовое, хлопковое, льняное, кокосовое, кукурузное, горчичное, касторовое, кунжутное, отработанные масла



(использованные, например, при приготовлении пищи), а также животные жиры [1].

Исходным сырьем при производстве биодизеля могут служить и многие виды водорослей. Известно [3], что водоросли содержат до 50% масел, пригодных для производства биодизельного топлива.

Биодизель имеет целый ряд преимуществ: не содержит молекулярной серы и поэтому при сгорании он гораздо более экологичен, чем традиционное углеводородное топливо. К тому же, его цетановое число равно 51, что на 6-9 единиц выше, чем у нефтяного дизельного топлива, что не требует дополнительных стимуляторов воспламенения при запуске двигателя. Параллельно, использование биодизеля значительно увеличивает срок службы двигателя и топливного насоса (до 60% от номинированного ресурса), поскольку это горючее обладает отличными трибоническими свойствами. Дополнительным плюсом биологического дизеля является его полная биологическая утилизация при попадании в естественную среду, что исключает катастрофические последствия, часто имеющие место при разливе нефтепродуктов. Технология изготовления биодизеля довольно проста и доступна в условиях любого предприятия или фермерского хозяйства [2].

Сейчас мировая энергетика всего за один год расходует объем нефти, на образование которого природе понадобился примерно миллион лет. После того, как ученые научились сокращать исторический срок превращения до нескольких часов, начался бум альтернативной энергетики. Сегодня в Бразилии на «отходах тростника» не только ездят 40% автомобилей, но и летают самолёты. В Дании 90% необходимой стране энергии добывается за счёт переработки биомассы. США готовы заменить биотопливом до 30% импортируемой нефти.

В процессе производства биотоплива, с целью ускорения химической реакции, масло нагревается до определенной температуры и в него добавляется смесь катализатора и спирта. Некоторое время смесь перемешивается и отстаивается. В результате успешной реакции смесь должна расслоиться, образуя биодизель в верхнем слое, затем слой, содержащий много мыла и на дне остается глицерин. Глицерин и мыльный слой затем отделяются, а биодизель промывается различными способами для удаления остатков мыла, катализатора и других возможных примесей. После промывок он обезвоживается для удаления остатков

воды. При обычной температуре реакция проходит очень медленно или совсем не идет. Нагревание, также как использование кислоты (основания) просто способствует ускорению реакции. Химия процесса одинакова как при работе с небольшими объемами в гараже, так и на больших промышленных мощностях.

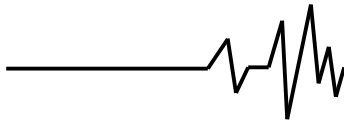
При использовании отработанных растительных масел, необходима фильтрация сырья для удаления возможных примесей. Также важно удаление возможной воды для предотвращения гидролиза триглицеридов и образования солей жирных кислот вместо реакции трансэтерификации и образования биодизеля [4].

Важную роль в технологическом процессе производства биотоплива играет операция фильтрования готового биодизеля. Фильтрование с использованием металлических пластин или иных традиционных сетчатых или пористых фильтроэлементов имеет ряд недостатков, главный из которых – очень короткое время рабочего цикла фильтрования, вызванное быстрой засоряемостью фильтроэлементов тонкой фильтрации. Проблемой является и последующая регенерация отработанных фильтроэлементов.

Качество полученного продукта определяется визуально и путем измерения pH. Кислотность должна быть нейтральной и лежать в пределах 7,0. На вид конечный продукт должен выглядеть как чистое подсолнечное масло. Не допускается наличие никаких взвесей, примесей, частиц или замутнений. Мутность означает присутствие воды, которая удаляется нагреванием. Взвешенные частицы необходимо отфильтровать с тонкостью фильтрации 5 мкм.

Существует множество различных технологий первичной очистки масла с помощью адсорбентов. Также используются различные адсорбенты при очистке (промывке) готового биодизеля. Необходимо обеспечить и фильтрование воды после промывки биодизеля. При этом из воды необходимо удалить типичные загрязнители- спирты, кетоны, альдегиды, амины и аммиак, пестициды и гербициды, хлорорганические соединения, фенолы и масла, SO<sub>2</sub>, углеводороды, летучие соединения, сероводород, меркаптаны и промышленные растворители, а также другие загрязнители. После прохождения воды через фильтр возможно ее повторное использование или сброс в канализацию.

Можно сформулировать основные требования к фильтру для работы в



технологическом процессе производства биотоплива:

- высокая степень фильтрации, большая производительность, способность регенерации после демонтажа или автоматической регенерации во время работы;
- высокая термостойкость фильтроэлемента;
- химическая стойкость фильтроэлемента. Фильтр должен длительное время работать при воздействии таких химических веществ, как растворители, кислоты и щелочные растворы.

Большинство традиционных фильтров указанным требованиям не удовлетворяют.

Однако известны фильтры, использующие при работе особенности распространения в жидкости ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Фильтрование в условиях ультразвукового поля позволяет создать саморегенерирующиеся фильтры тонкой очистки, позволяющие повысить качество конечного продукта в технологическом процессе производства биотоплива.

**Целью статьи** является рассмотрение основных принципов построения ультразвуковых саморегенерирующихся фильтров и возможности их практической реализации для технологического процесса производства биотоплива.

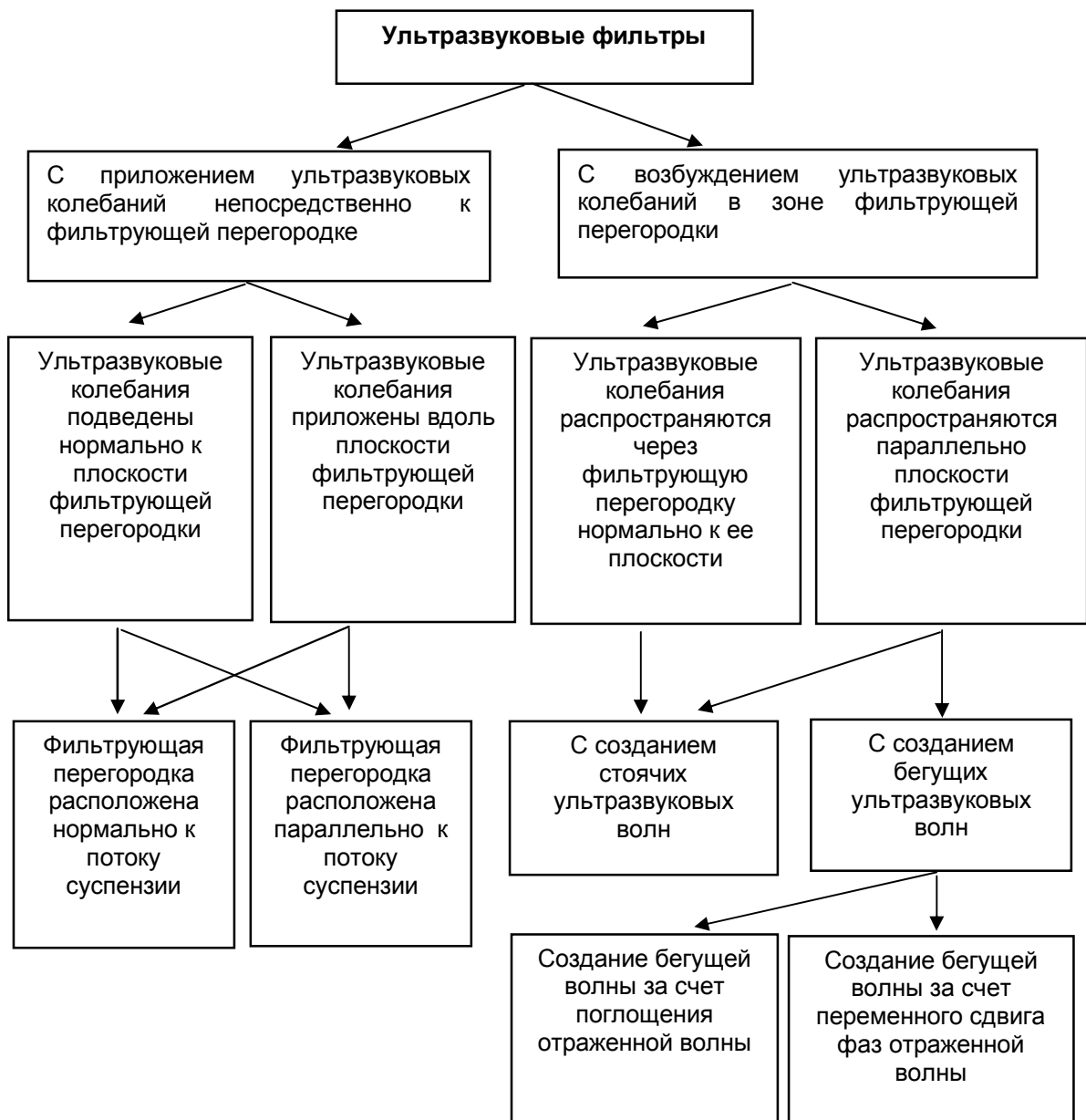
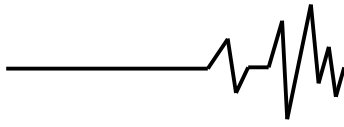


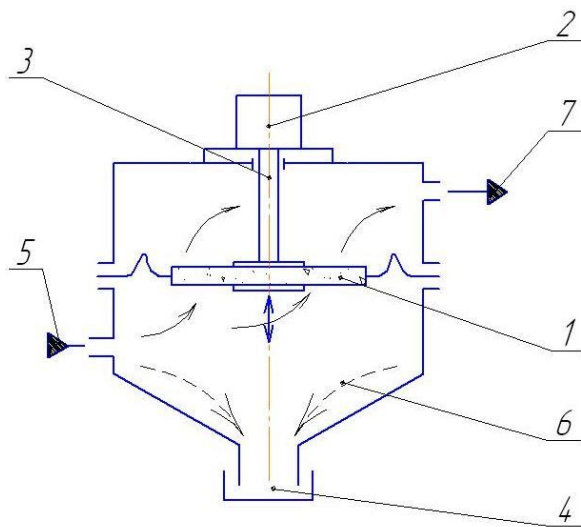
Рис. 1. Классификация ультразвуковых фильтров

**Основная часть.**

Основные принципы построения ультразвуковых фильтров могут быть классифицированы в соответствии со схемой на рис. 1 [5].

Прежде всего, в конструкциях ультразвуковых фильтров известны два способа подвода ультразвуковой энергии в зону фильтрования – путем приложения ультразвуковых колебаний непосредственно к фильтрующей перегородке и путем возбуждения ультразвуковых колебаний в зоне фильтрующей перегородки.

Согласно первому способу ультразвуковые колебания могут быть приложены непосредственно к фильтрующей перегородке нормально к ее плоскости или вдоль плоскости перегородки. При этом известны конструкции, в которых плоскость вибрирующей перегородки расположена нормально к потоку фильтрата (рис. 1) и конструкции, в которых плоскость вибрирующей перегородки параллельна потоку фильтрата (рис. 2).



**Рис. 2. Ультразвуковой фильтр с фильтрующей перегородкой, расположенной нормально к потоку суспензии. Ультразвуковые колебания подведены нормально к плоскости фильтрующей перегородки (1 – фильтрующая перегородка; 2 – магнитострикционный вибратор продольных колебаний; 3 - волновод; 4 - грязесборник; 5 – подвод фильтрата; 6 – направление осаждения загрязнителя; 7 – отвод фильтрата)**

Первый вариант представляет собой

реализацию полнопоточного фильтра с периодической очисткой грязесборника. Во втором варианте поток суспензии непрерывно уносит с собой взвешенные частички загрязнителя, которые концентрируются возле фильтрующей перегородки.

В обоих случаях фильтрующая перегородка может быть выполнена как в виде туго натянутой на каркасе металлической мелкоячеистой сетки, так и в виде пластины из твердого микропористого материала, например, металлокерамического.

В рассмотренных вариантах фильтрующая перегородка, колеблющаяся с ультразвуковой частотой, воздействует на частички загрязнителя через жидкость, создавая перед собой звуковой барьер, который препятствует движению частиц загрязнителя через перегородку. Кроме того, возникающая вблизи поверхности перегородки кавитационная прослойка, приводящая вследствие схлопывания кавитационных пузырьков, к хаотическому ускоренному движению частиц загрязнителя, снижает вероятность их проникновения через поры перегородки, а также осуществляет непрерывную очистку пор фильтрующей перегородки. В результате при неизменной пористости перегородки в несколько раз повышается тонкость фильтрации. Микроколебания сжатия-растяжения стенок капилляров фильтрующей перегородки, на которую наложены ультразвуковые колебания, приводят к резкому уменьшению толщины облитерационного слоя и, соответственно, снижению гидравлического сопротивления фильтрующей перегородки.

Кавитационная область вблизи перегородки приводит также к возникновению звукокапиллярного эффекта и, как следствие, к аномальному увеличению скорости течения жидкости по капиллярам. Этому же способствуют и потоки Рэлея - Экарта и микропотоки, скорость которых может достигать нескольких метров в секунду. Приграничный слой, возникающий при акустических потоках, существенно меньше, чем при обычных гидродинамических течениях. Все это обеспечивает повышенную производительность ультразвуковых фильтров по сравнению с традиционными технологиями фильтрования.

В ультразвуковых фильтрах с сетчатой фильтрующей перегородкой ультразвуковые колебания подводят нормально к плоскости перегородки с помощью магнитострикционных вибраторов продольных колебаний, работающих на частоте порядка 20 кГц (рис. 2,

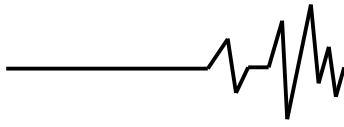
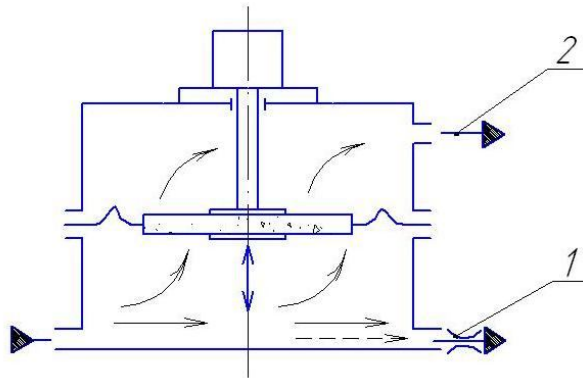
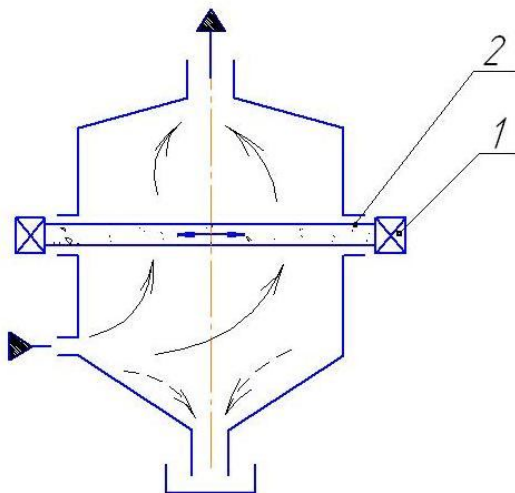


рис. 3). При выполнении фильтрующей перегородки из объемного твердого микропористого материала ультразвуковые колебания могут быть подведены как нормально к плоскости фильтрующей перегородки, так и параллельно ее плоскости, т.е. к торцевой поверхности перегородки (рис. 4). При этом могут быть использованы пьезоэлектрические преобразователи продольных и радиальных колебаний, работающие в диапазоне 20... 100 кГц.



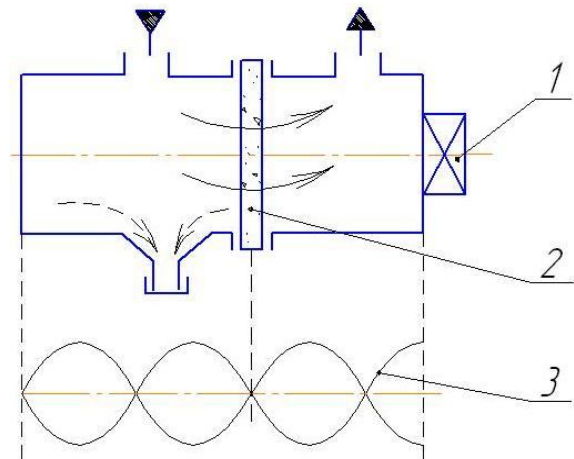
**Рис. 3. Ультразвуковой фильтр с фильтрующей перегородкой, расположенной параллельно потоку суспензии. Ультразвуковые колебания подведены нормально к плоскости фильтрующей перегородки (1 - дроссель для создания в фильтре внутреннего давления; 2 - отвод фильтра)**



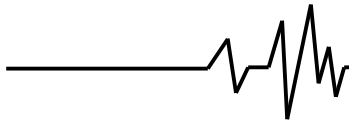
**Рис. 4. Ультразвуковой фильтр с колебаниями, приложенными вдоль плоскости фильтрующей перегородки (1 - пьезоэлектрический преобразователь; 2 - микропористая фильтрующая перегородка)**

Другой способ подвода ультразвуковой энергии, заключающийся в возбуждении ультразвуковых колебаний в зоне фильтрующей перегородки, также имеет несколько вариантов реализации. При этом способе ультразвуковые колебания могут распространяться в жидкости сквозь фильтрующую перегородку нормально к ее поверхности (рис. 5) или параллельно фильтрующей перегородке (рис.6 а, рис.6 б).

В первом случае магнитострикционный или пьезоэлектрический излучатель обычно размещают со стороны очищенной жидкости, а фильтрующую перегородку, с целью снижения ее влияния на распространение волн, размещают в узловой точке стоячей волны. Возможность образования в объеме фильтра стоячей ультразвуковой волны обеспечивается соответствующими резонансными размерами и геометрией внутренней полости фильтра. В таком фильтре стенку, расположенную напротив излучателя, выполняют плоской и параллельной поверхности излучателя. Мелкие частички загрязнителя концентрируются в местах пониженного давления, т.е. в пучностях стоячей ультразвуковой волны, образуя, параллельные плоскости фильтрующей перегородки, слои повышенной концентрации загрязнителя, в которых происходит коагуляция. Вследствие коагуляции слипшиеся частички загрязнителя теряют возможность проникновения сквозь поры фильтрующей перегородки и осаждаются в грязесборник.

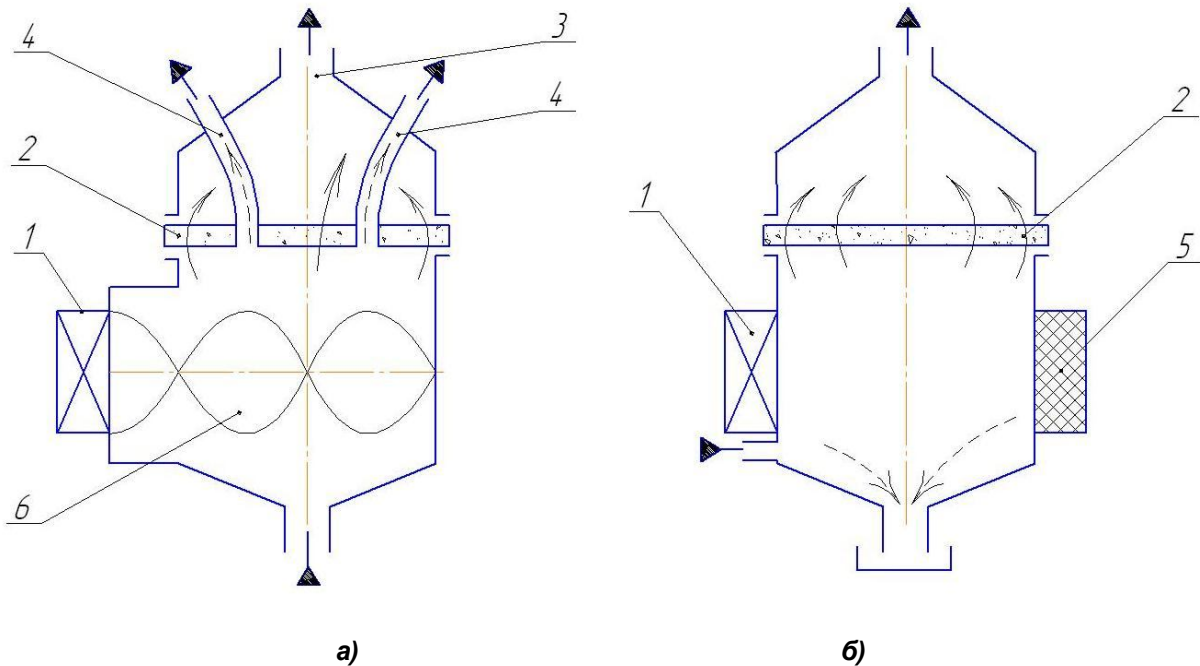


**Рис. 5. Ультразвуковой фильтр с возбуждением ультразвуковых колебаний в объеме фильтра нормально к плоскости неподвижной фильтрующей перегородки (1 - ультразвуковой излучатель; 2 - фильтрующая перегородка; 3 - волна колебаний)**



В случае распространения ультразвуковых колебаний вдоль плоскости фильтрующей перегородки известны варианты реализации фильтров с использованием как стоячей, так и бегущей ультразвуковой волны. Если образуется стоячая ультразвуковая волна, то поперечный размер внутренней полости фильтра выполняется кратным  $1/4$  длины волны, а стенка напротив излучателя выполняется плоской, параллельной его

поверхности. Напротив пучностей стоячей ультразвуковой волны, в которых наблюдается повышенная концентрация частичек загрязнителя, в фильтрующей перегородке выполняют каналы для отвода сконцентрированного загрязнителя. В такой конструкции отсутствует грязесборник, а отведенный с помощью самой суспензии сконцентрированный загрязнитель может снова подаваться на фильтрацию.



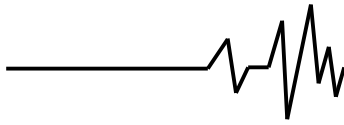
**Рис. 6. Ультразвуковые фильтры с возбуждением ультразвуковых колебаний в суспензии параллельно поверхности неподвижной фильтрующей перегородки (а – возбуждение стоячей ультразвуковой волны; б – возбуждение бегущей ультразвуковой волны; 1 - ультразвуковой излучатель; 2 – фильтрующая перегородка; 3 – отвод фильтрата; 4 – отвод суспензии с концентратом загрязнителя; 5 – звукопоглощающая стенка; 6 – волна деформации)**

Для создания в жидкости бегущей вдоль плоскости фильтрующей перегородки ультразвуковой волны в корпусе фильтра создают условия для поглощения волн. С этой целью стенку корпуса фильтра напротив излучателя покрывают звукопоглощающим материалом. Бегущая волна деформации обеспечивает непрерывный вибрационный режим движения частичек загрязнителя вдоль плоскости фильтрующей перегородки, который превалирует над движением частичек нормально к плоскости перегородки. В результате укрупнения при коагуляции частички загрязнителя теряют возможность приблизиться к перегородке и постепенно

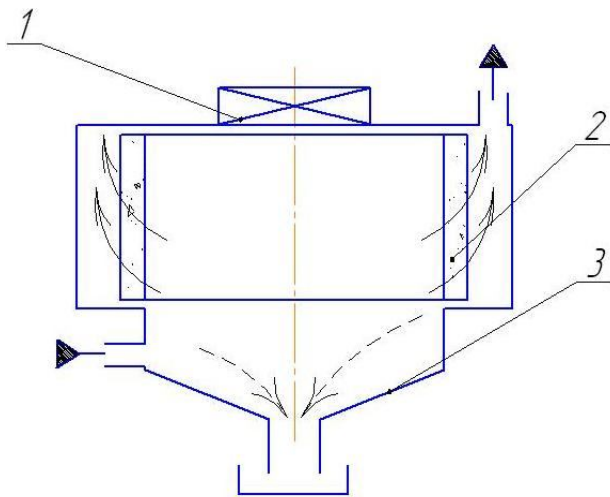
осаждаются в грязесборник.

Бегущая волна деформации может быть создана также за счет переменного сдвига фаз отраженной волны. Для этого противоположную к излучателю стенку выполняют наклонной (рис. 7) или выполняют наклонной излучающую поверхность ультразвукового излучателя. При этом в технологическом объеме фильтра образуется, так называемое, диффузное поле, в котором перемешаны узлы и пучности ультразвуковой волны.

Внутренняя, заполненная суспензией, полость ультразвукового фильтра, в которую излучается ультразвуковая энергия,



превращается в кавитационную ванну ограниченного объема. Ультразвуковые колебания суспензии передаются фильтрующей перегородке, что приводит к возникновению в ее порах, упомянутых ранее, ультразвуковых капиллярных эффектов. В ультразвуковой кавитационной ванне происходит не только непрерывная регенерация фильтрующей перегородки, но и осуществляется интенсивная кавитационная обработка самой суспензии. В традиционном фильтре фильтроэлемент постепенно засоряется и превращается в источник вторичного заражения фильтрата за счет концентрации в его порах и на поверхности радионуклидов, опасных химических элементов и колоний бактерий. В ультразвуковом фильтре, предназначенном, например, для подготовки питьевой воды, обеспечивается не только очистка от механических примесей, но осуществляется обеззараживание воды за счет интенсивной кавитационной обработки.

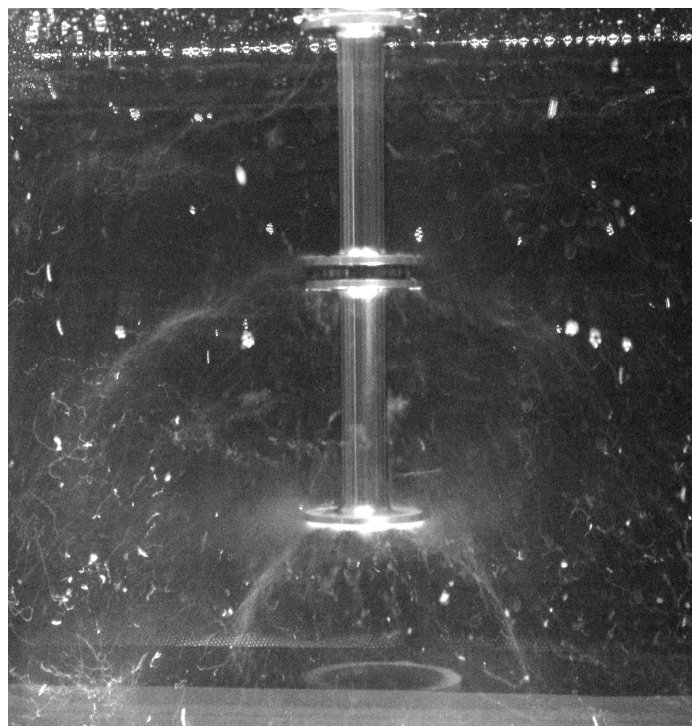
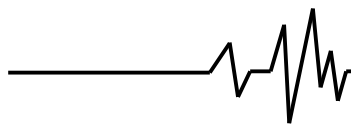


**Рис. 7. Ультразвуковой фильтр с диффузным ультразвуковым полем, бразованным за счет наклона отражающей стенки (1- ультразвуковой излучатель; 2 – фильтрующая перегородка трубчатой формы; 3 - корпус с наклонной отражающей поверхностью)**

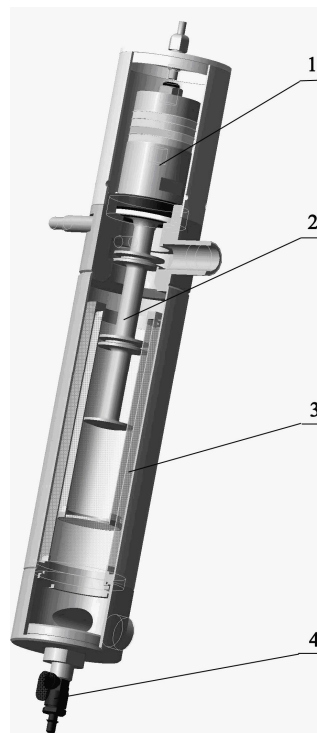
Представленный анализ способов построения ультразвуковых фильтров показывает, что эффективность и качество их работы, а в некоторых случаях и работоспособность, зависят от правильной организации ультразвукового поля в заполненном жидкостью ограниченном объеме сложного по форме корпуса фильтра при условии размещения в нем фильтрующего элемента. Неправильное размещение фильтрующей перегородки приведет к искажению ультразвукового поля в жидкости и, как следствие, к снижению интенсивности кавитации в зоне перегородки. Поэтому важным для этого класса ультразвуковой технологической аппаратуры является исследование вопросов возбуждения ультразвуковых колебаний большой интенсивности в гидравлических камерах ограниченного объема.

Для создания кавитационной области в ультразвуковых фильтрах с фильтроэлементом разработаны специальные ультразвуковые приводы-кавитаторы с развитой поверхностью излучения. Такие приводы позволяют с минимальными потерями ввести в жидкость ультразвуковую энергию, достаточную по мощности для возбуждения развитой кавитации во всем технологическом объеме фильтра. Увеличение поверхности излучения достигается за счет размещения дисковых элементов в пучностях стоячей волны деформации в ступени малого диаметра ступенчатого трансформатора колебательной скорости (рис.8а). Такой привод-кавитатор устанавливается в цилиндрическом корпусе фильтра и обеспечивает постоянную кавитационную очистку пор фильтроэлемента (рис.8б). Коагулирующие частички загрязнителя постепенно собираются в нижней части корпуса в грязесборнике и периодически удаляются при открытии крана сброса.

Внедрение ультразвуковой технологии фильтрования открывает новые возможности повышения эффективности, надежности и качества многих технологических процессов промышленного назначения. Ультразвуковые фильтры обеспечивают повышение тонкости фильтрации в 4...5 раз по сравнению с традиционными фильтрами при той же пористости фильтрующей перегородки и производительности [5-7].



а)



б)

**Рис. 8. Саморегенерирующийся ультразвуковой фильтр тонкой очистки (а- кавитационная область, создаваемая приводом-кавитатором с развитой поверхностью излучения; б- конструкция фильтра с приводом-кавитатором и саросом осадка; 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – развитая поверхность излучения; 3 – фильтроэлемент; 4 – кран сброса конденсата)**

### Выводы

Предложенные фильтры, использующие для саморегенерации явление ультразвуковой кавитации, позволяют повысить качество и эффективность многих технологических процессов, использующих многокомпонентные среды. Ультразвуковая кавитация, созданная малоамплитудными и высокоамплитудными приводами-кавитаторами позволяет обеспечить как постоянную эрозионную очистку фильтровальных пор, так и перемешивание на молекулярном уровне компонентов технологической среды. В подобных фильтрах необходимо обеспечить эрозионную стойкость фильтроэлемента и корпусных деталей, а также конструктивно обеспечить минимальное влияние фильтроэлемента на конфигурацию ультразвукового поля в технологическом объеме фильтра.

### Литература

1. <http://www.biodiesel-ua.com/biodiesel-faq.php>
2. <http://rusbiodiesel.com/>
3. <http://bioetanol.org.ua/production/biodiesel-product.html>
4. <http://www.alternativeenergyhq.com/>
5. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев. - К. : ВПЦ «Київ. ун-т», 2007. - 244 с.
6. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология / Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский, Н.Н. Хавский. Под ред. Б.А. Аграната. - М.: Металлургия, 1974. – 503 с.
7. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. - М.: Изд. Иностран. Лит., 1956. – 726 с.