

В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, А. Н. Галахов

*Бийский Технологический институт ГОУ ВПО АлтГТУ,
г. Бийск, 659305, Трофимова, 27, e-mail: vnh@bti.secna.ru*

Разработка оборудования ультразвукового пеногашения и определение его функциональных возможностей

Получена 10.02.2011, опубликована 01.03.2011

Статья посвящена разработке оборудования и исследованию процесса пеногашения. Разработан аппарат с изгибно-колеблющимся излучателем и показано, что применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности позволяет ускорить процесс осаждения пен. На основании анализа результатов экспериментальных исследований процесса пеногашения рекомендованы оптимальные режимы и условия ультразвукового воздействия на пивную и мыльную пены.

Ключевые слова: ультразвук, колебательная система, пеногашение.

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в химических, биохимических и пищевых производствах (производство бумаги, пластмассы, моющих средств, лаков и эмалей, спирта, пива и газированных напитков и т. д.) имеют технологические процессы, сопровождающиеся интенсивным пенообразованием [1].

Пенообразование в большинстве технологических процессов имеет негативные последствия, выражающиеся в снижении использования полезного объема технологического оборудования, нарушении регламента производства из-за неточного считывания значений с контрольно-измерительного оборудования, нарушении стерильности биотехнологических процессов, увеличении потерь продуктов и снижении производительности оборудования, а также в неблагоприятном на него воздействии.

В связи с этим возникает необходимость в решении проблем, связанных с нежелательным пенообразованием путем уменьшения пенообразования или создания систем разрушения пены.

1. ПРОБЛЕМЫ ПЕНОГАШЕНИЯ

Пена, как и любая дисперсная система, является агрегативно неустойчивой. Нестабильность пены объясняется наличием избытка поверхностной энергии, пропорциональной поверхности раздела фаз «жидкость-газ» [2].

Замкнутая система, обладающая избытком внутренней энергии и находящаяся в неустойчивом равновесии, постоянно теряет энергию. Этот процесс протекает до момента достижения минимального значения энергии, при котором в системе наступает равновесие. Если такая система состоит из различных фаз, то минимальное значение внутренней энергии, а значит, и поверхности раздела, будет достигнуто тогда, когда вся пена разрушится, т.е. превратится в жидкость и газ. Происходит это в результате протекания следующих процессов:

- истечения жидкости из пенных пленок и каналов;
- диффузии газа через пленки из мелких пузырьков в крупные;
- разрыва пленок между ячейками пены.

При этом толщина плёнки пузырька и соответственно её цвет постоянно меняются. Процесс изменения цвета пленки идет сначала быстро, а затем все медленнее. Когда толщина пленки становится меньше 10 нм, она темнеет, и окраска почти исчезает. Получается черная пленка, которая может существовать значительное время при благоприятных внешних условиях (отсутствии тепловых потоков, испарения и механических сотрясений, исключении попадания пыли).

Процессы естественного разрушения пен происходят очень медленно из-за наличия стабилизирующих факторов, и поэтому возникает необходимость в интенсификации процессов разрушения, т.е. применении пеногасящих устройств.

В силу ряда технико-экономических причин в промышленности наибольшее распространение получили механические методы, как более универсальные. Механический метод пеногашения основан на создании в пене перепада гидростатического давления или воздействии на пену рабочих тел в виде твердых поверхностей, жидкости, газа, пара. Принцип действия деформационных пеногасителей состоит в деструкции и разрушении исходной пены путем создания критических напряжений и деформаций при относительном движении потока пены в окрестности иницирующих это движение рабочих тел в виде лопастей.

Сложность проблемы пеногашения не позволила создать до настоящего времени единый методический подход для разнообразных видов и типов механических пеногасителей. Поэтому существующие методики расчета основных параметров таких пеногасителей получены эмпирическим путем для ограниченного интервала изменения опытных факторов и величин.

Одним из перспективных является электрофизический способ гашения пен, заключающийся в создании над поверхностью пены объемного электрического разряда. Разряд создают путем размещения над поверхностью пены многоострийной электродной системы, эмитирующей электроны. Такой способ применим только к

негорючим средам с взрывобезопасными парами. Электрические разряды, пронизывающие зону формирования пены, в некоторых случаях могут привести к инициированию дополнительных реакций, что так же не всегда допустимо.

Для интенсификации пеногашения используются способы, основанные на «пережигании» пленки пены путем воздействия на нее высоких температур. Основным недостатком способа является потеря продукта, поскольку происходит его испарение с поверхности пленок пены.

Наиболее интересным и перспективным является акустический способ разрушения пены, основанный на энергетическом воздействии на пену звуковыми или ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности.

Разрушение пены ультразвуком имеет ряд преимуществ по сравнению с известными способами: исключает нарушение стерильности конечного продукта; может применяться для гашения пены легко воспламеняющихся жидкостей; не требует расходных материалов (в сравнении с химическими способами). Акустический способ гашения пены [3] заключается в формировании акустических колебаний высокой (более 130 дБ) интенсивности, направленных в зону образования пены. Знакопеременное звуковое поле наиболее активно воздействует на верхние (открытые) слои пены, поскольку вглубь проникает слабо из-за большого затухания.

При высоких интенсивностях звуковой волны знакопеременные силы достигают таких значений, при которых происходит разрыв пленок пены. Для различных пен существует пороговая интенсивность колебаний, при которой происходит ее разрушение. Стойкость пены к звуковому воздействию зависит от структуры пены. Пены, состоящие из крупных пузырей, как правило, легко и быстро разрушаются при невысоких интенсивностях. Пены, состоящие из мелких пузырей более стойки к воздействию акустических полей и требуют большей интенсивности.

Структура пены определяет не только эффективную интенсивность звуковой волны, но и ее оптимальную частоту. Для разрушения пен, состоящих из мелких пузырей, используют более высокочастотные колебания. В любом случае, частота колебаний выбирается вне диапазона слышимости человеческого уха (более 18–20 кГц), поскольку при высоких интенсивностях звуковой волны использование акустических пеногасителей требовало специальной звукоизоляции.

К сожалению, системы ультразвукового пеногашения до настоящего времени не получили широкого распространения. Обусловлено это не только отсутствием специализированного оборудования, доступного для уникального производственного применения (химические и биотехнологические производства), но и дешевого, доступного оборудования, пригодного для решения ряда частных задач (например, для гашения пены при розливе пива, квасов и других напитков в барах).

Создание такого оборудования требует проведения исследований по определению его функциональных возможностей при разрушении различных пен и выявлению оптимальных условий реализации процесса пеногашения.

2. ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования эффективности осаждения различных видов пен разработана экспериментальная установка, позволяющая визуально наблюдать за исследуемым процессом и осуществлять регистрацию изменения высоты слоя пены в процессе его разрушения. Внешний вид лабораторной установки представлен на рис. 1.

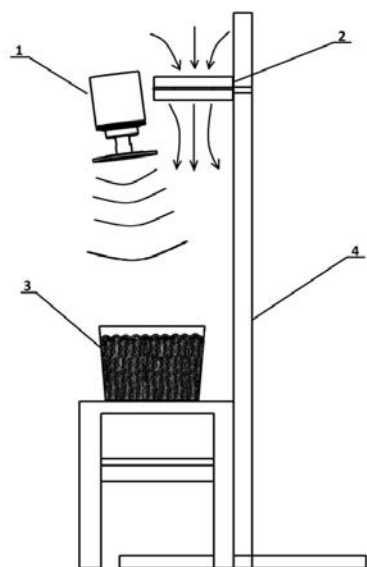


Рис. 1. Эскиз экспериментальной установки

- 1 – ультразвуковая колебательная система с излучателем дискового типа
- 2 – вентилятор (ВН-2);
- 3 – сосуд с пеной;
- 4 – лабораторный штатив

В состав экспериментальной установки включены: прозрачный цилиндрический сосуд ёмкостью $0,0013 \text{ м}^3$, наполняемый пеной, лабораторный штатив, на который, на расстоянии 400 мм от сосуда с пеной крепится вентилятор ВН-2, направленный таким образом, что поток воздуха, создаваемый им, равномерно воздействует на всю поверхность пенного слоя. Для интенсификации процесса разрушения пены используется ультразвуковой (УЗ) технологический аппарат, разработанный в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института.

В качестве материалов, обеспечивающих многократное образование пен при проведении исследований использовалось пиво и мыльный раствор. Выбор в качестве экспериментального материала пивной пены обусловлен широчайшей известностью и актуальностью проблемы, а мыльная пена выбрана благодаря доступности и максимальной стойкости.

Необходимость формирования ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в воздушной среде на поверхности пен выдвигает определенные требования к конструктивной схеме ультразвукового аппарата со специальным излучателем.

3. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ ГАШЕНИЯ ПЕНЫ

Для обеспечения эффективного УЗ воздействия создаваемый аппарат должен обеспечивать излучение колебаний с интенсивностью не менее 130 дБ на частоте не менее 20 кГц. Основным элементом технологического аппарата является пьезоэлектрическая колебательная система с излучателем. Питание пьезоэлектрической системы осуществляется от электронного генератора (на рисунке 1 не показан), обеспечивающего преобразование энергии промышленной сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты, поддержание оптимального резонансного режима колебаний и стабилизацию амплитуды излучаемых им колебаний.

Ультразвуковая колебательная система конструктивно состоит из трех основных узлов: пьезоэлектрического преобразователя, концентратора-усилителя механических колебаний и излучающего элемента. Пьезоэлектрический преобразователь осуществляет преобразование энергии электрических колебаний УЗ частоты в механические колебания. Концентратор осуществляет их усиление и передачу излучающему элементу. Излучающий элемент осуществляет непосредственный ввод УЗ энергии в газовую среду. При этом излучающий элемент выполнен в виде диска специальной формы, обеспечивающего преобразование продольных колебаний в изгибные, что позволяет улучшать условия согласования колебательной системы с газовой средой [4].

При разработке аппарата использованы данные об аналогичных аппаратах, разработанных за рубежом [5]. Все они основаны на применении излучателей, выполненных из титановых сплавов. Применение других материалов считается неприемлемым. Вместе с тем, наряду с несомненными достоинствами, титановые излучатели имеют ряд недостатков (высокая стоимость материала, разнородность заготовки по диаметру и толщине), которые ограничивают их практическое применение.

В связи с этим излучатель создаваемого аппарата был изготовлен в виде ступенчато-переменного диска из алюминиевого сплава В-95, и при его создании потребовалось решить ряд технических проблем.

Как известно, при центральном возбуждении плоского тонкого диска, радиус которого кратен половине длины изгибной волны в этом материале, распределение колебательных смещений изгибных колебаний вдоль поверхности диска будет иметь вид стоячих волн. Из-за того, что различные точки поверхности диска излучают колебания в противоположенных фазах, на некотором расстоянии от диска на его оси, акустическое излучение отдельных участков диска частично компенсируется. Для того чтобы уменьшить влияние участков диска, излучающих колебания в «отрицательной» фазе, увеличена толщина диска в указанных участках. В результате диск выполняется ступенчато-переменного сечения, конструкция которого представлена на рис. 2. Из представленного распределения колебаний видно, что амплитуда колебаний

«отрицательных» зон уменьшена по сравнению с амплитудой колебаний «положительных» зон. Полной взаимной компенсации колебаний не происходит.

Существенное увеличение уровня звукового давления излучения ступенчато-переменного диска по сравнению с излучением плоского диска иллюстрируют диаграммы направленности излучения ступенчато-переменного и плоского дисков, представленные на рис. 3.

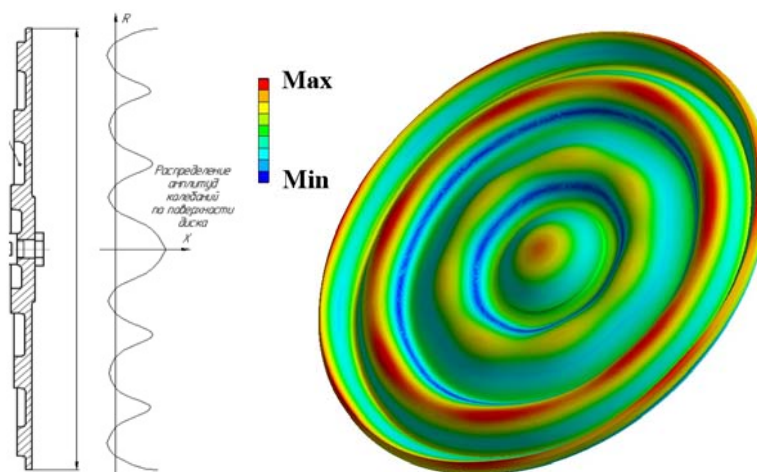


Рис. 2. Диск ступенчато-переменного сечения с преимущественным излучением одной фазы колебаний

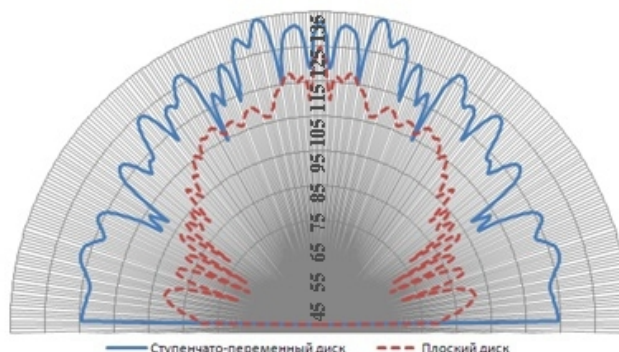


Рис. 3. Диаграммы направленности излучения дисков плоской и ступенчато-переменной формы, дБ

Из диаграмм следует, что излучатель ступенчато-переменной формы обеспечивает увеличение уровня звукового давления не менее чем на 10 дБ при обеспечении более широкой диаграммы направленности излучения.

Разработанный и изготовленный аппарат представлен на рис. 4.

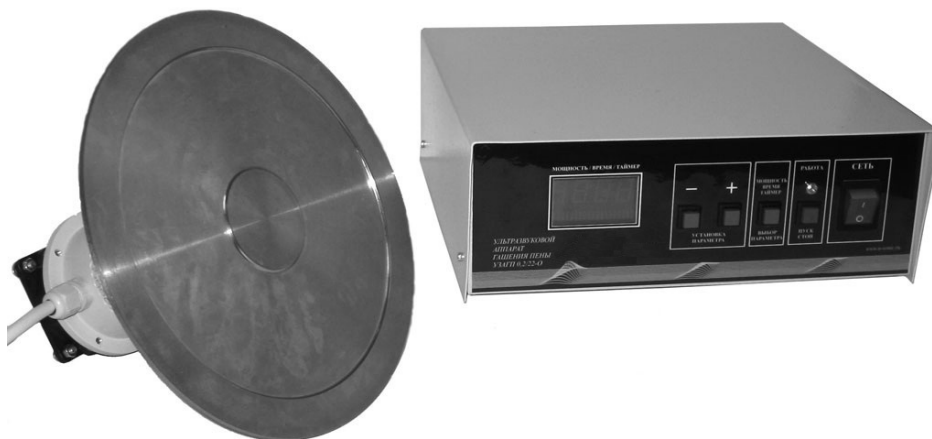


Рис. 4. Ультразвуковой аппарат с дисковым излучателем

Технические характеристики разработанного и использованного при проведении исследований аппарата, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики УЗ технологического аппарата

Потребляемая мощность, не более, ВА	160
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Интенсивность колебаний (1 м), дБ, не менее	135
Габаритные размеры электронного блока, мм	270×270×110
Габаритные размеры колебательной системы, мм	Ø160×150
Диаметр излучателя, мм	160
Частота излучаемых колебаний, кГц	22

4. ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Методика проведения исследований заключалась в последовательном проведении пяти различных экспериментов, направленных на исследования процесса осаждения пены:

- в процессе её естественного разрушения;
- путем воздействия потоком воздуха при помощи вентилятора ВН-2;
- при воздействии акустическими колебаниями ультразвуковой частоты при мощности генератора 75%;
- при воздействии акустическими колебаниями ультразвуковой частоты при мощности генератора 100%;
- путем воздействия совместно потоком воздуха и УЗ колебаниями.

Результаты экспериментальных исследований, показывающие зависимости объёма осаждаемой пивной пены от времени при различных режимах и условиях воздействия представлены на рис. 5.

Как следует из представленных зависимостей, процесс осаждения пивной пены (до 20% от начальной высоты) при воздействии УЗ колебаний ускоряется в сравнении с естественным разрушением почти в 4 раза при максимальной мощности УЗ излучения, не менее чем в 2 раза при 75% мощности излучения. Дополнительное воздействие воздушных потоков не обеспечивает существенного ускорения процесса.

В ходе экспериментов установлено, что под действием УЗ колебаний происходит осаждение верхнего слоя пены. Разрушенные под воздействием ультразвуковых колебаний пузырьки пены лопаются, насыщая влагой следующий слой. Этот процесс происходит тем быстрее, чем меньше уровень водности в пене и выше уровень УЗ воздействия, создаваемого излучателем. При этом процесс разрушения протекает «ступенчато», это обусловлено тем, что при разрушении пузырьков верхнего слоя вся жидкость из разрушенных пузырьков насыщает лежащую ниже пену, изменяя тем самым режим ее осушения. Было установлено также, что при воздействии на тонкие слои (менее 0.5 см), процесс разрушения пены практически прекращается, поскольку колебания проникают вглубь жидкой фазы, и из-за зарождения кавитации, вновь происходит формирование пивной пены.

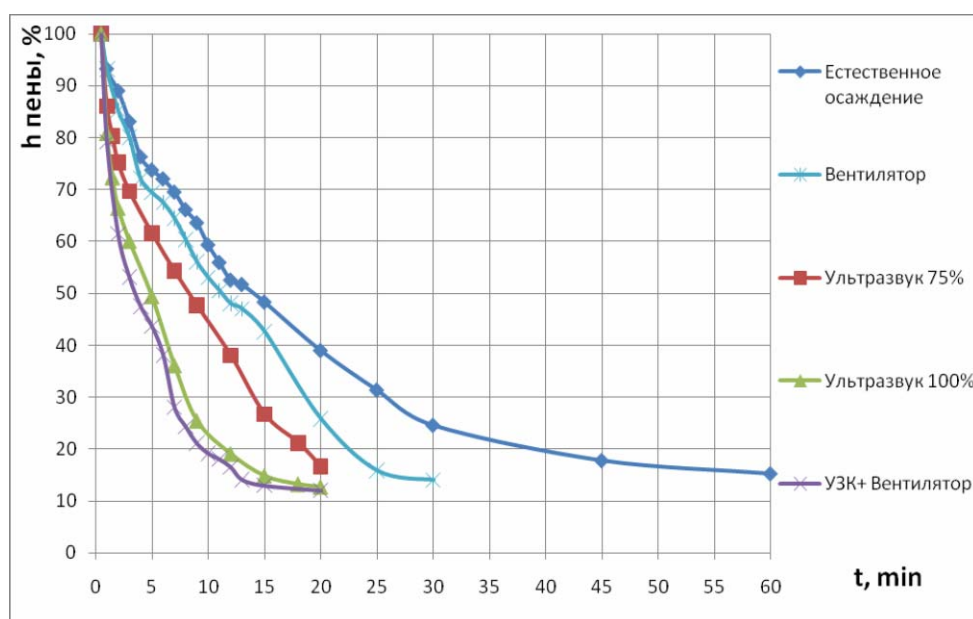


Рис. 5. Осаждение пивной пены

Таким образом, в результате исследований была установлена практическая возможность применения ультразвукового воздействия для интенсификации процесса разрушения пивной пены и эффективность созданного аппарата для практического применения.

На следующем этапе исследований были проведены эксперименты по интенсификации процесса осаждения пены, созданной при помощи пены для ванн. Методика заключалась в последовательном проведении четырех аналогичных

экспериментов (без снижения мощности УЗ воздействия), направленных на исследования процесса осаждения пены:

Результаты экспериментальных исследований, показывающие зависимости объёма осаждаемой мыльной пены от времени при различных режимах и условиях воздействия, представлены на рис 6.

Как следует из представленных зависимостей, наблюдать процесс осаждения мыльной пены до 20% от начальной высоты не представляется возможным. Мыльная пена не разрушалась в естественных условиях (без внешних воздействий) в течение нескольких часов. Обеспечить процесс осаждения мыльной пены до 20% от начальной высоты за разумное время (20 минут) удалось только при одновременном воздействии ультразвуковыми колебаниями и потоком воздуха от вентилятора. При воздействии УЗ колебаний процесс ускоряется в сравнении с естественным разрушением более чем в 10 раз при максимальной мощности УЗ излучения.

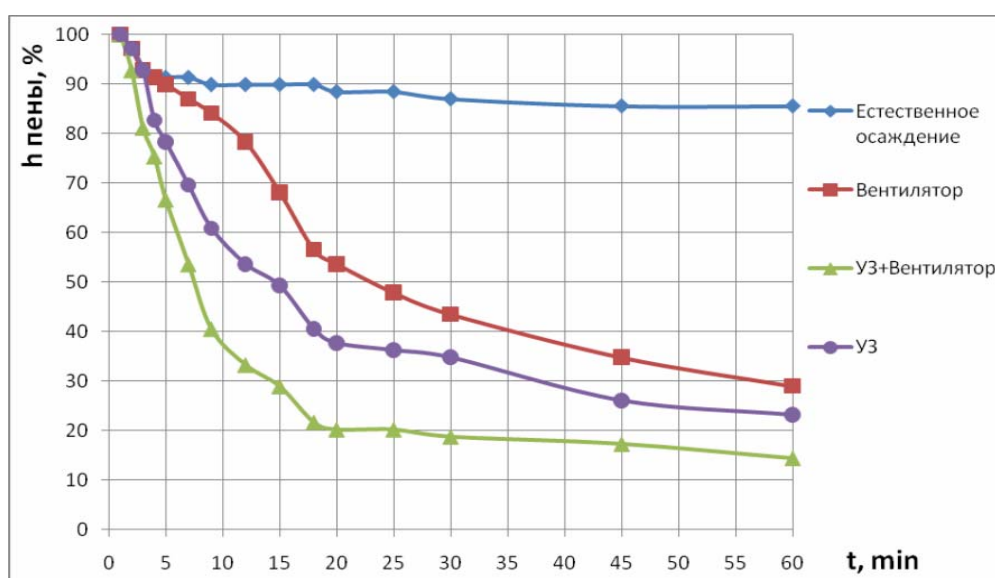


Рис. 6. Осаждение пены для ванн

Дополнительное воздействие воздушных потоков обеспечивает практически четырехкратное ускорение процесса в сравнении с ускорением процесса потоками воздуха.

Скорость разрушения пены с течением времени замедляется, что связано с насыщением нижних слоев жидкостью, образующейся в процессе разрушения пены.

Представленные результаты показывают принципиальную возможность увеличения скорости разрушения мыльной пены под воздействием акустических колебаний ультразвуковой частоты и возможность применения для этой цели созданного аппарата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Показана эффективность ультразвукового разрушения различных пен, а также пригодность созданного аппарата для реализации этого процесса.

2. Установлено, что применение ультразвуковых колебаний с интенсивностью около 135 дБ на частоте 22 кГц позволяет сократить время разрушения пивной пены не менее чем в 4 раз, а мыльной пены более чем в 10 раз, при энергопотреблении не более 2,4 Вт/м³.

3. Из полученных результатов следует, что самым энергетически выгодным является воздействие ультразвуковыми колебаниями совместно с воздушным потоком, а созданный аппарат может использоваться на разливающих станциях, где необходима высокая скорость обслуживания клиентов.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, г/к № П2518.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Касаткин. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 800 с.
2. Б. В. Дерягин, Н. В. Чураев, В. М. Муллер. Поверхностные силы. М., 1985. – 398 с.
3. Gallego J. A. Juarez, Rodríguez G. Corral, Acosta V.M. Aparicio, G. E. Andrés, A. Blanco, F. Montoya. Ultrasonic defoaming system using emitters comprising a stepped vibrating plate, ES Patent WO 2004/024317 A1
4. В. Н. Хмелев. Ультразвуковое оборудование для интенсификации химико-технологических процессов [Текст] / В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, М. В. Хмелев, С.Н. Цыганок // Энциклопедия инженера-химика. – 2010. – № 6. – С.7-11.
5. Gallego J. A. Juarez, Rodríguez G. Corral, Acosta V.M. Aparicio, G. E. Andrés, A. Blanco, F. Montoya. Ultrasonic Defoaming System Using Emitters Comprising A Stepped Vibrating Plate, Spanish Patent 200202113 (2002).