

РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ПЕН И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

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

*Кафедра «Методы и средства измерений и автоматизации»
Бийский технологический институт (филиал), ФГБОУ ВПО «Алтайский
государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск;
vnh@bti.secna.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: излучатели; колебательная система; пеногашение; ультразвук.

Аннотация: Описываются разработка ультразвукового оборудования для разрушения пен и исследование эффективности его применения. Создано оборудование с излучателем в виде изгибно-колеблющегося диска. Показано, что применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности позволяет ускорить процесс осаждения пен. На основании анализа результатов экспериментальных исследований процесса пеногашения рекомендованы режимы и условия ультразвукового воздействия на пивную пену и пену, созданную пенообразователем типа лауретсульфат натрия.

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

Интенсивное пенообразование ведет к негативным последствиям, выражающимся в нарушении ритмичности производственного цикла из-за заполнения пеной оборудования и коммуникаций (трубопроводов, фильтров, насосов, ловушек, отстойников и т.д.). Вместе с пеной уносится значительное количество полезных веществ. Заполнение пеной аппаратов вызывает уменьшение их полезного объема, что снижает производительность. Пенообразование нарушает регламент производства из-за неточного считывания значений с контрольно-измерительного оборудования, ведет к нарушению стерильности биотехнологических процессов, увеличению потерь продуктов, снижению производительности оборудования и др.

Полное или частичное осаждение пены можно обеспечить контактным разрушением с применением различных механических устройств, введением химических веществ, извлечением поверхностно-активных веществ из состава растворов. Возможно также использование способов пеногашения, основанных на воздействии высоких температур, способствующих испарению жидкости с поверхности пузырьков пены.

Недостатками таких способов являются необходимость значительных капитальных затрат и загрязнение готового продукта химическими реагентами. Кроме того, введение реагентов приводит к повышению себестоимости готовой продук-

ции, а высокотемпературные воздействия неприменимы для пеногашения во взрывоопасных и горючих средах [2].

Показанные недостатки обуславливают необходимость в проведении работ, направленных на поиск и исследование новых способов разрушения пен.

Одним из таких способов является разрушение пены ультразвуковыми (УЗ) колебаниями, который имеет ряд преимуществ по сравнению с известными способами: исключает нарушение стерильности конечного продукта; может применяться для гашения пены легковоспламеняющихся жидкостей; не требует расходных материалов (в сравнении с химическими способами). Ультразвуковой способ гашения пены заключается в направлении акустических колебаний высокой (более 130 дБ) интенсивности в зону образования пены. Знакопеременное УЗ поле наиболее активно воздействует на верхние (открытые) слои пены, поскольку вглубь проникает слабо из-за большого затухания [3].

При высоких интенсивностях УЗ воздействия знакопеременные силы достигают значений, при которых происходит разрыв пленки 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.

В настоящее время для реализации такого способа используются аэродинамические излучатели, выполненные в виде статических и динамических сирен, пневматических рупоров и обеспечивающие преобразование кинетической энергии газового потока в энергию акустических колебаний.

Недостатками таких излучателей являются:

- низкая эффективность фокусирования УЗ колебаний низкой частоты, создаваемых газоструйными излучателями (диаметр линии фокуса будет превышать несколько длин волн, что для частоты в 10 кГц в воздухе составит около 10 см);

- низкая эффективность используемых для реализации пеногашения газоструйных излучателей гартмановского типа (коэффициент полезного действия менее 20–25 %);

- ограниченный диапазон частот излучения (менее 20 кГц), обуславливающий необходимость защиты обслуживающего персонала от воздействия высокоинтенсивных звуковых колебаний.

Эти недостатки ограничивают возможности звукового и ультразвукового способов разрушения пен при промышленном применении и обуславливают необходимость создания новых способов, основанных на использовании более эффективных излучателей высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний.

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

При создании оборудования были использованы излучатели, изготовленные в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института, для высокоинтенсивного воздействия на газовые среды и воздушно-капельные дисперсии [4].

Разработанное оборудование обеспечивает излучение колебаний с интенсивностью не менее 130 дБ на частоте не менее 20 кГц. Основным элементом технологического оборудования является пьезоэлектрическая колебательная система с излучателем. Питание пьезоэлектрической системы осуществляется от электронного генератора, обеспечивающего преобразование энергии промышленной сети в энергию электрических колебаний УЗ 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, который выполняет непосредственный ввод УЗ энергии в газовую среду. При этом излучающий элемент выполнен в виде диска ступенчато-переменной толщины, обеспечивающего преобразование продольных колебаний в изгибные, что позволяет улучшать условия согласования колебательной системы с газовой средой [5–6].

Для проведения исследований и определения оптимальных режимов было изготовлено два экземпляра оборудования: с излучателем в виде ступенчато-переменного диска из алюминиевого сплава В95 диаметром 160 мм и с излучателем из титанового сплава ВТ5 диаметром 250 мм.

Разработанное и изготовленное оборудование представлено на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Ультразвуковое оборудование с дисковым излучателем диаметром, мм:
а – 160; б – 250

Технические характеристики оборудования с излучателем диаметром 160 и 250 мм представлены в таблице.

Для исследования эффективности применения созданного оборудования для разрушения различных видов пен разработана экспериментальная установка, позволяющая визуально наблюдать за исследуемым процессом и осуществлять регистрацию изменения высоты слоя пены в процессе его разрушения с помощью УЗ дальномера. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 2.

Технические характеристики УЗ технологического оборудования с дисковым излучателем диаметром 160 и 250 мм

Наименование параметра	Диаметр излучателя, мм	
	160	250
Потребляемая мощность, не более, Вт	70	250
Напряжение в сети переменного тока, В	220 ± 22	220 ± 22
Уровень звукового давление (1 м), не менее, дБ	135	135
Уровень звукового давления в фокусе, дБ	150,4	157,3
Расстояние до фокуса, мм	75	87
Диаметр фокального пятна, мм	19	26
Габаритные размеры электронного блока, мм	270×270×110	270×270×110
Габаритные размеры колебательной системы, мм	Ø160×150	Ø250×150
Частота излучаемых колебаний, кГц	22	22

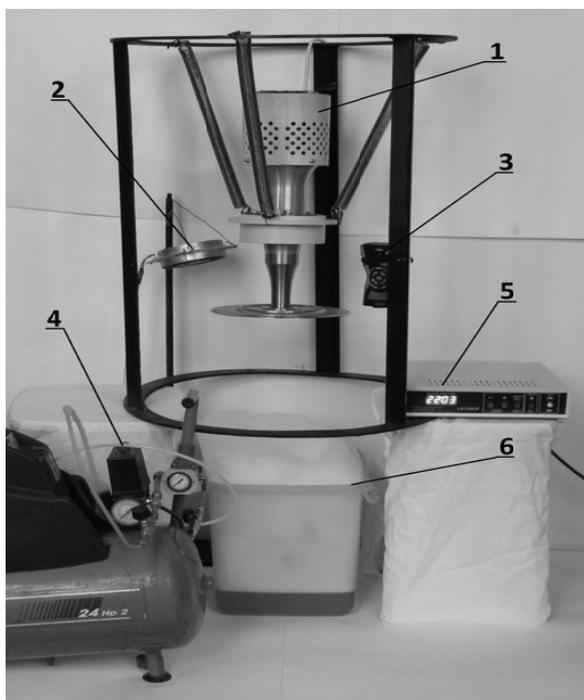


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки:

- 1 – созданная УЗ колебательная система с излучателем дискового типа;
 2 – вентилятор (ВН-2); 3 – УЗ дальномер; 4 – компрессор;
 5 – электронный генератор; 6 – сосуд с пеной

В состав экспериментальной установки включены: полупрозрачный сосуд емкостью 24 литра, 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, а также ультразвуковой датсодмер, необходимый для регистрации изменения высоты слоя пены в процессе ее разрушения.

В качестве материалов, обеспечивающих многократное образование пен при проведении исследований, использовалось пиво и лауретсульфат натрия (пенообразователь моющих средств). Вспенивание производилось с помощью компрессора с насадкой в виде пористого камня, представляющего собой смесь минералов. Выбор в качестве экспериментального материала пивной пены обусловлен широчайшей известностью и актуальностью проблемы пенообразования при его производстве и розливе, а лауретсульфат натрия выбран благодаря доступности и максимальной стойкости.

Проведение экспериментов осуществлялось в следующей последовательности действий исследования процесса разрушения пены:

- естественного;
- при воздействии потока воздуха, создаваемого при помощи вентилятора ВН-2 (скорость 2,5 м/с);
- при воздействии акустическими колебаниями УЗ частоты;
- путем совместного воздействия потока воздуха и УЗ колебаний.

Фотографии процесса осаждения пены УЗ колебаниями высокой интенсивности показаны на рис. 3.

Из представленных фотографий видно, что УЗ воздействие осуществлялось в фокусе излучателя. Для обеспечения равномерного осаждения пены производилось перемещение излучателя над поверхностью разрушаемой пены.

Результаты экспериментальных исследований, показывающие зависимости объема разрушаемой пены, полученной пенообразователем лауретсульфат натрия, от времени при различных режимах и условиях воздействия, представлены на рис. 4.

Из представленных зависимостей следует, что за время эксперимента (60 мин) естественного разрушения пены практически не происходило (не более 10 % от общего объема). Полное естественное разрушение пены обеспечивалось за время 15 ч.

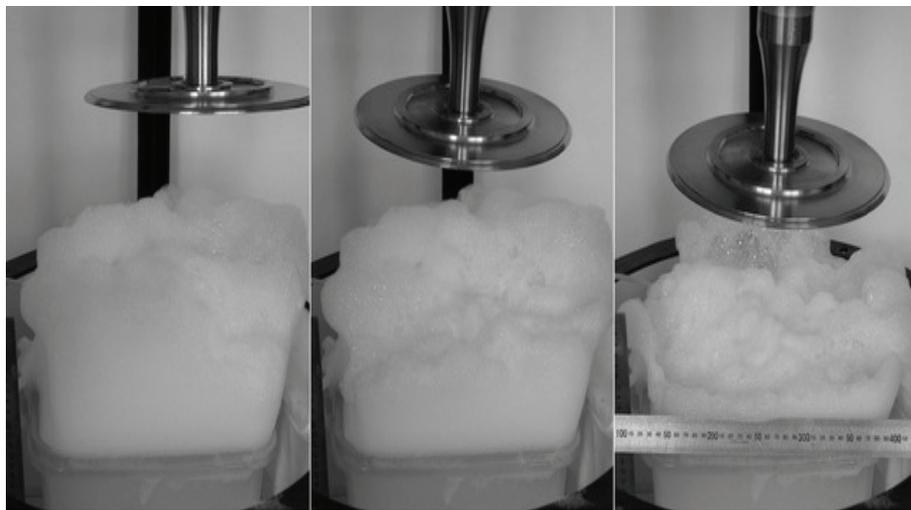


Рис. 3. Процесс осаждения пены УЗ колебаниями высокой интенсивности

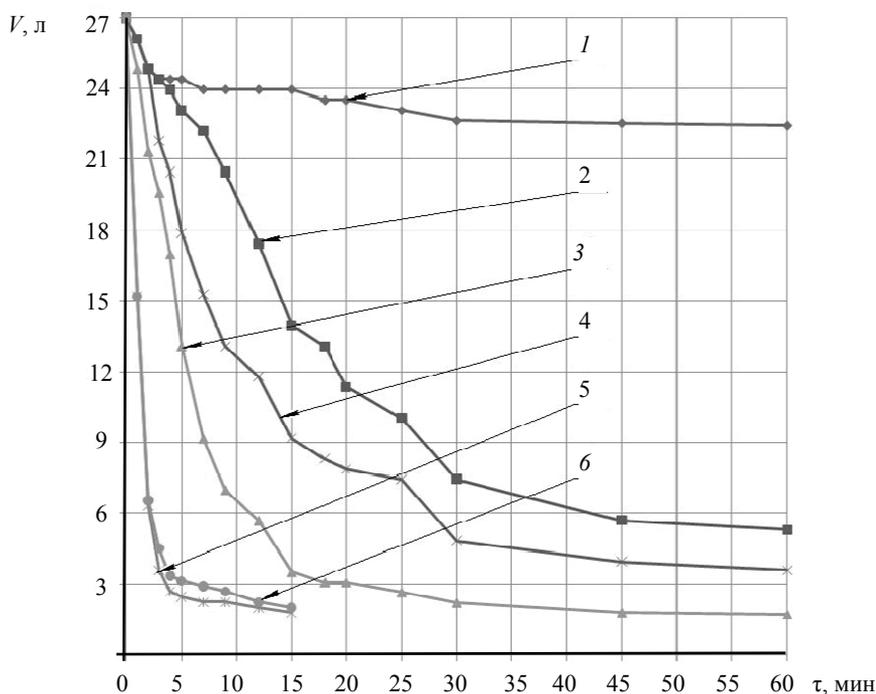


Рис. 4. Зависимости объема разрушаемой пены, полученной пенообразователем лауретсульфат натрия от времени и способа воздействия:
 1 – естественное осаждение; 2 – вентилятор; 3 – вентилятор совместно с излучающим диском 160 мм; 4 – излучающий диск 160 мм; 5 – вентилятор совместно с излучающим диском 250 мм; 6 – излучающий диск 250 мм

Ультразвуковое воздействие не обеспечивает полного разрушения пены (из рисунка видно, что разрушение прекращается при остаточном объеме 2 литра, высота над поверхностью жидкости 14 мм). Это может быть объяснено следующим: при ультразвуковом воздействии на тонкий слой пены происходит проникновение колебаний в жидкость и возникновение в ней активных кавитационных процессов, приводящих к повторному пенообразованию.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что применение ультразвукового воздействия с уровнем звукового давления в фокусе 150,4 дБ (для излучателя диаметром 160 мм) обеспечивает ускорение процесса до 32 раз по сравнению с естественным разрушением пены и до полутора раз по сравнению с воздействием воздушным потоком.

Столь малое увеличение эффективности процесса разрушения пен при ультразвуковом воздействии в сравнении с воздействием воздушным потоком объясняется недостаточностью уровня звукового давления. Кроме этого из зависимости на рис. 4 следует, что процесс разрушения идет «ступенчато». Это объясняется тем, что большое количество жидкости после разрыва пузырьков верхнего слоя пены стекает на нижние, тем самым повышая влагосодержание пены и стабилизируя ее. Для подтверждения этого предположения был проведен эксперимент при совместном воздействии ультразвуковыми колебаниями (для излучателя диаметром 160 мм) и потоком воздуха, который осуществлял осушку верхнего слоя пены. Полученные результаты показывают ускорение процесса в 2,3 раза по сравнению с воздействием только ультразвуковыми колебаниями и отсутствие «ступенек».

Таким образом, при недостаточной интенсивности формируемых ультразвуковых колебаний эффективность процесса можно значительно повысить путем дополнительного применения воздушных потоков, осушающих слой пленки и приводящих ее в неустойчивое состояние.

Представленные на этом же рисунке зависимости объема разрушаемой пены от времени воздействия для уровня звукового давления 157,3 дБ в фокусе (для излучателя диаметром 250 мм) показывают ускорение процесса до 180 раз по сравнению с естественным разрушением и до шести раз с воздействием излучателем диаметром 160 мм. Кроме того, видно, что совместное воздействие ультразвуковыми колебаниями и воздушными потоками в этом случае не имеет эффекта. Это позволяет сделать вывод о достаточности уровня звукового давления в 157,3 дБ (излучатель 250 мм) для разрушения пен на основе пенообразователя лауретсульфат натрия.

В целом, полученные результаты показали, что для пены, образованной лауретсульфатом натрия, скорость процесса пеногашения составит для излучателя в виде диска диаметром (см. рис. 4):

- 160 мм – 1,22 л/мин при энергозатратах не более $1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{л}}$;
- 250 мм – 8,6 л/мин при энергозатратах не более $0,5 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{л}}$.

Далее были проведены аналогичные эксперименты по интенсификации процесса осаждения пивной пены. Полученные результаты экспериментов для пивной пены показаны на рис. 5.

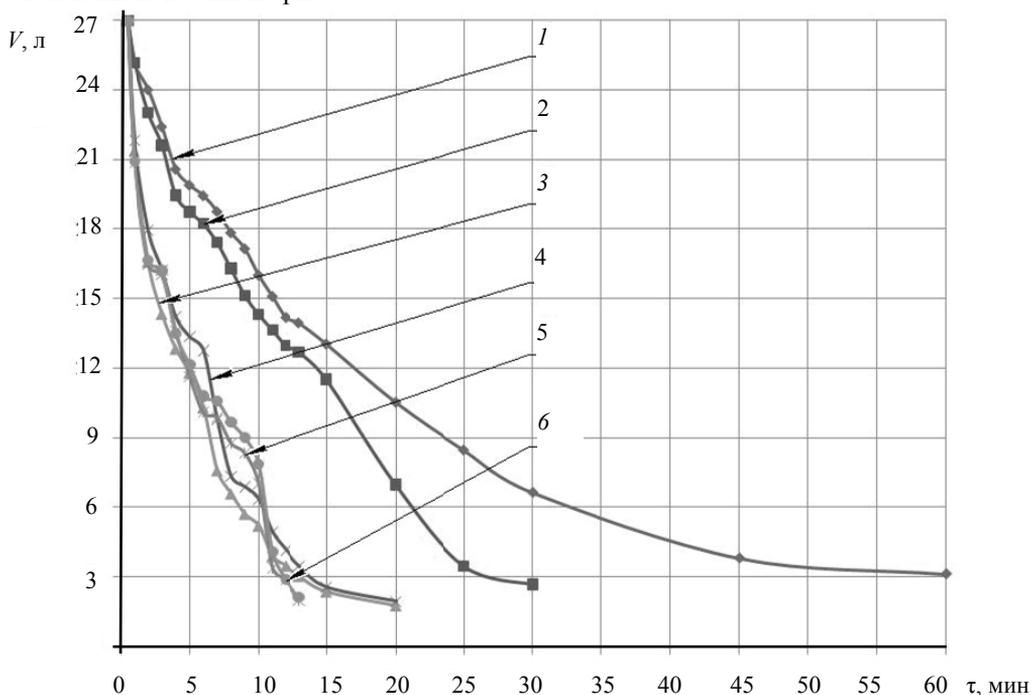


Рис. 5. Зависимости объема разрушаемой пивной пены от времени и способа воздействия:

1 – естественное осаждение; 2 – вентилятор; 3 – вентилятор совместно с излучающим диском 160 мм; 4 – излучающий диск 160 мм; 5 – вентилятор совместно с излучающим диском 250 мм; 6 – излучающий диск 250 мм

Основным отличием полученных зависимостей от представленных ранее является практически полное (в пределах погрешности измерений – 5 %) совпадение скорости объемного разрушения пены для излучателей диаметром 160 и 250 мм как с применением воздушных потоков, так и без них. Это свидетельствует о достаточности уровня звукового давления в 150,4 дБ (излучатель 160 мм) для разрушения пивной пены. При этом обеспечивается ускорение процесса до четырех раз по сравнению с естественным осаждением.

Из анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что скорость процесса пеногашения для пивной пены составит для излучателя в виде диска диаметром (см. рис. 5):

$$- 160 \text{ мм} - 2,8 \text{ л/мин при энергозатратах не более } 0,4 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{л}};$$

$$- 250 \text{ мм} - 3 \text{ л/мин при энергозатратах не более } 1,4 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{л}}.$$

Проведенные исследования позволили установить целесообразность использования ультразвукового воздействия для интенсификации процесса разрушения пивной пены и эффективность созданного оборудования для практического применения.

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

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

2. Установлено, что применение ультразвуковых колебаний с уровнем звукового давления не менее 150 дБ на частоте 22 кГц позволяет сократить время разрушения пивной пены до четырех раз, а мыльной пены более чем в 180 раз по сравнению с естественным разрушением, при энергопотреблении для излучателя в виде диска диаметром:

– 160 мм – $0,4 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{л}}$ для пивной пены и $1 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{л}}$ для пены, образованной лауретсульфатом натрия;

– 250 мм – $1,4 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{л}}$ для пивной пены и $0,5 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{л}}$ для пены, образованной лауретсульфатом натрия.

3. Из полученных результатов следует, что для пивной пены наиболее энергетически выгодным является воздействие ультразвуковыми колебаниями при уровне звукового давления не менее 150,4 дБ (предпочтительней излучатель в виде диска диаметром 160 мм) и не менее 157,3 дБ для пен на основе пенообразователя лауретсульфат натрия (предпочтительней излучатель в виде диска диаметром 250 мм).

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Список литературы

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 800 с.
2. Тихомиров, В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В.К. Тихомиров. – М. : Химия, 1975. – 264 с

3. Pat. 200202113 ES, WO 2004/024317. Ultrasonic Defoaming System Using Emitters Comprising a Stepped Vibrating Plate / Gallego J.A. Juarez, Rodríguez G. Corral, Acosta V.M. Aparicio, G.E. Andrés, A. Blanco, F. Montoya ; applicant and patent holder is Consejo Superior de Investigaciones Científicas. – № 2003/000465 ; appl. 13.09.2002 ; publ. 25.03.2004. – 4 p.

4. Ультразвуковая коагуляция аэрозолей / В.Н. Хмелев [и др.] // Алт. гос. техн. ун-т, Бийск. технол. ин-т. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 241 с.

5. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах / В.Н. Хмелев [и др.] // Изв. Тул. гос. ун-та. – 2010. – Т. 1. – С. 10.

6. Ультразвуковое оборудование для интенсификации химико-технологических процессов / В.Н. Хмелев [и др.] // Энцикл. инженера-химика. – 2010. – № 6. – С. 7–11.

Development of Ultrasonic Equipment for the Destruction of Foams and Study of its Features

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, A.N. Galakhov

*Department "Methods and Tools for Measurement and Automation",
Biysk Technological Institute (Affiliate), "Altai State Technical University
named after I.I. Polzunov", Biysk; vnh@bti.secna.ru*

Key words and phrases: emitters; foam breaking; oscillating system; ultrasound.

Abstract: The article is devoted to the development of ultrasound equipment for the destruction of foams and to research of efficiency of its application. The equipment with the transducer in the form of flexural vibrating disk is developed. It is shown that the use of high intensity ultrasonic oscillations can accelerate the process of deposition of foams. On the basis of the analysis of the experimental studies results of the process of foam breaking the authors recommend the modes and conditions of ultrasonic influence on beer foam and foam created with a blowing agent of sodium laureth sulfate type.

Erarbeitung der Ultraschallausrüstung für die Zerstörung der Schäume und die Untersuchung ihrer Funktionalmöglichkeiten

Zusammenfassung: Der Artikel ist der Erarbeitung der Ultraschallausrüstung für die Zerstörung der Schäume und der Untersuchung der Effektivität ihrer Anwendung gewidmet. Es ist die Ausrüstung mit dem Abstrahler in der Form der biegeschwingenden Scheibe geschafft. Es ist gezeigt, daß die Verwendung der Ultraschallschwingungen der hohen Intensität das Prozess der Schäumehinterlegung zu beschleunigen erlaubt. Auf Grund der Analyse der Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen des Prozesses der Abschäumung sind die Regimen und die Bedingungen der Ultraschalleinwirkung auf das Bier und den Schaum, der vom Schaumbildner des Typus des Natriumlaurethsulfates geschafft wird, empfohlen.

Elaboration de l'équipement ultra-son pour la destruction des mousses et étude de ses possibilités fonctionnelles

Résumé: L'article est consacré à l'élaboration de l'équipement ultra-son pour la destruction des mousses et à l'étude de l'efficacité de son application. Est créé l'équipement avec un irradiateur en vue d'un disque replié et agité. Est montré que l'application des oscillations ultra-son d'une haute intensivité permet d'accélérer le processus de la précipitation des mousses. A la base de l'analyse des résultats des études expérimentales du processus de la précipitation des mousses sont recommandés les régimes et les conditions de l'action ultra-son sur la mousse de la bière créée par le moussant du type de laureth sulfate du sodium.

Авторы: *Хмелев Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе; *Шалунов Андрей Викторович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации»; *Галахов Антон Николаевич* – аспирант кафедры «Методы и средства измерений и автоматизации», Бийский технологический институт (филиал), ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск.

Рецензент: *Овчаренко Александр Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, декан механического факультета Бийского технологического института (филиала), ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск.
