

УДК 66.069.8327: 66.084.08

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, М.В. Хмелев, С.С. Хмелев, Д.В. Генне,
Р.В. Барсуков, А.В. Шалунова

В статье рассмотрена разработанная конструкция ультразвуковой колебательной системы, позволяющая за счет увеличения площади излучающей поверхности повысить производительность распыления, увеличить эксплуатационную надежность системы, обеспечить ее оптимальную работу при изменении нагрузки и обеспечить возможность распыления вязких жидкостей. В результате исследований аппарат обеспечил на рабочей частоте колебательной системы в 180 кГц распыление воды с производительностью до 0,8 мл/с и средним диаметром формируемых капель 13 мкм, и распыление вязкой жидкости (18 сСт) с производительностью до 0,25 мл/с и средним диаметром формируемых капель 18 мкм. Созданное оборудование позволит существенно улучшить классические процессы, связанные с распылением жидких сред и позволит обеспечить получение новых материалов.

Ключевые слова: распыление, ультразвуковая колебательная система, жидкость.

Введение

Свойство ультразвуковых колебаний высокой интенсивности распылять жидкости в газовой среде находит широкое применение при интенсификации тепло- и массообменных процессов химической технологии. Сюда относятся, в первую очередь, мокрая очистка газов от дисперсных примесей; очистка и разделение газов, распылительная сушка, распыление реагентов в камерах для ускорения химических реакций; распыление топлив, распылении расплавов химических веществ, изготовлении мельчайших порошков и т.п. Эффективность всех перечисленных технологических процессов прямо пропорциональна получаемой суммарной поверхности взаимодействия, максимум которой достигается при обеспечении минимального размера капли при максимальной производительности распыления.

Помимо традиционных процессов химической технологии быстро развивающаяся область нанотехнологий также использует возможности ультразвукового распыления при нанесении износостойких, энергосберегающих покрытий, распылительной сушке суспензий наночастиц, распылении аэрозолей содержащих наночастицы лекарственных препаратов для обеззараживания помещений или быстрого введения в кровь через альвеолы легких, при нанесении тонких слоев лекарственных веществ (микродоз) или защитных слоев на грануляты, спансулы, таблетлируемый материал, при получении монодисперсных гранул и многое другое. Как и в случае с процессами химических технологий здесь определяющее значение имеет минимальный размер получаемых капель аэрозоля, задача получения которого осложня-

ется необходимостью обеспечения требуемой производительности распыления.

Таким образом, дальнейшее развитие ультразвуковой технологией распыления жидкостей невозможно без создания устройств, обеспечивающих уменьшение размеров создаваемого аэрозоля при одновременном повышении производительности процесса распыления.

Существующие конструкции ультразвуковых колебательных систем.

Согласно кавитационно-волновой теорией механизм получения аэрозолей ультразвуком объясняется следующим образом. На границе жидкость – газ при достаточном количестве зародышей кавитации (включений газа, твердых частичек) происходит захлопывание кавитационных полостей и образование капиллярных стоячих волн (соответствующих по размерам определенным резонансным условиям), с гребней которых после превышения пороговой амплитуды (14 мкм для воды), происходит отрыв мелких капель.

Размеры возникающих волн и гребней, а в связи с этим и размеры капель зависят от физико-химических свойств распыляемых жидкостей (в наибольшей степени – вязкости) и частоты ультразвуковых колебаний.

Частота колебаний определяет средний диаметр капель формируемого аэрозоля, который равен:

$$D = a * \lambda_k, \text{ где} \quad (1)$$

a – коэффициент пропорциональности (частично зависит от вязкости жидкости); λ_k – длина капиллярных волн, образующихся на поверхности слоя жидкости, которая равна:

$$\lambda_K = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}}, \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; ρ – плотность жидкости; f – частота УЗ колебаний.

Таким образом, наиболее очевидный путь уменьшения размеров формируемых капель – увеличение частоты распыления. Согласно имеющимся литературным источникам [1] распыление со средним диаметром капель в 40 мкм обеспечивается при частоте колебаний распылителя, равной 44 кГц. При частоте 120 кГц формируется аэрозоль со средним размером частиц 18...20 мкм, при частоте 180 кГц – 13...15 мкм, при частоте 250 кГц – 9...10 мкм. В целом зависимость размера формируемых капель жидкости от частоты распыления может быть представлена рисунком 1.

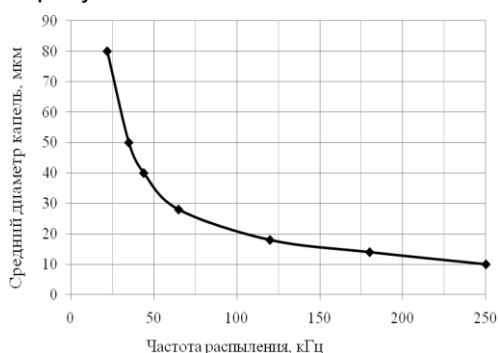


Рисунок 1 – Зависимость диаметра формируемых капель от частоты распылителя

Однако согласно выражения (3), определяющего производительность процесса распыления:

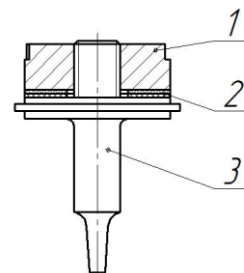
$$\Pi = a \frac{16 \pi \sigma S_{\text{изл}}}{9 \rho R^2 \max} \quad (3)$$

при этом происходит пропорциональное уменьшение производительности распыления. Так, в существующих конструкциях распылителей [2], на частоте 120 кГц производительность распыления не превышает 0,35 мл/с. Единственный возможный выход из создавшейся ситуации – увеличение площади распылительной поверхности. Однако, принципы построения существующих ультразвуковых колебательных систем, использующихся для мелкодисперсного распыления, не позволяют это осуществить. Причина заключается в следующем.

Для создания УЗ колебаний для распыления жидкостей используются как пьезоэлектрические, так и магнитострикционные колебательные системы. Ультразвуковые колебательные системы на основе пьезоэлектрических преобразователей обладают рядом неоспоримых преимуществ (меньшие габаритные размеры, более высокий КПД, во многих случаях не требуют применения принудительного охлаждения) по сравнению с магнитострикционными. По-

этому именно они получили наибольшее распространение для ультразвукового распыления.

Конструкция такой колебательной системы показана на рисунке 2.



1 – пьезоэлектрические элементы;
2 – частотнопонижающая накладка;
3 – концентратор механических колебаний
Рисунок 2 – Конструкция ультразвуковой колебательной системы для распыления

Используемая в практике ультразвуковая колебательная система выполнена по традиционной схеме преобразователя Ланжевена [3], в которой суммарная волновая длина (учитывающая различия в скоростях распространения УЗ колебаний в материалах накладки, концентратора и пьезоматериала) частотнопонижающей накладки, двух пьезоэлектрических элементов и рабочей накладки – концентратора соответствует половине длины волны формируемых колебаний. Концентратор выполнен в виде стержня ступенчато переменного диаметра. Такая полуволновая конструктивная схема позволяет объединить четвертьволновой пьезоэлектрический резонансный преобразователь и четвертьволновой концентратор механических ультразвуковых колебаний, и таким образом обеспечить не только формирование ультразвуковых колебаний, но и их усиление до величины амплитуды, достаточной для обеспечения процесса распыления.

Для увеличения амплитуды колебаний возможно конструктивное выполнение рабочей накладки в виде трехчетвертьволновой конструкции и тогда вся колебательная система имеет размер, равный двум половинам длины волны (т.е. колебательная система включает полуволновой преобразователь и полуволновой концентратор).

В такой конструкции суммарная толщина пьезоэлектрических элементов много меньше четверти длины волны формируемых ультразвуковых колебаний. Например, для колебательной системы предназначенной для формирования УЗ колебаний с частотой от 120 до 250 кГц толщина пьезоэлектрических элементов не превышает 1 мм, а вся резонансная длина колебательной системы выполненной из титанового сплава при полуволновом исполнении не превышает на частотах 120 кГц и 250 кГц 21 мм или 10 мм (при скорости распространения УЗ колебаний в титановом сплаве 5100 м/с), соответственно, а при волновом исполнении (полуволновой преобразова-

тель и полуволновой концентратор) на частотах 120 кГц и 250 кГц 42 мм или 20 мм, соответственно [4].

При этом диаметр колебательной системы не должен превышать половины длины волны формируемых колебаний в материале накладок, т.е. 20 мм (на частоте 120 кГц при скорости распространения УЗ колебаний в титановом сплаве 5100 м/с) или 10 мм на частоте 250 кГц. В противном случае, при диаметре колебательной системы много больше половины длины волны УЗ колебаний в системе будут возникать диаметральные колебания на более низких частотах, снижающие эффективность полезных толщинных колебаний и практически, исключающих возможность распыления.

Также известно, что для эффективного распыления жидких сред амплитуда колебаний торцевой распылительной поверхности должна быть более 15 мкм [5]. Для обеспечения такой амплитуды к электродам пьезоэлектрических элементов необходимо прикладывать электрическое напряжение, близкое к 1000 В. При этом обеспечивается амплитуда колебаний пьезоэлектрических элементов не более 1 мкм. Для обеспечения необходимой амплитуды колебаний торцевой поверхности используются концентраторы с коэффициентом усиления не менее 15. Столь высокое усиление можно обеспечить только при помощи ступенчатого концентратора. Поэтому, при диаметре колебательной системы в 21 мм (на частоте 120 кГц) или 10 мм на частоте 250 кГц и коэффициенте усиления ступенчатого концентратора 15, диаметр торцевой распылительной поверхности не может превышать 5 мм на частоте 120 кГц или 2,5 мм на частоте 250 кГц.

Таким образом, существующие конструкции ультразвуковых колебательных систем не позволяют обеспечить достаточную площадь распыления. По этой причине происходит существенное снижение производительности при распылении на высоких частотах. Так, если при распылении на частоте 120 кГц обеспечивается производительность (по воде) до 0,35 мл/с [4], то на частоте в 250 кГц обеспечить производительность более 0,1 мл/с невозможно. Четырехкратное уменьшение производительности вызвано уменьшением площади распылительной поверхности в 4 раза.

Помимо невозможности обеспечения достаточной площади распыления у рассмотренной конструкции ультразвуковой колебательной системы существует еще целый ряд недостатков.

1. Низкая эксплуатационная надежность, обусловленная возможностью электрического пробоя и чрезмерного нагрева (до разполяризации пьезоматериала). Этот недостаток обусловлен необходимостью подачи на пьезоэлемент толщиной в 1 мм напряжения в 1000 В и снижением добротности пьезоматериала при столь высоких напряжениях. Кроме того, выполнение концентратора УЗ колебаний в виде ступенчато переменного стержня с коэффициентом усиления 15 приводит к недопустимым механи-

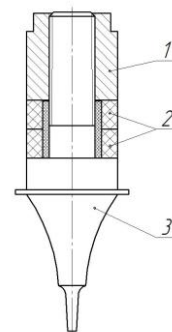
ческим напряжениям в зоне перехода и быстрому механическому разрушению этого перехода.

2. Низкая эффективность обусловленная сильной зависимостью резонансной рабочей частоты колебательной системы от нагрузки (т.е. от количества жидкости на распылительной поверхности, на конечном участке концентратора и от свойств этой жидкости) в процессе распыления из-за наличия ступенчато переменного стержня – концентратора УЗ колебаний с коэффициентом усиления до 15. В этом случае, поддержание рабочей частоты электронного генератора, соответствующей рабочей резонансной частоте колебательной системы становится невозможным, что обуславливает снижение производительности и частые срывы распыления.

3. Низкая производительность процесса распыления, обусловленная малой площадью поверхности распыления, невозможностью дальнейшего ее увеличения и увеличения амплитуды колебаний этой поверхности

Разработанная конструкция ультразвукового распылителя

Для устранения указанных недостатков в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института была разработана ультразвуковая колебательная система, показанная на рисунке 3.



1 – пьезоэлектрические элементы;
2 – частотопонижающая накладка;
3 – концентратор механических колебаний
Рисунок 3 – Конструкция разработанной ультразвуковой колебательной системы для распыления жидкостей

В разработанной конструкции ультразвуковой колебательной системы толщина каждого пьезоэлектрического элемента выбрана равной четверти длины волны формируемых колебаний в пьезоматериале, т.е. суммарная длина двух пьезоэлектрических элементов 2 соответствует половине длины волны. Таким образом, два этих пьезоэлемента представляют собой самостоятельный ультразвуковой электроакустический преобразователь, обеспечивающий формирование ультразвуковых колебаний с необходимой (заданной) рабочей частотой. Так, например, для обеспечения работы на резонансной частоте 120 кГц (при скорости распространения УЗ колебаний в пьезоматериале, равной 3600 м/с) суммарная тол-

щина двух пьезоэлементов должна быть равной 15 мм (с учетом толщины медных контактных электродов необходимы два пьезоэлемента, толщиной по 7 мм каждый). Для создания ультразвуковых колебаний с резонансной частотой в 250 кГц суммарная толщина двух пьезоэлементов должна быть равной 7,2 мм (два пьезоэлемента, толщиной по 3,5 мм каждый).

Использование пьезоэлектрических элементов, большей толщины позволяет при одинаковых прикладываемых напряжениях (до 1000В/мм) получить большее расширение, т.е. обеспечить на преобразователе большую амплитуду колебаний (от 7 мкм на частоте 120 кГц до 3,5 мкм на частоте 250 кГц. Это позволит при использовании концентратора, для дальнейшего усиления, либо уменьшить коэффициент его усиления, исключив проблемы, связанные с применением ступенчатых переходов, либо получить те же амплитуды, но на большей поверхности излучения (большем по диаметру распылительном торце), либо получить на поверхности излучения, большие амплитуды, обеспечив распыление вязких жидкостей.

Так даже использование концентратора с меньшим усилением (например, 10 вместо 15), позволит уменьшить амплитуду колебаний пьезоэлементов до 2 мкм, снизив питающее напряжение и повысив надежность колебательной системы в целом.

Для того, что бы обеспечить необходимое сжатие двух пьезоэлектрических элементов в виде дисков с центральным отверстием используется металлическая шпилька и торцевая стягивающая накладка.

Для обеспечения работы всей колебательной системы на резонансной частоте пьезокерамических элементов, резонансная частота торцевой стягивающей накладки должна соответствовать частоте преобразователя. Это обеспечено тем, что толщина торцевой стягивающей накладки соответствует половине длины волны колебаний в материале накладки, т.е. ее резонансная частота соответствует частоте преобразователя.

Продольный размер концентратора также выбран соответствующим резонансной частоте пьезоэлементов, т.е. он выполнен равным одной или двум полуволнам формируемых колебаний в материале накладки.

Для уменьшения механических напряжений, возникающих в местах переходов концентратора имеет плавные радиальные или экспоненциальные переходы в середине каждого полуволнового участка. Плавные переходы снижают зависимость резонансной частоты от нагрузки, что позволяет обеспечить работу колебательной системы в оптимальном режиме – т.е. всегда на резонансной частоте.

Незначительное уменьшение коэффициента усиления концентратора, компенсируется большей амплитудой колебаний пьезоэлементов. Так, напри-

мер, при обеспечении амплитуды колебаний пьезопреобразователя на частоте в 120 кГц в 5 мкм и использовании концентратора с коэффициентом усиления 10 можно обеспечить: амплитуду колебаний торцевой поверхности диаметром в 5 мм равной 50 мкм или обеспечить амплитуду колебаний в 15 мкм на излучающей поверхности диаметром более 10 мм (площадь поверхности распыления увеличивается в 4 раза).

Таким образом, увеличение площади излучающей поверхности позволяет повысить производительность распыления, увеличить эксплуатационную надежность системы, обеспечить ее оптимальную работу при изменениях нагрузки и обеспечить возможность распыления вязких жидкостей.

Экспериментальные исследования эффективности распыления

На основе разработанной конструкции была создана ультразвуковая колебательная система с резонансной частотой 180 кГц. На рисунке 4 а показан внешний вид созданной колебательной системы, на рисунке 4 б приведено фото ультразвукового распылителя изготовленного на ее основе.



а)



б)

а – ультразвуковая колебательная система для распыления;

б – ультразвуковой распылитель в сборе

Рисунок 4 – Разработанное оборудование

Для проведения экспериментальных исследований эффективности созданной колебательной системы распыления был создан специальный лабораторный стенд, схематически показанный на рисунке 5.

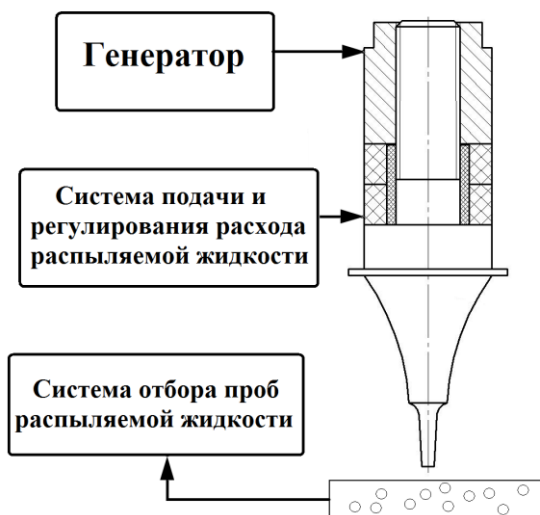


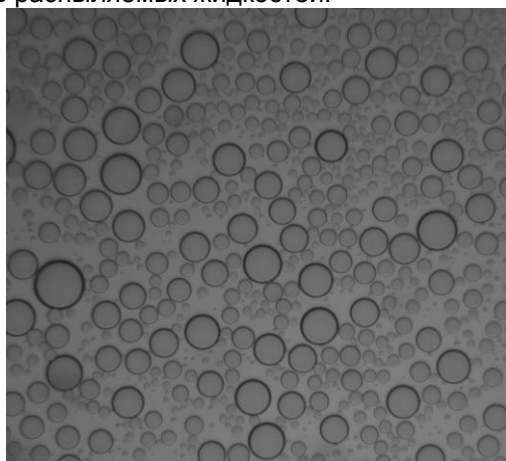
Рисунок 5 – Лабораторный стенд

Лабораторный стенд включает в себя: ультразвуковую колебательную систему (УЗКС), электронный генератор ультразвуковой частоты для питания УЗКС, систему подачи и регулирования расхода распыляемой жидкости, систему отбора проб распыляемой жидкости.

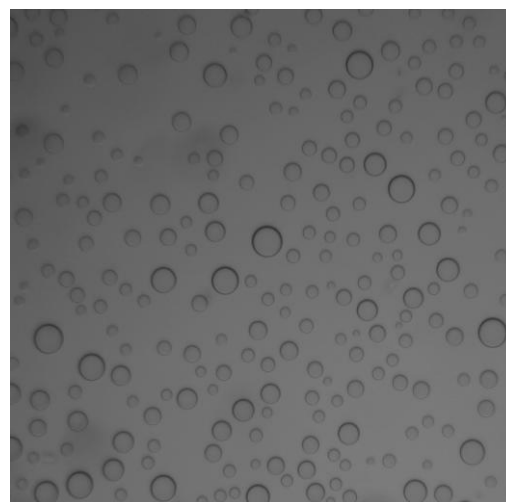
Отбор проб осуществлялся методом улавливания капель иммерсионной средой [4-5], с последующим измерением размеров капель при помощи микроскопа МИКМЕД-6 с установленным цифровым фотоаппаратом. Для этого, предметное стекло покрывалось слоем вязкой жидкости, в которой капли распыляемой жидкости не растворяются достаточно продолжительное время. В качестве иммерсионной среды использовалось трансформаторное масло [5].

В качестве распыляемых жидкостей использовались вода и водный раствор этиленгликоля с вязкостью 18 сСт.

На рисунке 6 показаны полученные фотографии капель распыляемых жидкостей.



а)



б)

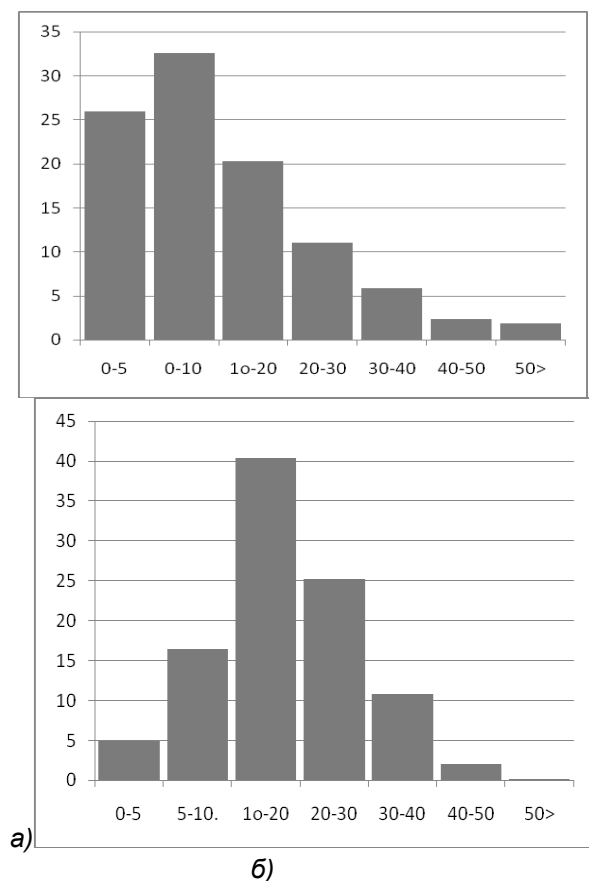
а – вода; б – этиленгликоль

Рисунок 6 – Фото капель распыляемых жидкостей уловленных иммерсионной средой

Меньшее количество капель распыленной жидкости на рисунке 6.б свидетельствует о меньшей производительности распыления.

После обработки экспериментальных данных были получены гистограммы (рисунок 7) распределения получаемых капель по размерам для каждой жидкости. Объем выборки для каждого эксперимента составлял 3000 капель.

Представленная на рисунке 7.а гистограмма показывает, что 90% капель распыленной воды имеют размер менее 30 мкм. При этом гистограмма значительно смещена в область малых диаметров (25% капель имеют размер менее 5 мкм). Это говорит о высокой дисперсности получаемого распыла, недостижимого в других известных конструкциях ультразвуковых распылителей. При этом максимальная производительность распыления равнялась 0,8 мл/с, что не достижимо другими распылителями на этой частоте (180 кГц). Средне медианный диаметр формируемых капель равняется 13 мкм, что превосходит результаты работы лучших зарубежных аналогов [4].



а – вода; б – этиленгликоль

Рисунок 7 – Гистограммы распределения капель

Гистограмма распределения (рисунок 7.б) капель жидкости большей вязкости (этиленгликоля) имеет значительно меньшую ширину, что свидетельствует о высокой монодисперсности распыления. Полностью отсутствуют крупные капли (более 50 мкм), и практически не образуются мелкие капли (менее 5 мкм). Приблизительно 80% все формируемых капель лежит в диапазоне 5...25 мкм, а средне медианный диаметр равняется 18 мкм.

Полученное значение среднего диаметра капель для вязкой жидкости (этиленгликоль) превосходит аналогичный показатель, полученный для распыленной воды, что в общем-то, противоречит имеющимся литературным данным (для ультразвукового распыления жидкостей на частотах 22...44 кГц). Это расхождение может быть объяснено значительно большей амплитудой колебаний УЗКС, требующейся для распыления вязких жидкостей на частоте в 180 кГц. А, как известно, увеличение амплитуды колебаний УЗКС вызывает увеличение диаметра формируемых капель жидкости. Так на частоте 22 кГц для распыления этиленгликоля требуется 15% увеличение амплитуды в сравнении с распылением воды, в то время как на частоте 180 кГц потребовалась практически 50% увеличение амплитуды колебаний, что не могло не привести к увеличению среднего диаметра формируемых капель.

Производительность распыления равнялась 0,25 мл/с. В настоящее время авторам не известно наличие работающих ультразвуковых распылителей, способных распылять вязкие жидкости на частотах 180 кГц и более.

Заключение

Таким образом, созданный аппарат ультразвукового распыления, имея повышенную эксплуатационную надежность позволил повысить эффективность процесса распыления, обеспечив тем самым возможность распыления вязких жидкостей.

Ультразвуковой аппарат для распыления жидких сред аппарат обеспечил на рабочей частоте колебательной системы в 180 кГц распыление воды с производительностью до 0,8 мл/с и средним диаметром формируемых капель 13 мкм, и распыление вязкой жидкости (18 сСт) с производительностью до 0,25 мл/с и средним диаметром формируемых капель 18 мкм.

Созданное оборудование позволит существенно улучшить классические процессы, связанные с распылением жидких сред и позволит обеспечить получение новых материалов.

Список литературы:

1. Экнадиосянц, О. К. Получение аэрозолей. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970.
2. Ultrasound Company [Electronic resource]. – Sono-Tek Corporation. – Режим доступа: <http://www.sono-tek.com/>.
3. Хмелев В.Н. [Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в промышленности](#) [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.Н. Сливин, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Барнаул: АлтГТУ, 2010. – 196 с.
4. Ultrasonic atomizing nozzle and method [Text];pat: 7712680 USA: ICL B05B 1/08/ Berger, Harvey L., Mowbray, Donald F., Copeman, Randy A., Russell, Robert J., Sono-Tek Corporation; app.num 11/341616; app 30.01.2006, pub. 11.05.2010
5. Хмелев В.Н. [Ультразвуковое распыление жидкостей](#) [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, А.В. Шалунова. – Барнаул: АлтГТУ, 2010. – 272 с.
Д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе [Хмелёв В.Н.](#), тел. (3854) 432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.
К.т.н., доцент, доцент [Шалунов А.В.](#) тел. (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.
Ведущий инженер [Хмелёв М.В.](#) тел. (3854)432570, e-mail: maxx@bti.secna.ru.
Инженер [Хмелёв С.С.](#) тел. (3854)432570, e-mail: ssh@bti.secna.ru.
Инженер [Генне Д.В.](#) тел. (3854)432570, e-mail: gdv@bti.secna.ru.
К.т.н., доцент, доцент [Барсуков Р.В.](#), тел. (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru.
Аспирант [Шалунова А.В.](#) тел. (3854)432570, e-mail: shalunishki@mail.ru,
Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ.