

3. Использование лазерного монитора позволяет визуализировать процесс горения и определить скорость распространения теплового фронта, что является актуальной задачей при синтезе пористых композиционных материалов.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки, проект: РНП.2.1.2/13145.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Отдела макрокинетики ТНЦ СО РАН, г. Томск, А.И. Кирдяшкину, В.Г. Саламатову, Р.А. Юсупову и В.Д. Китлеру за предоставленную возможность протестировать созданное устройство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Торгаев С.Н. Скоростная визуализация микрообъектов посредством активных сред лазеров на парах // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315. — № 4. — С. 141–146.
2. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Заикин С.С. Лазер на парах бромида меди с частотой следования импульсов 400 кГц // Известия Томского политехнического университета. — 2008. — Т. 312. — № 12. — С. 106–107.
3. Седатэк. 2011. URL: <http://sedatec.ru/ru/products/hsi/625972/> (дата обращения 27.01.2011).
4. Пасманик Г.А., Земсков К.И., Казарян М.А. и др. Оптические системы с усилителями яркости. — Горький: ИПН АФ СССР, 1988. — 173 с.

5. Абрамов Д.В., Аракелян С.М., Галкин А.Ф., Климовский И.И., Кучерик А.О., Прокошев В.Г. О возможности исследования временной эволюции рельефа поверхностей, подвергающихся воздействию мощных потоков энергии, непосредственно во время воздействия // Квантовая электроника. — 2006. — Т. 36. — № 6. — С. 569–571.
6. Морозова Е.А., Прохоров А.М., Савранский В.В., Шафеев Г.А. Скоростная покадровая регистрация изображений биологических объектов с использованием лазерного проекционного микроскопа // Доклады АН СССР. — 1981. — Т. 261. — № 6. — С. 1460–1462.
7. Юсупов Р.А., Максимов Ю.М., Китлер В.Д. Закономерности технологического горения порошковых систем на минеральной основе при получении пористых композиционных материалов // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38. — № 5. — С. 85–89.

Поступила: 27.01.2011 г.

УДК 66.069.8327:66.084.08

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Д.В. Генне, А.В. Шалунова, Р.Н. Голых

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»
E-mail: vnh@bti.secna.ru

Статья посвящена созданию новых типов мелкодисперсных распылителей, действие которых основано на реализации многократного поверхностного или высокочастотного ультразвукового воздействия на вязкие и дисперсные жидкости. Предложены и разработаны новые конструкции ультразвуковых колебательных систем, позволяющих уменьшить диаметр формируемых капель, повысить производительность распыления, увеличить эксплуатационную надежность распылителей и обеспечить возможность распыления вязких жидкостей с заданной производительностью.

Ключевые слова:

Ультразвук, распыление, аэрозоль, пьезоэлектрическая колебательная система.

Key words:

Ultrasonic, atomization, aerosol, piezoelectric oscillation system.

Распыление жидкостей и напыление различных покрытий является основой значительного количества технологических процессов в производствах, относящихся, в первую очередь, к высокотехнологичным секторам экономики. Это технологические процессы распыления рабочих жидкостей для контроля износа двигателей в установках спектрального анализа в авиационном двигателестроении, нанесение фоторезистов при производстве модулей памяти, микросхем и процессоров, химико-механическое полирование полупроводниковых пластин — заготовок для производства полупроводниковых компонентов в микроэлектронной промышленности, нанесение полирую-

щих жидкостей и покрытий в оптико-электронном приборостроении, нанесение покрытий на сердечные клапаны и стенты коронарных сосудов в медицинской промышленности [1], нанесение дезинфицирующих покрытий при производстве медицинской техники и имплантов, дезинфекции помещений, получение наночастиц и нанесение нанопокровов в производстве функциональных наноматериалов, распыление нейтральных или специальных материалов для коагуляции взрыво-, пожаро- и химически опасных аэрозолей, распыление жидких удобрений, стимуляторов роста и гербицидов при выращивании сельскохозяйственной и садовоогородной продукции, рас-

пыление жидких ароматических и лекарственных препаратов (например, антибиотиков) в помещениях птичников, свинарн и коровников. Для эффективной реализации современных технологий необходимо создание аэрозолей с повышенными требованиями по монодисперсности, плотности факела распыла и размерам формируемых капель. При этом наиболее распространенные типы распылителей и способы распыления (гидравлический, пневматический, электростатический и др.) не позволяют создавать мелкодисперсные аэрозоли с необходимыми размерами частиц и требуемой производительностью.

Проблема может быть решена за счет применения ультразвукового (УЗ) способа распыления. Его уникальными преимуществами являются: низкая энергоемкость, высокая производительность, возможность обеспечения мелкодисперсного и монодисперсного распыления, формирование факела распыления произвольной формы (например, прямоугольной или треугольной), отсутствие необходимости в распыливающем агенте (газ, воздух и т. д.), возможность распыления высоковязких жидкостей (без использования растворителей) и расплавов металлов, высокое качество и равномерность получаемых покрытий; наличие в каплях жидкости циркуляционных токов, способствующих ускорению процессов теплообмена, массопереноса на поверхности капли [2].

На сегодняшний день существует два метода УЗ распыления жидкостей. Первый основан на применении высокочастотных УЗ колебаний (3...5 МГц), фокусируемых в слое жидкости и вызывающих образование на ее поверхности фонтана, из которого происходит распыление. Этот метод обеспечивает формирование частиц с размерами до 3...5 мкм, но имеет значительные ограничения по производительности (не более 1 мл/мин) и вязкости распыляемых жидкостей (не более 1 сСт). Такие ограничения обуславливают его практическое применение только в медицинских ингаляторах и бытовых увлажнителях воздуха [2, 3].

Второй метод — метод низкочастотного распыления, основан на воздействии УЗ колебаниями на слой жидкости, находящийся на колеблющейся поверхности. Возникающие при этом колебания тонкого слоя обеспечивают его распыление. Такой метод не имеет принципиальных ограничений по производительности и обеспечивает распыление высоковязких жидкостей (до 30 сСт), однако формируемые капли имеют значительный размер (до 80 мкм на частоте 22 кГц).

Практическому применению и широкому распространению ультразвукового низкочастотного распыления в высокотехнологичных отраслях промышленности препятствует целый ряд нерешенных проблем, присущих используемому оборудованию, а именно невозможность:

- уменьшения диаметра формируемых капель при сохранении или увеличении производительности распыления;

- увеличения допустимых значений вязкости распыляемых жидкостей (поскольку значительное количество жидкостей, подлежащих распылению, являются высоковязкими);
- увеличения производительности распыления, особенно вязких жидкостей (более 1 мл/с, с поверхности в 1 см²).

Однако, благодаря отсутствию принципиальных ограничений по производительности (определяется только площадью колеблющейся поверхности) и вязкости распыляемых жидкостей, этот метод получил наибольшее распространение, и большинство современных научных исследований направлены на его совершенствование и практическую реализацию.

Нерешенность перечисленных проблем обуславливается тем, что все ультразвуковые распылители, производимые как в России, так и за рубежом («Sono-Tek», «Sonic», «Sonaer», «Misonix Inc.») построены на общем принципе, разработанном в еще 60-е гг. прошлого века. Ультразвуковые низкочастотные распылители состоят из электронного генератора и ультразвуковой колебательной системы, конструктивно выполненной в виде последовательно установленных и акустически связанных между собой пьезоэлектрических элементов и частотнопонижающих металлических накладок [4].

Использование такой конструктивной схемы, даже в самых современных УЗ распылителях фирмы Sono-Tek [5] (признанный мировой лидер), не позволяет создать распылители с рабочей частотой более 120 кГц, (обычно 22...44 кГц), распылительной поверхностью диаметром более 1...3 мм, способные обеспечить формирование аэрозоля со средним размером частиц менее 18 мкм и производительностью более 0,35 мл/с при вязкости более 1 сСт.

Предпринимаемые попытки уменьшения диаметра формируемых капель путем повышения рабочей частоты распылителей не позволяют достичь желаемых результатов, поскольку требует значительного уменьшения продольных размеров УЗ колебательных систем и пьезоэлектрических элементов и приводит к малой амплитуде колебаний (малое относительное удлинение) распылительной поверхности.

Необходимость обеспечения достаточной для распыления амплитуды вызывает необходимость увеличения коэффициента усиления колебательной системы за счет уменьшения поверхности распыления и применения ступенчатого концентратора (рис. 1). Однако, достигаемые при этом амплитуды колебаний оказываются недостаточными для обеспечения возможности распыления вязких жидкостей или обеспечения приемлемой производительности распыления не вязких жидкостей.

В конструкции, рис. 1, а, суммарная толщина пьезоэлектрических элементов много меньше четверти длины волны формируемых ультразвуковых колебаний. Таким образом, в колебательных системах, предназначенных для формирования УЗ коле-

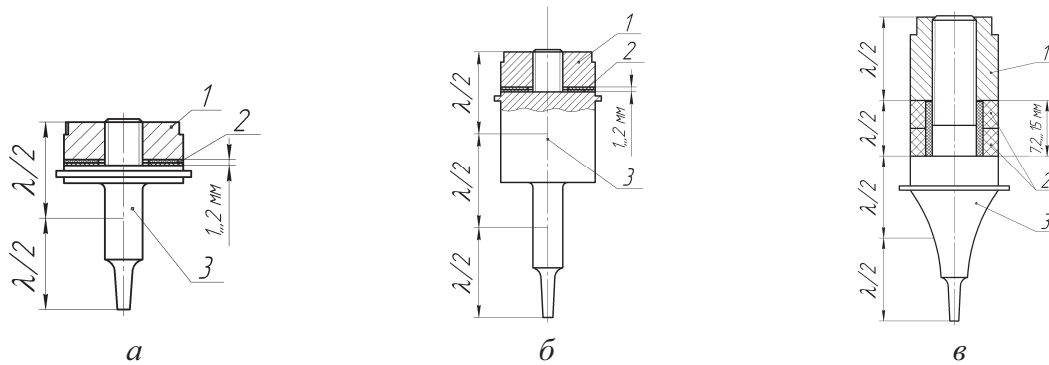


Рис. 1. Существующие конструкции ультразвуковых колебательных систем для распыления, выполненные по различным конструктивным схемам: а) двух полуволновая; б) трех полуволновая; в) разработанная конструкция; 1) частотопонижающая накладка; 2) пьезоэлектрические элементы; 3) концентратор механических колебаний

баний с частотами 120 или 250 кГц, резонансная длина систем, выполненных из титановых сплавов в полуволновом исполнении не превысит 21 мм (120 кГц) и 10 мм (250 кГц), соответственно при толщине пьезоэлектрических элементов не более 1 мм. При волновом исполнении (рис. 1, а) колебательной системы – 42 или 20 мм, соответственно [6].

При этом диаметр колебательной системы не может 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 в системе будут возникать диаметральные колебания на более низких частотах, снижающие эффективность полезных толщинных колебаний и практически, исключающие возможность распыления.

Известно, что для эффективного распыления жидких сред амплитуда колебаний торцевой распылительной поверхности должна быть более 15 мкм [7, 8]. Для обеспечения такой амплитуды к электродам пьезоэлектрических элементов толщиной в 1 мм необходимо прикладывать электрическое напряжение, близкое к 1000 В. При этом обеспечивается амплитуда колебаний пьезоэлектрических элементов не более 1 мкм. Для обеспечения достаточной для распыления амплитуды колебаний торцевой поверхности используются концентраторы с коэффициентом усиления не менее 15. Столь высокое усиление обеспечивается только при использовании 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, соответственно 5 мм на частоте 120 кГц и 2,5 мм на частоте 250 кГц.

Для обеспечения большего коэффициента усиления на практике используются колебательные системы, в виде трех полуволновых (рис. 1, б) конструкций, в которых два ступенчатых концентратора установлены последовательно. Такая конструкция не позволяет решить проблемы, поскольку имеет ряд недостатков, связанных:

- 1) с низкой эксплуатационной надежностью, обусловленной высокой вероятностью электрического пробоя и чрезмерного нагрева (до разполяризации пьезоматериала). Это вызвано 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 и более приводит к недопустимым механическим напряжениям в зоне перехода и быстрому механическому разрушению материала в зоне этого перехода;
- 2) с низкой эффективностью работы, обусловленной 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 использования ступенчатого концентратора УЗ колебаний с коэффициентом усиления до 15. Поддержание рабочей частоты электронного генератора, соответствующей рабочей резонансной частоте колебательной системы становится невозможным, наблюдается снижение производительности и возникают частые срывы процесса распыления;
- 3) с низкой производительностью процесса распыления, обусловленной малой площадью поверхности распыления, невозможностью дальнейшего ее увеличения и невозможностью увеличения амплитуды колебаний этой поверхности.

Таким образом, применение известных десятилетиями схем построения распылителей не позволяет создать ультразвуковые распылители вязких жидкостей, удовлетворяющие современным требованиям производств. Поэтому для устранения указанных проблем недостатков в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института был разработан и исследован ряд новых технических решений и новых конструктивных схем колебательных систем.

На рис. 1, в представлена одна из разработанных конструктивных схем, для высокочастотного распыления (до 250 кГц) жидкостей средней вязкости (до 18 сСт). В разработанной УЗ колебательной системе устраняются главные недостатки известных конструктивных схем — малая толщина пьезоэлектрических элементов и наличие ступенчатого концентратора с коэффициентом усиления 15 и более.

Как видно из рис. 1, в, в новой конструктивной схеме выполнения колебательной системы толщина каждого пьезоэлектрического элемента выбрана равной четверти длины волны формируемых колебаний в пьезоматериале, т. е. суммарная длина двух пьезоэлектрических элементов поз. 2 соответствует половине длины волны. Таким образом, два этих пьезоэлемента представляют собой самостоятельный 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 толщина 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 1000 В/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 позволяет 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, при использовании концентратора с меньшим коэффициентом усиления (например, 10 вместо 15), возможно уменьшить амплитуду колебаний пьезоэлементов до 2 мкм, снизив питающее напряжение и повысив надежность системы в целом.

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 пьезо-

оэлементов, он выполнен равным двум полуволнам формируемых колебаний в материале накладки. Для уменьшения механических напряжений, возникающих в местах переходов концентратора он 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, например, 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 в 15 мкм на излучающей поверхности диаметром более 10 мм (площадь поверхности распыления увеличивается в 4 раза).

Таким образом, созданная конструкция колебательной системы позволяет увеличить площадь излучающей поверхности, повысить производительность распыления, увеличить эксплуатационную надежность системы, обеспечить ее оптимальную работу при изменениях нагрузки и возможность распыления более вязких жидкостей по сравнению с имеющимися аналогами.

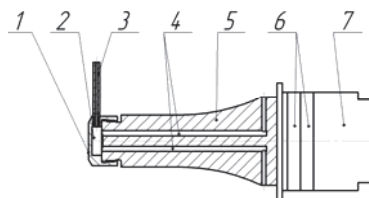


Рис. 2. Конструкция ультразвуковой колебательной системы для высокочастотного распыления жидкостей: 1) распылительная камера; 2) внутренний объем распылительной камеры; 3) распылительная игла; 4) каналы для подачи распыляемой жидкости и транспортирующего газа; 5) концентратор; 6) пьезоэлементы; 7) отражающая накладка

На рис. 2 представлена разработанная конструкция ультразвуковой колебательной системы для распыления высоковязких жидкостей (до 40 сСт). В основе этой конструкции лежит новый, разработанный авторами принцип многократного поверхностного и высокочастотного ультразвукового воздействия позволяющей на относительно низкой частоте ультразвукового воздействия (22...60 кГц) получать размеры капель от 5 до 20 мкм. Его суть заключается в том, что жидкость подается в распылительную камеру, где распыляется с колеблющейся поверхности дна и стенок камеры. Сформированный в результате первичного распыления аэрозоль выносится из камеры воздушным потоком через внутренний канал распылительной иглы, которая механически соединена



Рис. 3. Созданные ультразвуковые распылители: а) высокочастотный распылитель (180 кГц); б) мелкодисперсный распылитель вязких жидкостей (44 кГц)

со стенкой колеблющейся камеры и совершает сложные колебания с максимальной амплитудой на свободном конце иглы. На внутренних стенках иглы и на ее свободном конце (торцевом срезе) происходит вторичное распыление жидкости. Вторичное распыление капель приводит к дополнительному уменьшению среднего размера получаемого аэрозоля. Кроме того применение тонких распылительных трубок позволяет сформировать узконаправленный поток аэрозоля.

Отличительной особенностью разработанной колебательной системы является выполнение двух каналов — один из которых предназначен для подачи распыляемой жидкости, а другой для подачи транспортирующего газа. Введение распыляемой жидкости и транспортирующего газа осуществляется в минимуме ультразвуковых колебаний системы и поэтому не влияет на работоспособность и параметры системы. Выход каналов на колеблющейся поверхности, во внутреннем объеме распылительной камеры обеспечивает первичное распыление. Небольшой объем распылительной камеры позволяет исключить коагуляцию первичного аэрозоля и обеспечивает подачу его в распылительную иглу, закрепленную в стенке распылительной камеры.

Предложенное конструктивное решение позволяет обеспечить средний размер капель от 10 до 20 мкм при работе на частотах от 20 до 60 кГц с производительностью до 0,2 мл/с, при вязкости жидкости до 40 сСт. На основе разработанных УЗ колебательных систем были созданы распылители, рис. 3.

Были определены характеристики распыла получаемого при помощи каждого из распылителей. Отбор проб осуществлялся методом улавливания капель иммерсионной средой [8], с последующим измерением размеров капель при помощи микроскопа МИКМЕД-6 с установленным цифровым фотоаппаратом. В качестве распыляемых жидкостей для высокочастотного распылителя использовались вода и водный раствор этиленгликоля с вязкостью 18 сСт, для распылителя высоковязких жидкостей — авиационное масло с вязкостью 40 сСт.

После обработки экспериментальных данных были получены гистограммы (рис. 4) распределения получаемых капель по размерам для каждой жидкости. Объем выборки для каждого эксперимента составлял 3000 капель.

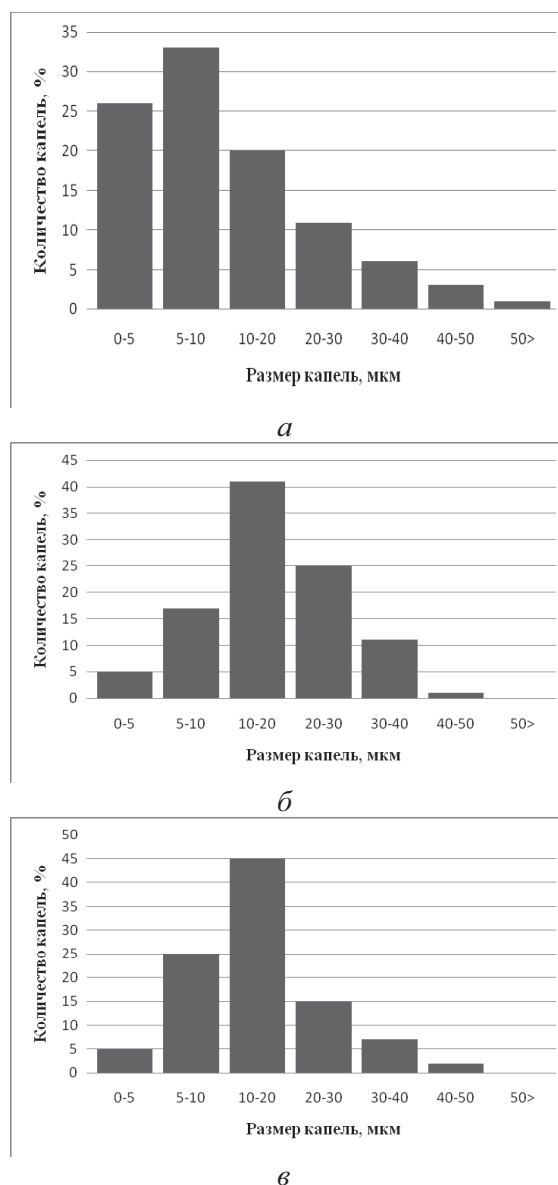


Рис. 4. Гистограммы распределения формируемых капель: а) вода; б) этиленгликоль; в) масло

Представленная на рис. 4, 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 гово-

рит 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 [5].

Гистограмма распределения (рис. 4, б) капель жидкости большей вязкости (этиленгликоля) имеет значительно меньшую ширину, что свидетельствует о высокой монодисперсности распыления. Полностью отсутствуют крупные брызги (более 50 мкм), и практически не образуются мелкие капли (менее 5 мкм). Приблизительно 80 % всех 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. Это может быть объяснено значительно большей амплитудой колебаний, требующейся для распыления вязких жидкостей на частоте в 180 кГц. Производительность распыления равнялась 0,25 мл/с. В настоящее время авторам не известно об ультразвуковых распылителях, способных распылять вязкие жидкости на частотах 180 кГц и более.

Распределение диаметров капель (рис. 4, в), полученное для мелкодисперсного распылителя высоковязких жидкостей, имеет ярко выраженный максимум на размере капель 10...20 мкм. Средне медианный диаметр формируемых капель равняется

16 мкм. Фактический разброс формируемых капель составляет от 5 до 40 мкм, т. е. обеспечивает монодисперсность распыления. Таким образом, применение многократного поверхностного и высокочастотного ультразвукового воздействия обеспечивает получение частиц высоковязких жидкостей, соответствующих по размерам высокочастотному распылению, позволяя при этом распылять жидкости с вязкостью до 40 сСт.

В результате проведенных исследований были разработаны новые конструкции ультразвуковых распылителей, позволившие повысить эффективность процесса распыления за счет повышения рабочей частоты распылителя, уменьшения диаметра формируемых капель, увеличения производительности распыления и допустимых значений распыляемых жидкостей. Так высокочастотный распылитель (180 кГц) обеспечил 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 13 мкм. Распылитель высоковязких жидкостей на частоте 44 кГц, за счет многократного поверхностного распыления обеспечил распыление масла с вязкостью 40 сСт со средним диаметром формируемых капель 15 мкм.

Созданное оборудование позволит существенно повысить эффективность производственных процессов, связанных с распылением жидких сред и обеспечить получение новых материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-369.2011.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stent Coating // Sono-Tek Corporation. 2011. URL: http://www.sono-tek.com/medical/subcategory/stent_coating (дата обращения 14.02.2011).
2. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Шалунова А.В. Ультразвуковое распыление жидкостей. — Барнаул: АлтГТУ, 2010. — 272 с.
3. Ультразвуковой аэрозольный аппарат: пат. 98945 Рос. Федерация. № 2010122218/13; заявл. 31.05.10; опубл. 10.11.10, Бюл. № 31. — 4 с.
4. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в промышленности — Барнаул: АлтГТУ, 2010. — 196 с.
5. Ultrasonic atomizing nozzle and method: pat. 7712680 USA. № 11/341616; Filed: Jan 30, 2006; Data of Patent: May 11, 2010. — 9 p.
6. Хмелев В.Н., Шалунов А.В., Хмелев М.В., Хмелев С.С., Генне Д.С., Барсуков Р.В., Шалунова А.В. Разработка высокочастотных ультразвуковых колебательных систем для мелкодисперсного распыления жидкостей // Ползуновский вестник. — 2010. — № 3. — С. 315—320.
7. Ультразвуковой распылитель: пат. 2388500 Рос. Федерация. № 2008142639/14; заявл. 27.10.08; опубл. 10.05.10. — 5 с.
8. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. — М.: Наука, 1968. — 688 с.

Поступила 10.03.2011 г.