

8 РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ ЖИДКОСТИ

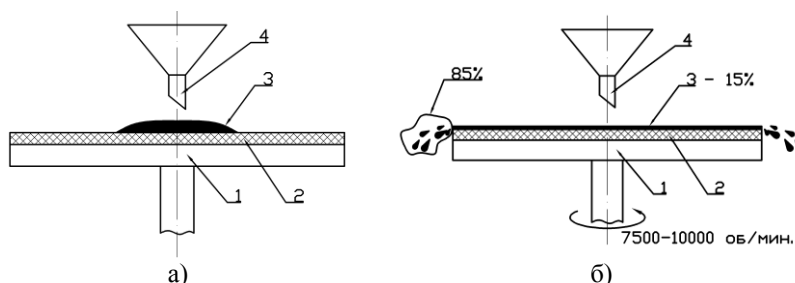
Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процесса ультразвукового распыления жидкостей, разработка новых технических и схемных решений, проектирование электронных ультразвуковых генераторов с учетом особенностей реализации процесса ультразвукового распыления, создание способа и алгоритма управления работой ультразвуковых распылителей позволили разработать специализированное оборудование для реализации различных технологических процессов.

8.1 Разработка ультразвуковых распылителей для нанесения фоточувствительного слоя на поверхность кремниевой пластины

Современное производство полупроводниковых схем представляет собой многоэтапный процесс, одним из основных этапов которого является литография. Литография включает в себя процесс нанесения на поверхность кремниевой пластины фоточувствительного слоя с последующим его экспонированием и травлением.

Нанесение на поверхность пластины слоя фоторезиста осуществляется, как правило, при помощи ротационного способа, который заключается в обеспечении в центре горизонтально расположенной полупроводниковой пластины фоторезиста с объемом, значительно превосходящим необходимый для покрытия пластины (рисунок 8.1, а). Затем осуществляется вращение пластины в горизонтальной плоскости, с частотой не менее 7500–1000 оборотов в минуту (рисунок 8.1, б). При этом под действием центробежных сил осуществляется равномерное распределение фоторезиста по поверхности пластины. Однако при этом происходит потеря до 85 % первоначального объема фоторезиста, что является основной проблемой технологии.

Возможным способом уменьшения потерь является использование распыления фоторезиста. Однако существующие «классические» способы распыления непригодны из-за специфических требований к технологии процесса [133]. В этих условиях ультразвуковой способ становится единственно возможным для распыления фоторезиста. Для практической реализации ультразвукового способа распыления фоторезиста было изготовлено специализированное оборудование, основным требованием к которому являлось обеспечение равномерного покрытия поверхности пластины при минимальных потерях фоторезиста и минимальной модернизации существующего оборудования.



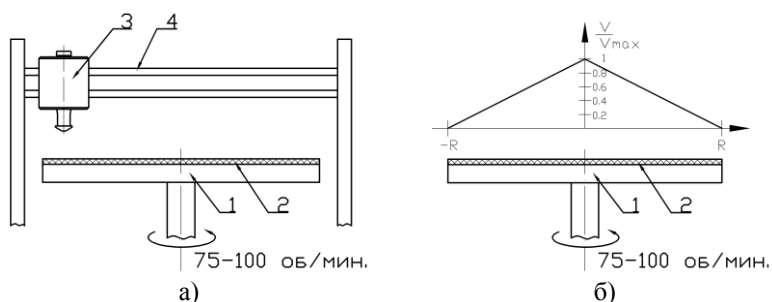
1 – устройство вращения; 2 – кремниевая пластина;
3 – слой фоторезиста; 4 – бункер
а – начальная стадия; б – рабочая стадия

Рисунок 8.1 – Схематические изображения существующего способа нанесения фоторезиста

Экспериментальное исследование возможностей созданного оборудования производилось в два этапа: на первом этапе распыление производилось с отключенной функцией оптимизации ультразвукового распыления, при этом оптимальные режимы распыления определялись оператором, на втором – с оптимизацией распыления согласно предложенному способу управления ультразвуковым распылением. Внешний вид оборудования показан в Приложении А на рисунках А.1, А.2 и А.3.

Устройство перемещения необходимо для обеспечения движения УЗКС вдоль поверхности полупроводниковой пластины (рисунок 8.2, а).

В результате проведения обработки результатов эксперимента было установлено, что применение ультразвукового распыления позволяет уменьшить потери фоторезиста на 70–73 % [134]. Однако при отключенной функции оптимизации качество покрытия поверхности в центре полупроводниковой пластины снижается. Это происходит в первую очередь из-за высоких скоростей движения УЗКС относительно поверхности полупроводниковой пластины, что вызывает смещение факела распыления и изменение его плотности (рисунок 8.3).



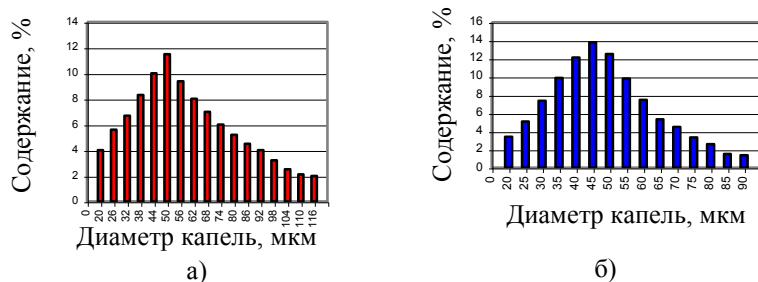
1 – устройство вращения; 2 – кремниевая пластина;
 3 – ультразвуковая колебательная система;
 4 – устройство перемещения
 а – эскиз экспериментальной установки; б – профиль скорости
 Рисунок 8.2 – Схема перемещения УЗКС относительно пластины



Рисунок 8.3 – Изменение формы факела распыления при движении ультразвуковой колебательной системы

При осуществлении распыления с оптимизацией скорость перемещения УЗКС оставалась постоянной. При этом отсутствовало изменение формы и плотности распределения капель в факеле распыления.

Кроме этого, проведенный специалистами аналитической лаборатории SUDO-PREMIUM фирмы SAMSUNG (Корея) сравнительный анализ распределения капель показал уменьшение дисперсности распыла при осуществлении распыления по предложенному способу (рисунок 8.4).



а – без оптимизации ультразвукового воздействия;
 б – с оптимизацией ультразвукового воздействия
 Рисунок 8.4 – Гистограмма распределения капель жидкости

Уменьшение дисперсии капель при управлении распылением на основе предложенного способа объясняется тем, что в первом случае при установлении необходимой амплитуды распыления вручную оператор для обеспечения стабильности процесса распыления несколько завышает величину амплитуды колебаний УЗКС, по сравнению с необходимой. Так, амплитуда УЗ колебаний, установленная оператором, равнялась 14 мкм, тогда как минимально необходимая, определенная на основе предложенного способа управления, равнялась 10 мкм.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что:

– применение созданного ультразвукового распылителя для покрытия поверхности полупроводниковой пластины фоторезистом позволяет снизить потери фоторезиста на 70–73 % по сравнению с ротационным спо-

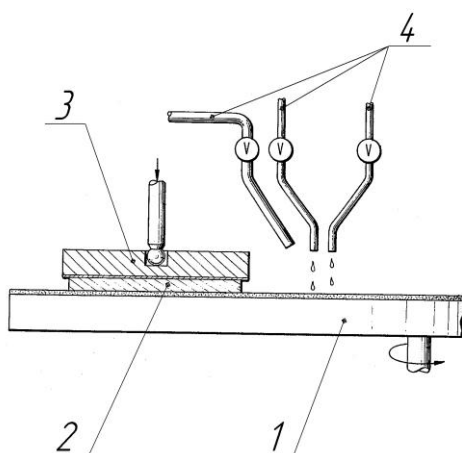
собом;

– применение разработанного способа для управления процессом распыления [135, 136] позволяет добиться качества покрытия поверхности, не уступающего ротационному способу, что делает возможным промышленное применение ультразвукового способа нанесения фоторезиста.

8.2 Разработка ультразвуковых распылителей для химико-механического полирования полупроводниковых пластин

Технология химико-механического полирования используется для улучшения качества формируемой структуры при нанесении нескольких слоев металла (соединителей активных элементов кристалла) на кремниевую подложку. Полировка поверхности подложки перед нанесением очередного слоя металла осуществляется с помощью специальных жидкостей, содержащих частицы абразивного материала и щелочные химические вещества.

В настоящее время (рисунок 8.5) время химико-механическое полирование заключается в обеспечении относительного движения полировального круга и полупроводниковой пластины, с одновременной подачей жидкого полировального состава на поверхность полировального круга [137].



1 – полирующий круг; 2 – полупроводниковая пластина; 3 – устройство перемещения и удержания полируемой полупроводниковой пластины; 4 – устройство подачи жидкости

Рисунок 8.5 – Схема реализации процесса химико-механического полирования

Полировальный состав подается по трубке, снабженной регулятором расхода. При этом распределение состава по поверхности полировального круга происходит под действием центробежных сил, возникающих при вращении последнего. На основе проведенного исследования [138] было установлено, что такая организация процесса химико-механического полирования имеет следующие недостатки:

- не позволяет реализовать все возможности СМР технологии из-за неравномерного распределения полировальной жидкости по поверхности полирующего круга;
- высокие непроизводительные потери полировальной жидкости, вызванные несовершенством системы ее подачи;
- увеличенное потребление расходных материалов, вызванное избыточным покрытием полировальной жидкостью поверхности полирующего круга.

В результате теоретических исследований было установлено, что одним из возможных путей решения проблемы является модернизация системы подачи жидкости, основанная на использовании ультразвукового распыления жидкости. Это позволит:

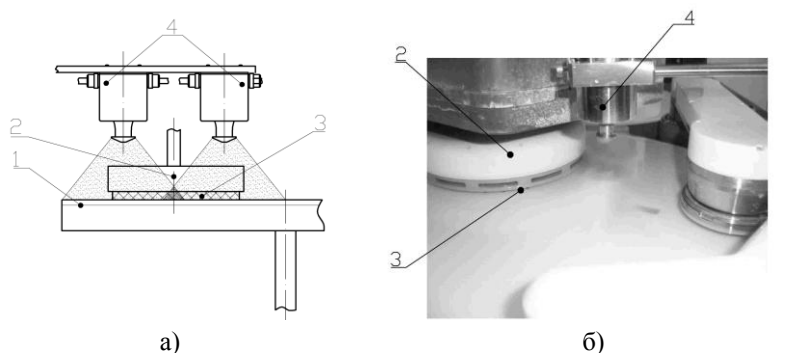
- обеспечить наличие на поверхности полирующего круга равномерного и непрерывного вдоль поверхности, строго дозированного слоя полировальной жидкости, не достижимого другими способами подачи полировальной жидкости (в т.ч. и другими способами распыления), создавая тем самым как равномерные значения флуктуаций давления, которые воздействуют на неровности пластины, так и равномерное распределение химических реагентов по поверхности полирования;
- снизить расход дорогостоящих полировальных материалов благодаря созданию на полирующем круге равномерного слоя полировальной жидкости строго определенной толщины.

Кроме этого, применение ультразвукового распыления обеспечивает равномерное распределение частиц абразивного вещества в слое полировальной жидкости. Это происходит по следующим причинам:

– под действием ультразвуковых колебаний происходит разрушение конгломератов, образованных за счет слипания нескольких частиц абразивного вещества;

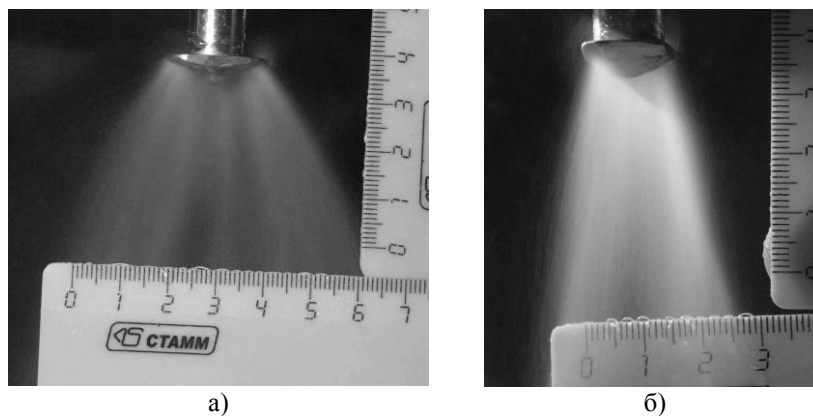
– при ультразвуковом распылении частицы абразивного вещества оказываются заключенными в объем жидкости сферической формы, т.е. внутри капли жидкости. При соблюдении условия равномерности распределения капель в факеле распыления, распределение частиц абразива также будет равномерным.

На рисунке 8.6, а и б показана схема расположения ультразвуковых колебательных [139–141] систем в составе эксплуатирующихся в настоящее время аппаратов для химико-механической полировки. Необходимость использования нескольких ультразвуковых распылителей обусловлена возможностью получения факела распыления необходимой ширины вдоль радиуса полирующего круга с заданным распределением количества полировальной жидкости.



а) вариант применения двух ультразвуковых распылителей (УЗКС)
б) УЗКС в составе оборудования для СМР процесса
Рисунок 8.6 – Возможные варианты размещения УЗКС

Проведенные исследования процесса распыления показали, что разработанное оборудование позволяет реализовать ультразвуковое распыление с факелом, диаметр которого превышает 65 мм, уже на расстоянии 40 мм от излучающей поверхности УЗКС (рисунок 8.7).



а – вид спереди (большая ось); б – вид сбоку (малая ось)
Рисунок 8.7 – Формируемый факел распыления

Измерения проводились при номинальном расходе полирующей жидкости, равном 0,5 мл/сек. Таким образом, варьируя расстояние между рабочей поверхностью колебательной системы и полирующим кругом, можно достичь необходимой площади покрытия поверхности полирующего круга.

Таким образом, использование ультразвукового распыления в системе подачи жидкости в оборудовании для СМР процесса делает возможным выполнение основного условия эффективности химико-механического полирования, а именно обеспечение равномерной подачи полирующей жидкости на полировальный круг, т.е. гарантировать достаточность полировального материала в каждой точке поверхности полирующего круга. Внешний вид разработанного распылителя показан в Приложении А на рисунках А.4 и А.5.

Применение разработанного способа [142] для управления процессом распыления в случае химико-механического полирования позволяет реализовывать быструю смену полировальной жидкости без необходи-

мости перенастройки оборудования, и кроме этого, достигнутое при помощи практической реализации способа уменьшение дисперсности получаемого распыла дает возможность обеспечить повышение качества полупроводниковых пластин на 15–20 %.

8.3 Разработка ультразвуковых распылителей для конвекционной распылительной сушки

Для практической реализации процесса распылительной сушки растительного экстракта используется специальная сушильная установка, примерная технологическая схема которой показана на рисунке 8.8.

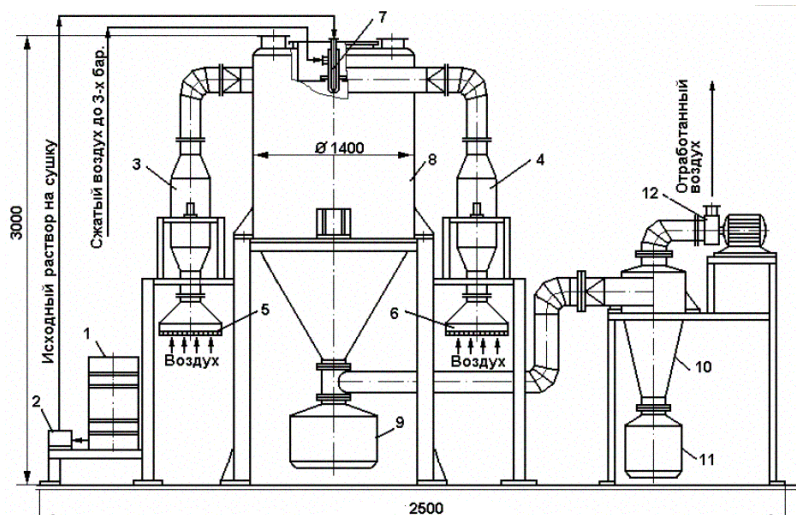
Распыление высушиваемого экстракта происходит в верхней части распылительной сушилки при помощи пневматической форсунки. Растительный экстракт, подаваемый на вход форсунки, имеет следующие характеристики:

- содержание сухого продукта в экстракте, не более % 30
- температура экстракта, °С 90
- вязкость экстракта, при температуре 90 °С, 10⁻³ Па с 30

Распылительная сушилка, созданная по представленной технологической схеме, позволяет осуществлять сушку экстракта, однако имеет следующие недостатки:

– высокий процент потерь дорогостоящего экстракта, связанный с высокой неоднородностью диаметров капель в факеле распыления, приводящей к большому разбросу размеров получаемых гранул, наиболее мелкие из которых (менее 10 мкм), не оседая в циклоне, уносятся с потоком сушильного агента (нагретого воздуха), потери достигают до 30 % от массы сухого продукта;

– неравномерность высушивания экстракта, связанная с большим разбросом диаметров капель распыляемого экстракта.



- 1 – емкость для исходного раствора; 2 – перистальтический насос;
 3, 4 – электрокалориферы; 5, 6 – фильтры; 7 – пневматическая форсунка; 8 – сушильная камера; 9, 11 – сборники сухого продукта;
 10 – циклон; 12 – вытяжной центробежный вентилятор

Рисунок 8.8 – Технологическая схема распылительной установки

Ясно, что перечисленные недостатки вызваны используемым пневматическим способом распыления жидкости. Для устранения выявленных недостатков было предложено использовать ультразвуковой способ распыления растительного экстракта.

На основе анализа приведенной технологической схемы распылительной сушилки, требуемой производительности и характеристик используемого оборудования были сформулированы следующие требования к ультразвуковому распылителю:

- производительность, не менее, мл/с (л/час) 5
- средний диаметр формируемых капель, не более, мкм 150

Для расчета параметров распылителя, необходимых для обеспечения приведенных характеристик факела распыла и эффективной работы сушильной установки, разработанная методика, описанная в разделе 3, была доработана с учетом особенностей технологии распылительной сушки [72].

При проектировании ультразвукового распылителя, для распылительной сушильной установки используются следующие основные параметры:

- а) параметры жидкости: плотность, поверхностное натяжение, вязкость, расход жидкости;

б) параметры распылителя: угол, площадь, длина образующей и внешний диаметр распылителя, частота и амплитуда ультразвуковых колебаний;

в) параметры сушильной камеры: объем камеры, скорость и начальная температура газа, производительность сушилки по сухому продукту.

По всем вышеперечисленным данным необходимо определить такие параметры самого ультразвукового распылителя, как: площадь поверхности распыления, угол наклона образующей конической поверхности распыления (угол распылителя) и количество и месторасположения отверстий для подачи жидкости на поверхность распыления.

На рисунке 8.9 представлены параметры распылительной сушилки [143].

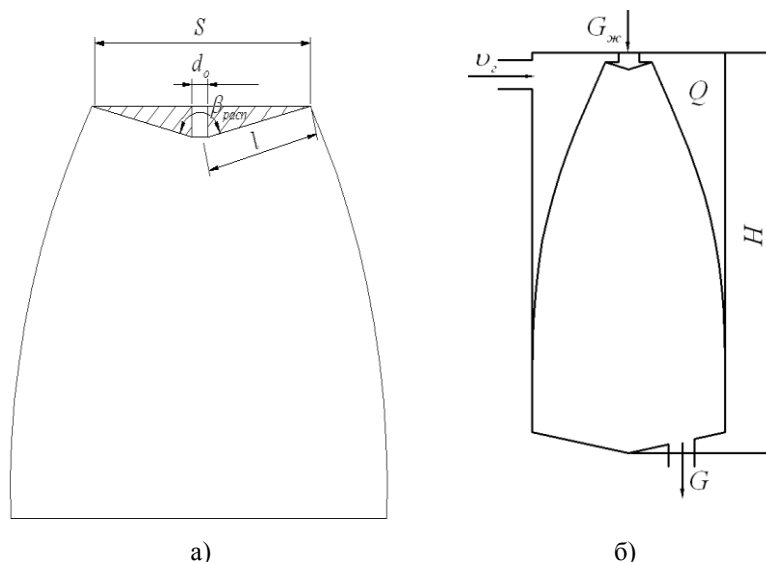


Рисунок 8.9 – Параметры распылительной сушилки

Для определения угла ультразвукового распылителя необходимо найти средний объемно-поверхностный диаметр капель жидкости. Для нахождения данной величины необходимо определить такие параметры, как количество тепла, которое передается от газа к частицам раствора, идет на испарение и нагрев частиц, среднюю разность температур, объемный коэффициент теплообмена между газами и частицами.

На рисунке 8.9: а) параметры камеры: $v_г$ – скорость газа, H – высота камеры, $G_ж$ – расход жидкости, G – количество сухого порошка, Q – количество тепла, необходимое для высушивания материала; б) параметры распылителя: S – площадь распылителя, $\beta_{\text{данный}}$ – угол распылителя, l – длина образующей поверхности распылителя, d_0 – диаметр сопла для подачи жидкости.

Для оценки среднего объемно-поверхностного диаметра при ультразвуковом распылении предложена следующая формула [144]:

$$\delta_{3,2} = \frac{0,252}{A} \sqrt[3]{\frac{3G_ж \eta \sigma}{\pi D \rho_ж^2 f^2 g \cos \frac{\beta_{\text{данный}}}{2}}}, \quad (8.1)$$

где η – коэффициент динамической вязкости, Па/с;

$\rho_ж$ – плотность распыляемой жидкости, кг/м³;

$\frac{\beta_{\text{данный}}}{2}$ – угол между образующей поверхности насадки и вертикалью, градусы;

$G_ж$ – расход жидкости, м³/с;

A – амплитуда колебаний ультразвукового распылителя, м;

f – частота колебаний насадки, 1/с;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

D – внешний диаметр рабочего участка распыливающей насадки, м, который определяется из выражения (8.1):

$$D = \sqrt{\frac{6\dot{I}_{\max} \rho_{\text{ж}} \frac{1}{3} \sin \frac{\beta_{\delta\dot{a}\ddot{n}\ddot{i}}}{2}}{\dot{I}_{\delta\dot{a}\ddot{i}}^3 (\pi f)^3}}. \quad (8.2)$$

Тогда

$$\sin \frac{\beta_{\delta\dot{a}\ddot{n}\ddot{i}}}{2} - \sin^3 \frac{\beta_{\delta\dot{a}\ddot{n}\ddot{i}}}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-6} G_{\text{ж}}^2 \eta^2 \sigma^3 \dot{I}_{\delta\dot{a}\ddot{i}}^7 a^3}{\pi^3 \delta_{3,2}^6 A^6 \dot{I}_{\max} \rho_{\text{ж}} \frac{13}{3} f^{\frac{11}{3}}}. \quad (8.3)$$

Средний объемно-поверхностный диаметр находится следующим образом. Так, учитывая общую поверхность частиц, F' средний объемно-поверхностный диаметр будет равен:

$$\delta_{3,2} = \frac{6G}{F' \gamma}, \quad (8.4)$$

где G – количество сухого продукта, мл/м³;

γ – удельный вес высушенного продукта, Н/м³;

$\delta_{3,2}$ – средний объемно-поверхностный диаметр каплей жидкости, м.

Общая поверхность частиц находится через суммарную поверхность частиц, находящихся во взвешенном состоянии в сушильной камере, которая зависит от длительности падения. С учетом этого величина F' будет определяться выражением:

$$F' = \frac{F}{\tau}, \quad (8.5)$$

где τ – время падения.

Поскольку скорость витания частиц $v_{\dot{a}}$ в процессе сушки изменяется, то время падения будет определяться по формуле:

$$\tau = \frac{H}{v_{\dot{e}} \pm v_{\dot{z}}}. \quad (8.6)$$

Поэтому далее необходимо определить скорость витания частиц. Для этого рассмотрим рисунок 3.17, где схематично показаны силы, действующие на каплю распыляемой жидкости, покинувшую поверхность распылителя.

В начальный момент времени капля движется под углом к поверхности распыления аэрозоля, равным:

$$\alpha' = 90 - (90 - \alpha'') = (90 - \frac{\beta_{\delta\dot{a}\ddot{n}\ddot{i}}}{2}). \quad (8.7)$$

При движении капли угол α' будет изменяться по следующему закону:

$$\alpha' = \arctg \left(\frac{v_x(t + \Delta t)}{v_y(t + \Delta t)} \right), \quad (8.8)$$

$$v_x = \frac{v_x(t) \sin \alpha' - \rho S^2 (v_x(t))^2 C_D(M) \sin \alpha' \cdot \Delta t}{\sin \alpha'}, \quad (8.9)$$

$$v_y = \left(\frac{g}{\cos \alpha'} - \frac{\rho S^2 (v_y(t))^2 C_D(M)}{m} \right) \Delta t + v_y(t), \quad (8.10)$$

где m – масса капли аэрозоля;

$C_D(M)$ – безразмерная функция числа Маха;

ρ – плотность воздуха;

S – площадь поперечного сечения капли.

Тогда скорость движения капли в произвольный момент будет определять по следующей формуле:

$$v_{\dot{a}} = \frac{v_y}{\cos \alpha'}. \quad (8.11)$$

Так как объемный коэффициент теплообмена связан с коэффициентом теплообмена, отнесенным к единице поверхности испарения, то суммарная поверхность частиц определяется уравнением:

$$F = \frac{\alpha_v V_k}{a_m}, \quad (8.12)$$

где V_k – объем сушильной камеры, м³;

α_m – коэффициент теплообмена, Дж/м³ °С;

α_v – объемный коэффициент теплообмена между газами и частицами, Дж/м³С;

$$\alpha_v = \frac{Q}{K_1 K_2 \Delta t_{\bar{n}\delta} V_k}, \quad (8.13)$$

где $\Delta t_{\bar{n}\delta}$ – средняя разность температур между газом и частицами, °С;

K_1 – коэффициент, учитывающий уменьшение движущей силы за счет перемешивания газа в камере;

K_2 – поправочный коэффициент на равномерность распределения теплоносителя и частиц жидкости по объему камер;

Q – количество тепла, которое передается от газа к частицам жидкости, идет на испарение и нагрев частиц, Дж.

Учитывая материальный и тепловой баланс сушки необходимое количество тепла определяется формуле:

$$Q = W(595 + 0,47t_2 - \mathcal{G}_1) + c_0 G(\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1), \quad (8.14)$$

где W – количество испаряемой влаги, Дж/с;

G – производительность сушки по сухому продукту, мл/м³;

t_2 – температура газов в процессе сушки, °С;

$\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2$ – температура соответственно жидкости и продукта после сушки, °С;

c_0 – теплоемкость безводного продукта, Дж/Н °С;

$$c_0 = c_{\bar{n}\delta\delta} \frac{100 - w_2}{100} + \frac{w_2}{100}, \quad (8.15)$$

где w_2 – конечная влажность продукта, %;

$c_{\bar{n}\delta\delta}$ – теплоемкость безводного продукта, Дж/Н °С.

Весь процесс нагрева частиц в процессе сушки можно разделить на два основных: в первом периоде температура частиц приближенно равна температуре адиабатного испарения чистой жидкости; во второй период она изменяется и достигает температуры среды.

Средняя разность температуры в первый период может быть определена по формуле:

$$\Delta t_1 = \frac{t_1 - t_2'}{\ln \frac{t_1 - t_i}{t_2' - t_m}}, \quad (8.16)$$

где t_1 – начальная температура газов, °С;

t_i – средняя температура мокрого термометра (способность воздуха принять влагу при неизменном тепло-содержании, т.е. без подведения тепла), °С;

t_m – температура точки росы для газа;

t_2' – температура газов, соответствующая окончанию первого периода сушки, °С.

Температуру t_2' нетрудно определить из процесса сушки по i-d диаграмме.

Средняя разность температур между газом и частицей будет равна во второй период:

$$\Delta t_2 = \frac{(t_2' - t_i) - (t_2 - \mathcal{G}_2)t_1 - t_2'}{\ln \frac{t_2' - t_i}{t_2 - \mathcal{G}_2}}, \quad (8.17)$$

где $\mathcal{G}_2 = (t_2' - t_i) \frac{w_z - w_2}{w_z - w_p}; \quad (8.18)$

w_1 – начальная влажность жидкости, %;

w_z – максимальная гигроскопическая влажность, %;

w_p – равновесная влажность, %.

Среднюю разность температур между газом и частицей можно определить, если будет известно соотношение длительности сушки между первым и вторым периодами сушки. Отношение длительности сушки во втором периоде к общей длительности сушки может быть описано следующей величиной:

$$X = \frac{1}{1 + \frac{(t_2' - t_2)(w_1 - w_2)}{(t_1 - t_2')(w_z - w_p) \ln \frac{w_z - w_p}{w_2 - w_p}}}. \quad (8.19)$$

Средняя разность температур будет равна:

$$\Delta t_{\bar{n}\delta} = \Delta t_1(1 - X) + \Delta t_2 X. \quad (8.20)$$

Общее выражение для нахождения среднего объемно-поверхностного диаметра будет иметь следующий вид:

$$\delta_{3,2} = \frac{6GH\alpha_m K_1 K_2 \Delta t_{\bar{n}\delta}}{\gamma(v_a \pm v_a)\alpha_V}. \quad (8.21)$$

Конечное уравнение для расчета угла распылителя будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \sin \frac{\beta_{\delta a \bar{n} i}}{2} - \sin^3 \frac{\beta_{\delta a \bar{n} i}}{2} = \\ = \frac{4 \cdot 10^{-6} G_{\bar{E}}^2 \eta^2 \sigma^3 \dot{I}_{\delta a}^7}{\pi^3 \left(\frac{6GH\alpha_m K_1 K_2 \Delta t_{\bar{n}\delta}}{\gamma(v_a \pm v_a)\alpha_V} \right)^6 A^6 \dot{I}_{\max}^{\frac{13}{3}} \rho_{\bar{E}}^{\frac{11}{3}} f^{\frac{11}{3}}}. \end{aligned} \quad (8.22)$$

Полученное уравнение решается методом Виета–Кардано.

Завершающим этапом является расчет количества необходимых отверстий. При выполнении расчетов предполагается, что жидкость, вытекающая из отверстия, удерживается силами поверхностного натяжения и растекается по поверхности распыления под действием сил радиационного давления (рисунок 3.19).

Максимальный объем удерживаемой жидкости определяется из условия равновесия в момент отрыва капли от поверхности и с учетом конусности поверхности:

$$R = \sqrt[3]{\frac{2r\sigma}{\rho g(\pi \cos^2 \alpha''(1 - \sin \alpha'') + B)}}, \quad (8.23)$$

$$\text{где } B = \pi(1 + \sin \alpha'')^2 \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3} \sin \alpha'' \right) - \frac{1}{3} \pi \cos^3 \alpha''.$$

При воздействии УЗ колебаний радиационное давление сообщает капле некоторую энергию, приводящую к ее растеканию. Выражение для силы радиационного давления может быть представлено в следующем виде:

$$\bar{F}_r = 2S\bar{E}(\kappa r)^4 \frac{1}{(1 + 2q)^2} \cos(\theta) \cdot [C], \quad (8.24)$$

$$\text{где } C = \left(q - \frac{1 + 2q}{3q\mu} \right)^2 + \frac{2}{9}(1 - q)^2;$$

\bar{E} – средняя по времени плотность энергии падающей волны;

r – радиус капли, м;

θ – угол между направлением падения волны и нормалью к границе раздела;

κ – волновое число, м⁻¹;

$$\mu = c_2 / c_1; \quad (8.25)$$

$$q = \rho_1 / \rho_2; \quad (8.26)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³;

c – скорость распространения звука, м/с;

Индексы 1 и 2 относятся к средам, в которых распространяются падающая и прошедшая волны.

Зная величину энергии радиационного давления, можно определить радиус поверхности распыления, по которому растекается жидкость:

$$l = \frac{2F_r \pi \cos \alpha''}{2\sigma \pi \cos \alpha''} + \frac{\sqrt{(-2F_r \pi \cos \alpha'')^2 - C}}{2\sigma \pi \cos \alpha''}, \quad (8.27)$$

где $C = 4\sigma \pi \cos \alpha'' \cdot (\sigma(\pi R^2(1 + (1 + \sin \alpha'')^2) + 2\pi R^2 \cos \alpha'' \cdot (1 - \sin \alpha'')) + 2F_r R \cos \alpha''$.

Площадь растекания жидкости будет равна:

$$S = \pi l^2. \quad (8.28)$$

Как уже указывалось в третьем разделе, если площадь, занимаемая жидкостью после ее растекания, оказывается недостаточной (т.е. не вся поверхность распыления покрыта жидкостью), то на поверхности распыления необходимо выполнить дополнительные отверстия для подачи жидкости. Эти отверстия должны находиться на расстоянии, не превышающем $2l$ (где l радиус растекшейся капли). Если значение расстояния $2l$ оказывается большим чем радиус $R_{\text{данный}}$ поверхности распыления, то отверстия должны быть выполнены на расстоя-

нии $\frac{R_{\text{данный}}}{2}$.

На основании описанной методики были рассчитаны основные параметры и изготовлен ультразвуковой распылитель, показанный на рисунке А.6 (Приложение А) [145–147].

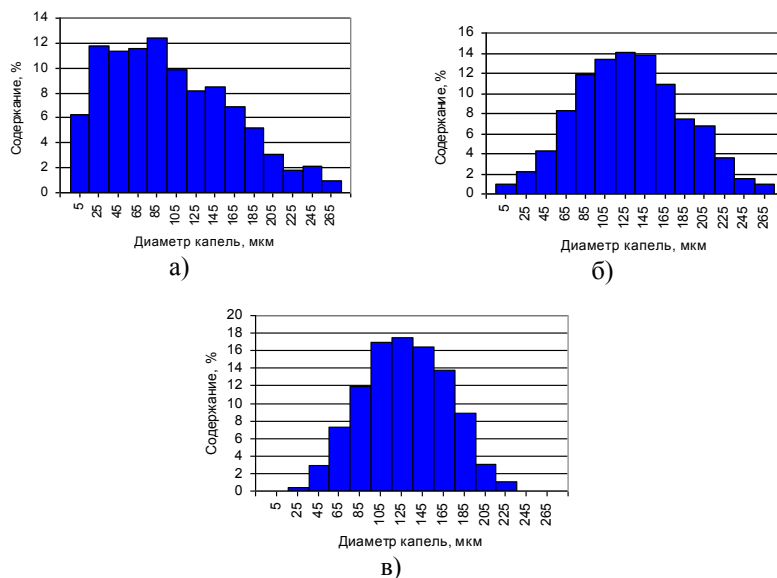
Для определения дисперсности распыла, образующегося при использовании разработанного оборудования, и сравнения его с распылом, получающимся при пневматическом распылении, был проведен ряд экспериментов, заключающихся в распылении растительного экстракта с производительностью 3 мл/с и измерении диаметров образующихся капель.

Измерение диаметров образующихся капель осуществлялось методом улавливания капель иммерсионной средой [15–16]. При реализации этого способа, специальную пластинку (предметное стекло) покрывают слоем вязкой жидкости, в которой капли распыленной жидкости не растворяются достаточно продолжительное время. Толщина слоя смазки должна быть больше диаметра самых крупных капель, а плотность и вязкость такими, чтобы капли тонули, не сливаясь друг с другом, не теряя своей сферической формы, и не разбивались о поверхность слоя иммерсионной жидкости.

В рассматриваемом случае, при распылении водного растительного экстракта, в качестве иммерсионной среды использовалась смесь вазелина с трансформаторным маслом [5].

На рисунке 8.10 приведены полученные гистограммы распределения капель распыла растительного экстракта. Для пневматического распыления среднearифметический диаметр $D = 110$ мкм, среднеквадратическое отклонение $G = 63$ мкм; для УЗ с ручным управлением $D = 130$ мкм, $G = 53$ мкм; для УЗ с автоматическим управлением $D = 127$ мкм, $G = 40$ мкм.

Из представленных данных видно, что применение ультразвукового распыления значительно снижает дисперсию капель распыляемого экстракта по сравнению с пневматическим распылением. Причем при ручном управлении процессом распыления формирование капель с диаметром меньшим 25 мкм заметно уменьшается, а при автоматическом управлении согласно предложенному способу практически исключается, что свидетельствует об оптимальности режима распыления в последнем случае.



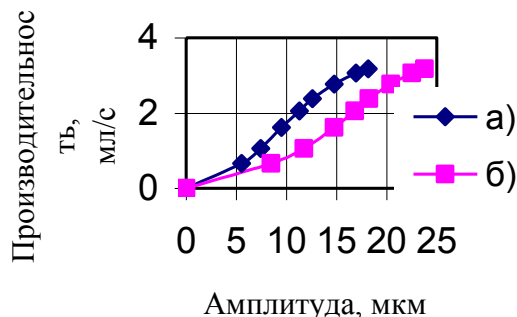
а – пневматическое распыление; б – ультразвуковое с ручным управлением; в – ультразвуковое с автоматическим управлением процессом распыления

Рисунок 8.10 – Гистограмма распределения капель

Кроме этого, из сравнения зависимостей производительности распыления от амплитуды ультразвукового воздействия для «обычного» ультразвукового распыления и ультразвукового распыления с автоматическим управлением (рисунок 8.11, а и б соответственно) видно, что применение автоматического управления позволяет в 1,3 раза снизить амплитуду ультразвуковых колебаний, необходимую для обеспечения заданной произво-

дительности распыления.

Таким образом, для достижения максимальной эффективности от использования ультразвукового распыления при реализации различных технологических процессов необходимо применение автоматического управления процессом распыления. Внешний вид разработанного оборудования показан в Приложении А на рисунке А.7. Там же приведены технические характеристики распылителя.



а – ультразвуковое с ручным управлением; б – ультразвуковое с автоматическим управлением процессом распыления

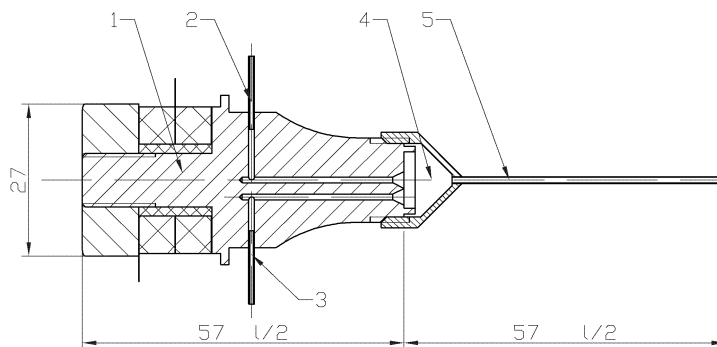
Рисунок 8.11 – Зависимость производительности распыления от амплитуды ультразвуковых колебаний

8.4 Разработка ультразвуковых аппаратов тонкодисперсного распыления высоковязких жидкостей

Все приведенные выше конструкции ультразвуковых распылителей относятся к технологии распыления жидкостей с малой (до 5 сСт) и средней вязкостью (до 35 сСт). При этом не менее важной задачей в промышленности является распыление высоковязких жидкостей (до 80–100 сСт). Эффективных устройств для мелкодисперсного распыления таких жидкостей не существует.

Для создания распылителей жидкостей с вязкостью до 80 сСт был предложен новый тип ультразвуковых колебательных систем, принцип работы которых заключается в двойном распылении жидкости (рисунок 8.12).

Принцип работы распылителя заключается в следующем. Распыляемая жидкость через штуцер 2 подается в распылительную камеру 4, в которой происходит предварительное распыление жидкости. Полученный аэрозоль при помощи сжатого воздуха, подаваемого через штуцер 3, транспортируется в выхлопную трубку 5, на конце которой происходит окончательное мелкодисперсное распыление жидкости.



1 – ультразвуковая колебательная система; 2 – штуцер подачи распыляемой жидкости; 3 – штуцер для подачи транспортирующего воздуха; 4 – распылительная камера; 5 – выхлопная трубка

Рисунок 8.12 – Схематичное изображение ультразвукового распылителя

Для проверки эффективности предложенной конструкции, были проведены работы по разработке распылителя авиационного масла с формированием воздушно-капельной смеси. Были изготовлены конструкции различных ультразвуковых колебательных систем с резонансными частотами: 1) до 44 кГц; 2) до 100 кГц.

8.4.1 Разработка ультразвуковых колебательных систем с частотами до 44 кГц

В качестве базовой была выбрана конструкция ультразвуковой колебательной системы на частоту 22 кГц. Для проведения исследований были разработаны и изготовлены несколько полуволновых колебательных систем с различными узлами крепления рабочего распылительного элемента.

Первоначально была изготовлена полуволновая УЗ колебательная система, с креплением распылительной камеры с помощью внутреннего резьбового соединения М8х0,75, внешний вид которой показан на рисунке 8.13.

К сожалению, при таком способе крепления распылительной камеры, объем ее внутреннего пространства оказался недостаточным для распыления жидкости. Кроме того, рабочие частоты без распылительной головки и с ней существенно отличались (на несколько кГц), что не обеспечивало согласованного режима работы колебательной системы. По этим причинам от дальнейшего использования такой колебательной системы было решено отказаться.



Рисунок 8.13 – УЗКС с внутренним резьбовым соединением

Внешний вид полуволновой ультразвуковой колебательной системы с креплением распылительной камеры с помощью резьбового внешнего соединения представлен на рисунке 8.14.



Рисунок 8.14 – УЗКС с внешним резьбовым соединением

Выполнение резьбового соединения в месте максимальных колебаний требует очень качественного изготовления резьбы. Любые надрезы при токарной обработке приводили к механическим повреждениям и разрушению колебательной системы или распылительной камеры. От такой конструкции колебательной системы также было решено отказаться.

На рисунке 8.15 показан внешний вид полуволновой УЗ колебательной системы с креплением распылительной камеры с помощью внешнего резьбового соединения М16х1.



Рисунок 8.15 – УЗКС с внешним резьбовым соединением

Такая конструкция позволила обеспечить наилучший контакт с распылительной головкой и по распылительной плоскости системы и по месту контакта головки с буртиком системы.

8.4.2 Конструкции УЗ преобразователей с резонансными частотами выше 44 кГц

На первом этапе была разработана двухполуволновая ультразвуковая колебательная система с креплением распылительной камеры с помощью резьбового соединения М8х0,75 на частоту 100 кГц. Двухполуволновая конструкция была выбрана ввиду малости полуволнового размера системы на частотах 100 кГц. Внешний вид такой системы показан на рисунке 8.16.



Рисунок 8.16 – Двухполуволновая УЗКС с внутренним резьбовым соединением

Эффективность такой колебательной системы оказалась очень низкой из-за нерационального размещения пьезоэлементов, толщина которых близка к четверти длины волны УЗ колебаний на этой частоте. Использование более тонких пьезоэлементов не представляется возможным по ряду технических причин, основными из которых являются:

1. невозможность обеспечения требуемой мощности излучения;
2. отсутствие производства тонких пьезоэлектрических элементов для силового ультразвука.

В связи с этим дальнейшие исследования были направлены на конструирование полуволновой колебательной системы с предельно возможной частотой для такой конструктивной схемы и пьезоэлементов толщиной 6 мм.

Такой подход позволил предложить и разработать УЗ колебательную систему, представленную на рисунке 8.17. Ее резонансная частота близка к 60 кГц.



Рисунок 8.17 – УЗКС с внешним резьбовым соединением на 60 кГц

Полуволновая УЗ колебательная система выполнена с креплением распылительной камеры с помощью резьбового соединения М16х1.

Колебательная система выполнена с резьбовым соединением, аналогичным системе, показанной на рисунке 8.15 (для обеспечения возможного контакта по двум плоскостям).

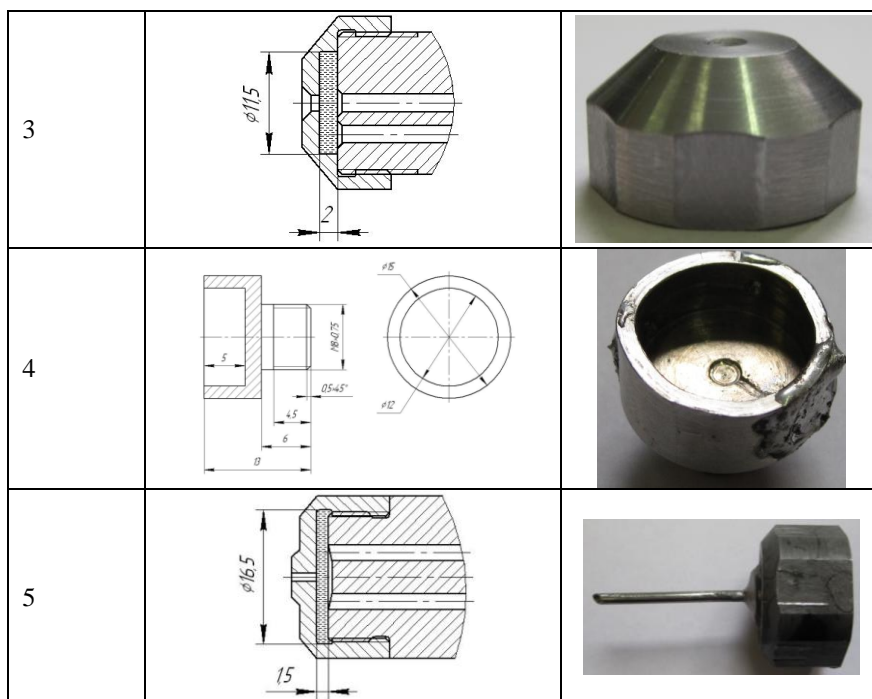
8.4.3 Конструкции распылительных камер

Распылительная камера служит для формирования воздушно-капельной смеси и дальнейшего ее распыления в выхлопной трубке. Варианты конструкций распылительной камеры с креплением к УЗ преобразователям представлены ниже. Область образования воздушно-капельной смеси на рисунках показана штриховкой. Различные типы разработанных распылительных камер представлены в таблице 8.1.

Первоначально все варианты распылительных камер изготавливались из коррозионно-стойкой стали (12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72). Выбор материала камеры был обусловлен необходимостью исключения загрязнений распыляемого материала.

Таблица 8.1 – Распылительные камеры

Номер	Чертеж	Внешний вид
1		
2		



Однако малый предел прочности данного материала приводил к тому, что при частой затяжке резьбового соединения происходило разрушение витков резьбы распылительной камеры. Это в свою очередь приводило к разрушению витков резьбы на концентраторе.

Поэтому все следующие варианты распылительных камер изготавливались из коррозионно-стойкой стали с большим пределом прочности (40Х13 ГОСТ 5632-72). Это позволило предотвратить разрушение витков резьбы при частой смене распылительной камеры.

При работе УЗКС с распылительной камерой № 1 происходило разрушение резьбового окончания распылительной камеры (рисунок 8.18) уже при амплитудах, не превышающих 50 мкм. Поэтому от такого варианта конструкции распылительной камеры пришлось отказаться на первом этапе исследований.



Рисунок 8.18 – Разрушение распылительной камеры № 1

Использование распылительной камеры № 2 показало, что имея достаточно большие габаритные размеры и массу, эта камера, во-первых, значительно понижает резонансную частоту УЗКС, а во-вторых, не позволяет достичь необходимой амплитуды колебаний на торце концентратора для образования воздушно-капельной смеси внутри камеры. Такой вариант камеры также был признан не пригодным для дальнейших исследований.

В результате по проведенным предварительным экспериментам наиболее предпочтительной с точки зрения надежности, прочности и согласования с концентратором оказалась распылительная камера № 3.

Выбранная для исследований распылительная камера № 3 соединяется с выхлопной трубкой посредством паяного соединения. Первоначально пайка проводилась оловянным припоем марки ПОС61. Результаты испытаний показали, что такое паяное соединение не выдерживает механических нагрузок при колебаниях с амплитудой более 15–20 мкм.

Для увеличения прочности паяного соединения, был применен серебряный припой. Это потребовало разогрева трубки и камеры до температуры 950–1000 °С. При этом чрезмерный разогрев значительно повысил

хрупкость как камеры, так и трубки, что приводило к их быстрому разрушению в процессе работы (рисунки 8.19 и 8.20).



Рисунок 8.19 – Разрушение распылительной камеры



Рисунок 8.20 – Разрушение выхлопной трубки

Поэтому от пайки с помощью серебряного припоя пришлось отказаться. Таким образом, для проведения дальнейших исследований создание паяного соединения проводилось при помощи оловянного припоя ПОС61, однако для увеличения прочности соединения выхлопная трубка стыковалась с распылительной камерой посадкой с натягом.

В результате проведенных предварительных исследований и испытаний для дальнейших экспериментов были выбраны:

- 1) УЗКС с резонансной частотой до 44 кГц – однополуволновая система, с симметрично расположенными относительно акустической оси каналами для подачи жидкости и транспортного газа и с распылительной камерой № 3;
- 2) УЗКС с резонансной частотой свыше 44 кГц – однополуволновая система с каналом подачи транспортного газа на акустической оси и с распылительной камерой № 3.

Для проведения сравнительных измерений параметров создаваемых УЗКС, а именно амплитуды колебаний излучающей поверхности и собственной резонансной частоты колебательной системы, была создана измерительная установка, включающая в себя низковольтный генератор, к которому подключалась колебательная система, пьезоэлектрический щуп с сухим точечным контактом, подключенный к осциллографу. Результаты измерений приведены в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Результаты измерений параметров разрабатываемых УЗКС

Вариант УЗКС	УЗ преобразователь, кГц	Присоединена распылительная головка, кГц	Присоединена выхлопная трубка, кГц
до 44 кГц	24,16	24,16	22,05
свыше 44 кГц	60	56,5	56,5

Приведенные значения свидетельствуют о хорошей согласованности отдельных элементов ультразвуковых колебательных систем и оптимальности предложенных конструкций для создания ультразвуковых колебаний в распылительной камере.

8.4.4 Определение оптимальных параметров разработанных распылителей

Эффективность и качество распыления жидкости зависит от согласованности всех механических частей УЗКС. Одним из важнейших элементов системы является распыляющая игла (выхлопная трубка). От длины трубки зависит амплитуда колебаний на её торце. Определение необходимой (оптимальной) длины трубки осуществлялось путем последовательного выполнения следующих действий.

Устанавливалась амплитуда колебаний колебательной системы, равная 20–30 % от максимальной мощности, на торец держателя иглы (крышки распылительной камеры) наносилась жидкость (например, вода), постепенным увеличением мощности добивались распыления жидкости с торца держателя иглы. Далее жидкость наносилась на рабочее окончание иглы, если распыления не происходило, то производилось уменьшение длины иглы (на 1–2 мм). Вышеописанные действия повторялись до тех пор, пока не достигалось устойчивое распыление с торца держателя и рабочего окончания иглы. При этом не должно происходить чрезмерного нагрева локальных участков поверхности иглы. Нагрев иглы при продувке транспортного газа должен быть равномерным и не должен превышать температуры остальных частей УЗКС. Длина распылительной иглы зависит от типов игл и свойств использованных жидкостей. В результате экспериментов было установлено, что оптимальная длина иглы находится в пределах 20–30 мм.

Проведенные исследования позволили разработать экспериментальные образцы ультразвуковых распылителей высоковязких жидкостей, показанные на рисунках А.8 и А.9 (см. Приложение А).

8.4.5 Исследование эффективности разработанных распылителей

Для определения эффективности разработанных распылителей были проведены исследования параметров получаемого аэрозоля. На рисунке 8.21 схематически представлена установка для распыления. Она состоит из УЗКС, генератора для питания УЗКС, компрессора с регулятором давления, предназначенных для создания стабильного потока воздуха для переноса аэрозоля из внутренней распылительной камеры к рабочему окончанию распылительной иглы.

Поток транспортирующего газа (воздуха) подбирается, исходя из того, что аэрозоль, образовавшийся в распылительной камере, должен выноситься к рабочему окончанию иглы. Практически подбор осуществляется следующим образом:

1. Устанавливается минимальный (заведомо недостаточный) поток газа;
2. Запускается генератор на 50–60 % от максимальной мощности и устанавливается требуемый расход жидкости.
3. Далее постепенно увеличивается расход газа до обеспечения равномерного факела распыления требуемой формы.
4. В случае образования на конце иглы капли распыляемой жидкости необходимо увеличить амплитуду колебаний. Следует избегать чрезмерного увеличения амплитуды колебаний, так как оно может привести к интенсивному образованию крупных капель или поломке иглы.

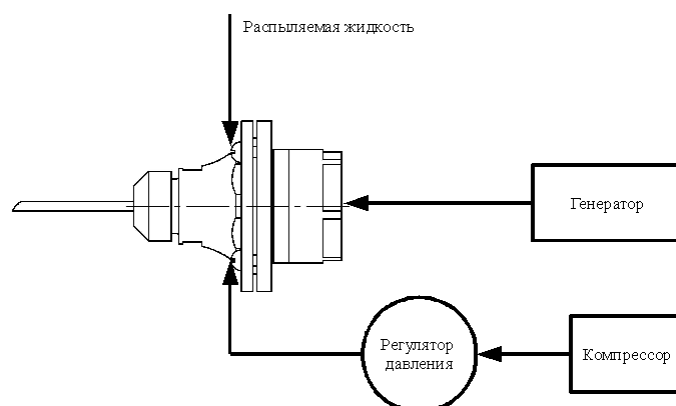


Рисунок 8.21 – Схема экспериментальной установки

Рекомендуется работать на мощности, на 5–10 % больше минимальной мощности, при которой происходит (начинается) стабильное распыление. Амплитуда УЗ колебаний (мощность), как и поток транспортирующего газа, подбираются индивидуально для каждого типа распыляемой жидкости (в зависимости от вязкости и требуемой производительности распыления).

Если вышеописанными манипуляциями не удастся добиться требуемых характеристик распыления, то требуется корректировка длины распылительной трубки (уменьшение её длины с шагом 1 мм).

В проводимых экспериментах подача распыляемой жидкости происходила самотеком с высоты около 1 м. Для регулировки потока жидкости на гибкой подводке предусмотрен зажим, позволяющий изменять сечение подводящей трубки. Расход жидкости устанавливается постепенным увеличением пропускного сечения трубки после запуска генератора и подачи транспортирующего газа. Расход распыляемой жидкости (авиационное масло) измерялся контрольным распылением в пробирку в течение 10 минут.

Исследование параметров аэрозоля проводилось методом улавливания капель иммерсионной средой (распыление производилось на предметное стекло с последующим исследованием капель под микроскопом). Расстояние между окончанием распылительной трубки и стеклом было выбрано равным 5 см, так как при меньшем расстоянии увеличивается количество слипшихся частиц (из-за высокой плотности частиц в потоке аэрозоля), а при большем расстоянии увеличивается разрозненность частиц, что осложняет их дальнейшее исследование. Скорость перемещения стекла относительно факела аэрозоля равнялась 1–2 см/с.

С помощью микроскопа с увеличением $\times 120$ (фирмы PZO Warszawa) измерялся диаметр расплывшихся капель. Диаметр капель определялся с помощью стандартной масштабной линейки с ценой деления 10 мкм. Расплывшиеся капли в истинный размер (размер сферы) не пересчитывались. Для лучшей визуализации капель на пластинке в масло добавлялось небольшое количество красящего вещества.

Статистика по количеству капель набиралась следующим образом. Предметный столик на микроскопе перемещался перпендикулярно следу капель от края до края. При этом измерялся размер всех капель, попавших в поле зрения. Таких измерений на длине следа проводилось 3–4 (рисунок 8.22)

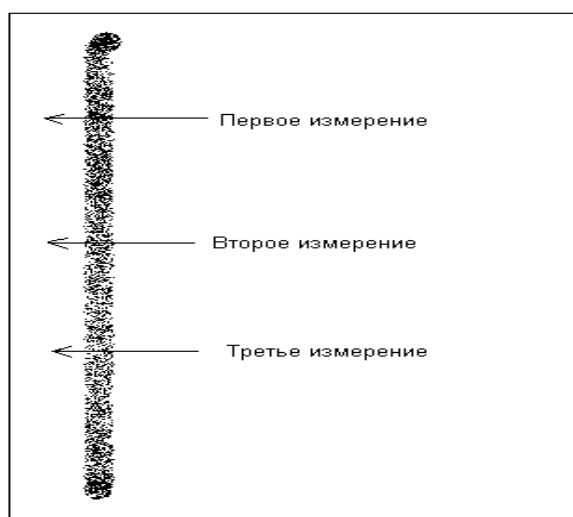


Рисунок 8.22 – Схема набора статистического материала для построения гистограмм распределения капель аэрозоля по размерам

Для построения гистограммы каждого распределения набиралось 350–450 измерений. Полученные распределения размеров растекшихся капель представлены на рисунках 8.23 и 8.24.

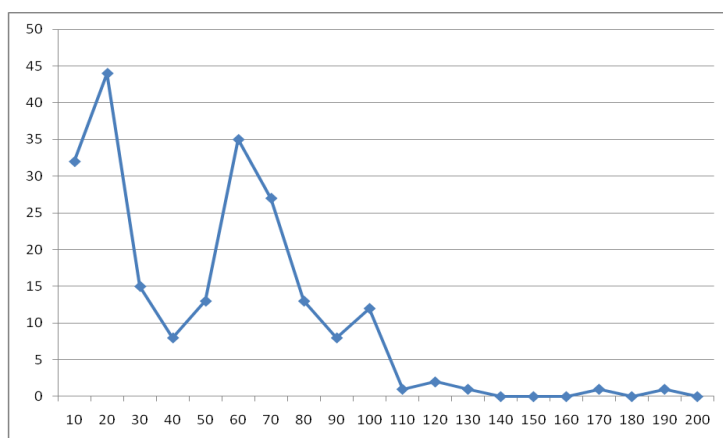


Рисунок 8.23 – Распределение частиц для распылителя с частотой 60 кГц

На рисунке 8.23 представлено распределение размеров частиц аэрозоля, полученного от распылителя с частотой 60 кГц. Распределение имеет два ярко выраженных максимума в районе 20 и 60 мкм, второй макси-

мум (60 мкм) обусловлен распылением с торца выхлопной трубки. Кроме того, по распределению видно, что капли с размером частиц более 100 микрон практически отсутствуют.

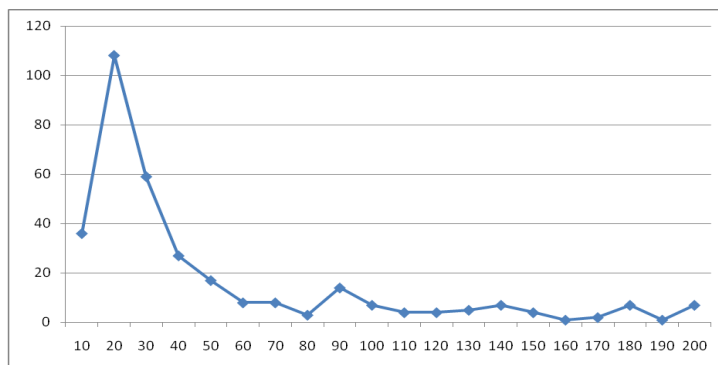


Рисунок 8.24 – Распределение частиц для распылителя с частотой 22 кГц

На рисунке 8.24 представлено распределение размеров частиц аэрозоля, полученного при работе распылителя с частотой 22 кГц. Распределение имеет ярко выраженный максимум в районе 20 мкм.

Таким образом, в результате проведенных исследований было разработано оборудование для распыления высоковязких жидкостей, позволяющее осуществлять распыление жидкостей с вязкостью до 80 сСт.

8.5 Разработка ультразвукового ингаляционного аппарата

Ингаляционные аппараты предназначены для индивидуального применения лицами, страдающими отоларингологическими заболеваниями, с целью лечения и профилактики заболеваний верхних дыхательных путей и легких аэрозолями жидких лекарственных веществ (минеральных вод, водных растворов солей, отваров лекарственных трав и т.д.). Также их применение может быть эффективно для ароматизации и/или очистки помещений от вредных для здоровья веществ и микроорганизмов путем распыления дозированных порций жидкостей по заданной программе.

В связи с этим возникла потребность в создании УЗ ингаляторов, характеризующихся высокой надежностью, малыми габаритами, весом и стоимостью, высокой производительностью, полным использованием лекарственных препаратов и пригодных для профилактики и лечения дыхательных органов мелкодисперсными аэрозолями как в лечебных учреждениях, так и в домашних условиях.

Кроме того, что лекарственные аэрозоли, получаемые с помощью ультразвуковых ингаляторов, обладают очень высоким терапевтическим лечебным эффектом, существуют возможности усиления их лечебных свойств и придания им дополнительных качеств путем комплексного воздействия одновременно с ультразвуковыми колебаниями других физических факторов.

Наиболее эффективными способами активации аэрозолей является активация аэрозолей электрическим и магнитным полями. Большое внимание стали уделять электроаэрозолям после установления факта, что придание обычным аэрозолям принудительного электрического заряда того или иного знака (униполярности) существенно улучшает физико-химические свойства аэрозолей, способствуя их стабильности, сохранению заданной дисперсности, более полному осаждению в органах дыхания и т.д. Кроме того, было установлено, что электрический заряд аэрозольных частиц (главным образом отрицательной полярности) оказывает благоприятное влияние на функциональное состояние органов и систем организма (функции внешнего дыхания, мерцательного эпителия и др.).

Наличие системы ионизационной обработки аэрозолей существенно усложняет конструкцию и условия эксплуатации ингалятора. Это обусловлено тем, что ингалятор должен иметь дополнительный высоковольтный источник питания и находящиеся под высоким напряжением проводники, соединяющие источник с электродами. Применение высокого напряжения в условиях окружающей влаги требует тщательной проработки конструкторских и технологических решений по обеспечению электробезопасности, что делает проблематичным создание ингаляторов для домашнего применения, удовлетворяющих всем требованиям по электробезопасности.

В то же время известны другие методы активации жидкостей, в частности, метод, основанный на магнитогиродинамическом эффекте, известный как метод «омагничивания» жидкостей.

Известно, что омагниченная в ультразвуковом поле высокой интенсивности вода обладает рядом уникальных свойств. Отмечены бактерицидные свойства такой воды, что, возможно, обусловлено свободными радикалами, возникающими при протекании воды относительно магнитов. Омагниченная вода влияет на молекулярную структуру клетки и на пространственную структуру белка, на все виды обменных и репаративных процессов.

Такая вода, наряду с объективными показателями, оказывала субъективное воздействие на пациентов: улучшался сон, уменьшалась возбудимость нервной системы, повышался жизненный тонус, снижалась утомляемость.

Накоплен также обширный материал, подтверждающий усиление лечебных свойств водных растворов лекарственных препаратов и биологически активных веществ при омагничивании.

Перечисленные выше предпосылки, основанные на доказанной многочисленными исследованиями лечебной эффективности омагниченной воды, служат основой для применения магнитогидродинамического эффекта с целью активации аэрозолей в разрабатываемых ультразвуковых ингаляторах.

В связи с этим возникла необходимость в дополнении создаваемого ультразвукового ингалятора индивидуального применения магнитной системой активации аэрозолей.

Вместе с тем известно, что главным преимуществом электроаэрозолей (в т.ч. и перед аэрозолями, активированными магнитным полем) считается интенсивная всасываемость лекарств из дыхательных путей и легких. Это используется как для повышения эффективности лечения указанных органов, так и для общесистемного введения лекарственных веществ, а также для их избирательного действия на те или иные системы (сердечно-сосудистая, центральная нервная, выделительная и др.).

При разработке и создании ультразвукового ингалятора, предназначенного для групповой аэрозольтерапии, необходимо решить проблему подачи аэрозоля необходимой, регулируемой температуры и обеспечить электробезопасность при высоковольтном формировании электроаэрозолей положительной и отрицательной полярности, оказывающих многостороннее физиологическое влияние на разнообразные функции организма.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать несколько конструкций УЗ ингаляторов (ингалятор для лечебных учреждений «ИНАЛ», ингалятор индивидуального применения «ИНАЛ-М» и модификацию ингалятора «ИНАЛ» для групповой аэрозольтерапии), отличающихся простотой в изготовлении и настройке, малой стоимостью, отсутствием дефицитных комплектующих, высокой надежностью и эффективностью [148, 149].

Отличительной особенностью разработанных ингаляторов является наличие системы автоматического отслеживания уровня распыляемой жидкости относительно области фокусирования ультразвука, что обеспечивает, с одной стороны, ее полное расхождение, а с другой – высокую стабильность дисперсного состава аэрозоля и его плотности.

Второй отличительной особенностью всех разработанных конструкций ингаляторов является применение узла магнитогидродинамической активации аэрозоля.

Выбор оптимальных параметров УЗ ингаляторов позволил обеспечить формирование аэрозоля с размерами частиц до 2 мкм (90 % от общего количества), оптимальную производительность (не менее 4 мл/мин для ингалятора «ИНАЛ» и не менее 1 мл/мин для ингалятора «ИНАЛ-М»), полное распыление используемых препаратов, оптимальный уровень подогрева аэрозоля и его магнитную активацию.

Для получения сфокусированного ультразвукового поля в ингаляторе «ИНАЛ» используется пьезоэлектрический элемент в форме диска, соединенный с алюминиевой вогнутой линзой. Применение линзы обеспечивает не только фокусировку ультразвуковых колебаний, но и защиту серебряных электродов пьезоэлемента от воздействий используемых лекарственных препаратов.

Внешний вид ингалятора показан на рисунке А.10 в Приложении А (на фото показаны два варианта выполнения распылительной камеры).

Ингалятор состоит из электронного блока и подключаемой к его выходному разъему с помощью соединительного кабеля распылительной камеры.

Электронный блок содержит источник питания и высокочастотный генератор, вырабатывающий электрические колебания частотой 2,64 МГц для возбуждения ультразвуковых колебаний в распылительной камере.

Распылительная камера (на фото (см. рисунок А.10) показано два варианта использования распылительной камеры – с трубкой для вдыхания аэрозоля пациентом и с раструбом для насыщения аэрозолем помещения-ингалятора) служит для образования аэрозоля из лекарственных препаратов, его магнитной активации и транспортировки к пациенту (пациентам).

Электрические колебания, подаваемые по соединительному кабелю в распылительную камеру от электронного блока, преобразуются пьезоэлектрическим элементом в ультразвуковые. Ультразвуковые колебания, проходя через фокусирующую линзу, контактную жидкость и дно кюветы, фокусируются на поверхности лекарственного препарата, обеспечивая его распыление.

При транспортировке аэрозоля к пациенту через трубку лекарственный препарат подвергается магнитной обработке в ультразвуковом поле.

Кювета для лекарственного препарата состоит из двух колец (наружного и внутреннего), между которыми расположена тонкая фторопластовая или лавсановая пленка. Такая кювета позволяет использовать для распыления до 30 мл лекарственного препарата.

Применение в качестве дна кюветы тонкой полимерной пленки обеспечивает наилучшие условия прохождения ультразвуковых колебаний (отсутствие ослабления) и исключает плавление (прогар) дна после выработки всего жидкого лекарственного препарата.

Разработанный ингалятор производился серийно АОЗТ «Алтаймедприбор». Изготовлено и реализовано более 1000 экземпляров ингаляторов «Инал».

Особым достоинством, отмечаемым потребителями, была возможность распыления маслосодержащих лекарственных препаратов.

Опыт применения показал, что такой ингалятор наиболее пригоден для лечебных учреждений. Использование его в домашних условиях для индивидуального лечения не всегда оправдано, из-за достаточно высокой стоимости и необходимости соблюдения определенных технологических приемов (применения в качестве контактной жидкости диэрированной дистиллированной воды с температурой 35–40 градусов, точной дозировки контактной жидкости).

По этим причинам для индивидуального потребителя потребовалось создать более простой в обращении и менее дорогой ингалятор.

Созданные принципиальные и конструктивные технические решения, а также опыт отработки и использования УЗ ингалятора «ИНАЛ» позволили разработать на базе производившегося ранее АО «АПЗ «Ротор» (г. Барнаул) ингалятора «Муссон» новый УЗ ингалятор «ИНАЛ-М», предназначенный для использования в домашних условиях для аэрозольтерапии магнетогидродинамически активированной водой, спиртовыми и водорастворимыми лекарственными препаратами (в том числе содержащими растительные масла – эвкалиптовое, облепиховое, мятное и др.). Такой ингалятор показан на рисунке А.11 в Приложении А.

Ингалятор «ИНАЛ-М» имеет значительно меньшие габариты как электронного блока, так и распылительной камеры. По принципу действия и принципиальным техническим решениям ингалятор «ИНАЛ-М» аналогичен ингалятору «ИНАЛ». Кювета для лекарственного препарата рассчитана всего на 5 мл лекарственного препарата. Кювета выполнена плавающей и обеспечивает распыление препарата без остатка. В качестве излучателя используется вогнутый пьезоэлектрический элемент.

При создании систем магнитной активации привлекла высокая эффективность и простота технической реализации указанного метода, так как для его осуществления требуются лишь постоянные магниты со сравнительно небольшой напряженностью поля, относительно которых протекает жидкость.

Обеспечение оптимальных режимов омагничивания достигается подбором величин скорости потока аэрозоля и индукции магнитного поля. Оптимальными считаются скорость пропускания воды, соответствующая 0,5–2,5 м/с, и значения индукции в пределах 0,07–0,2 Тесла [148].

Омагниченная в ультразвуковом поле высокой интенсивности вода обладает рядом уникальных свойств. Отмечены бактерицидные свойства такой воды, что, возможно, обусловлено свободными радикалами, возникающими при протекании воды относительно магнитов. Омагниченная вода влияет на молекулярную структуру клетки и на пространственную структуру белка, на все виды обменных и репаративных процессов.

Система магнитной активации аэрозоля в созданных ингаляторах осуществляется следующим образом. Пролетая поперек силовых линий магнитного поля, создаваемого магнитом, аэрозоль и крупные капли подвергаются омагничиванию, приобретая тем самым лечебные свойства. В принципе система омагничивания может находиться и снаружи корпуса в области существования мелкодисперсного аэрозоля.

Однако при этом магнитная активация будет далека от максимальной. При размещении же приспособления для омагничивания в области существования и инерционного осаждения крупных капель фонтана последнее, многократно поднимаясь вверх и осажаясь вниз, каждый раз подвергается омагничиванию в поле силовых линий, что эквивалентно использованию системы последовательно установленных магнитов с реверсивно расположенными полюсами. Очевидно, что такой вариант более приемлем ввиду простоты и эффективности омагничивания. Более того, в этом участке патрубка имеет место развитый процесс кавитации жидкости.

В работе [149, 150] указывается, что одновременная обработка потока магнитным и УЗ полями создает эффект больший, чем сумма эффектов от каждого вида воздействий порознь. Создаваемый в результате этого фактора запас по эффективности омагничивания был трансформирован при разработке ингаляторов в снижение требований к силе магнитов и числу ступеней реверсирования вектора магнитной индукции, что, в свою очередь, позволяет уменьшить габариты и стоимостные показатели аппарата.

При разработке и создании ультразвукового ингалятора, предназначенного для групповой аэрозольтерапии, появилась необходимость и возможность подачи аэрозоля необходимой, регулируемой температуры и обеспечить электробезопасность при высоковольтном формировании электроаэрозолей положительной и отрицательной полярности, оказывающих многостороннее физиологическое влияние на разнообразные функции организма.

При этом главным преимуществом электроаэрозолей считается интенсивная всасываемость лекарств из дыхательных путей и легких, что используется как для повышения эффективности лечения указанных органов, так и для общесистемного введения лекарственных веществ или для их избирательного действия на те или иные системы (сердечно-сосудистая, центральная нервная, выделительная и др.).

На основе анализа особенностей электризации аэрозолей и преимуществ ультразвукового способа генерации жидких аэрозолей предложен новый ингалятор [35], в котором использованы уникальные свойства вихревой трубы, основанной на энергоразделительном эффекте Ранка–Хильша.

Вихревая труба является, по существу, единственным электробезопасным источником теплового возбуждения, так как принцип ее работы основан на процессе преобразования кинетической энергии вращающегося воздушного потока в тепловую энергию. При этом преобразование осуществляется в непосредственной близости от места потребления энергии возбуждения, что сводит к минимуму энергетические потери. Свойство вихревой трубы одновременно вырабатывать регулируемые по температуре и расходу горячий и холодный воздушные потоки в диапазоне от минус 100 градусов Цельсия до +140 градусов Цельсия позволяет достичь неожиданных технических эффектов при необходимости нагрева и охлаждения одного и того же участка изделия или рядом расположенных участков; при необходимости получения резких градиентов в условиях конвективного теплообмена; при необходимости быстрой смены режимов нагрева и охлаждения и т.д. Привлекают такие ее качества, как простота, компактность, надежность в работе за счет отсутствия движущихся частей, невысокая стоимость амортизации при питании от промышленной пневмосети или компрессора.

В результате работы вихревой трубы, выполняющей в предложенном ингаляторе роль нагнетателя, происходит разделение подводимого потока сжатого воздуха на два потока: горячий и холодный. Нагретые периферийные слои воздуха вводятся в камеру аэрозолей аппарата, нагревают их до нужной температуры и вытесняются потребителем. Охлажденные приосевые слои воздушного вихря противотоком проходят через область коронирования высоковольтного разрядника.

Благодаря непрерывному охлаждению электродов и разрядного промежутка обеспечиваются наиболее благоприятные условия работы разрядника с точки зрения производительности и стабильности процесса получения аэроионов и озона. Озонированный воздух частично попадает в камеру аэрозолей, при этом озон насыщает как туман, образуемый мелкими капельками, так и жидкость за счет непрерывного ее перемешивания внутренними течениями и фонтаном, образуемым сфокусированным ультразвуком. Суммарное воздействие озона и ультразвука обладает, как известно, эффектом многократного усиления полезных свойств каждого из воздействий, существенно усиливая подавление микробов и разрушение токсинов. Простерилизованная таким образом жидкость, насыщенная озоном, повышает бактерицидные свойства получаемых из нее аэрозолей по сравнению с обычными аэрозолями.

Вторая роль озона проявляется уже вне аппарата, когда, попадая в окружающую среду, газообразный озон и озон, растворенный в капельках аэрозоля, эффективно нейтрализуют микробы и токсины в обрабатываемом помещении.

Таким образом, применение вихревой трубы сообщает предложенным УЗ ингаляторам ряд новых положительных качеств, таких как повышение эксплуатационной надежности, безопасности и долговечности. Одновременно за счет применения уникальных свойств вихревой трубы весьма просто решается задача обеспечения надежной стабильной работы средств создания электроаэрозолей необходимой униполярности, а также повышения бактерицидных свойств аэрозолей за счет озонной стерилизации подаваемого в аппарат воздуха и распыливаемой ультразвуком жидкости. В связи с этим предложенный аппарат имеет ряд преимуществ перед известными установками, предназначенными для применения в стационарных и амбулаторных условиях, а также перед системами кондиционирования воздушной среды в производственных и бытовых помещениях.

Созданные ультразвуковые аэрозольные аппараты позволяют осуществлять мелкодисперсное распыление аэрозолей в фонтане. Однако им присущ ряд недостатков, обуславливающих необходимость поиска новых технических решений.

1. Аппарат функционирует только в вертикальном положении, что исключает его использование за пределами дома или процедурных кабинетов поликлиник в движении или лежачими больными.

2. Аппарат невозможно переносить в снаряженном (подготовленном к работе) состоянии, т.к. любое отклонение аэрозольного аппарата от вертикального положения вызывает пролив распыляемой жидкости. Следствием этого является длительное время подготовки к работе.

3. Аппарат характеризуется высокой потребляемой мощностью, обусловленной использованием фокусировки ультразвуковых колебаний в жидкости, приводящей в значительному затуханию ультразвуковых колебаний высокой частоты (до зоны распыления доходит не более 20 % энергии излучаемых пьезоэлементом колебаний), что исключает использование аппарата в полевых условиях при обеспечении питания от аккумуляторных батарей.

4. Аппарат обеспечивает малую производительность распыления и имеет ограниченный диапазон размеров частиц формируемого аэрозоля, обусловленный использованием только одного способа распыления – распыления в формируемом фонтане [22].

Все перечисленные недостатки существующих конструкций обуславливают невозможность создания на их основе малогабаритного, переносного ультразвукового аэрозольного аппарата постоянной готовности (аналогичного аэрозольным баллончикам под давлением), имеющего независимое батарейное питание и предназначенного для индивидуального пользования.

Частичное устранение перечисленных недостатков обеспечивается в ультразвуковом аэрозольном аппарате [151]. Этот аппарат содержит генератор электрических колебаний и пьезоэлектрический преобразователь, соединенный акустически с промежуточной средой. Генератор электрических колебаний ультразвуковой частоты питает кольцевой пьезоэлектрический элемент, соединенный акустически с промежуточной средой, в ка-

честве которой используется металлический звукопровод в виде распылительной головки с соосно-расположенным сквозным каналом для подачи распыляемой жидкости из резервуара, выполненного в виде замкнутой емкости.

Описанный ультразвуковой аэрозольный аппарат, обеспечивает возможность формирования аэрозолей при любой его пространственной ориентации, однако он также не устраняет остальных недостатков известных конструкций. Кроме того, ему свойственны следующие недостатки:

1. Ультразвуковое распылительное устройство не позволяет формировать аэрозоль с диаметром капель менее 20 мкм, что обусловлено использованием низкой рабочей частоты аэрозольного аппарата (125 кГц). Такой «грубый» аэрозоль не проникает в альвеолы легких, что значительно снижает положительный медицинский эффект от использования аэрозольного аппарата.

2. Аппарат характеризуется повышенными затратами энергии на распыление ввиду отсутствия фокусировки ультразвуковых колебаний в материале звукопровода.

Разрабатываемая конструкция аэрозольного аппарата обеспечивает устранение недостатков существующих конструкций и создание малогабаритного, переносного (карманного), малоэнергоёмкого (с батарейным питанием) ультразвукового аэрозольного аппарата постоянной готовности.

Разработанный ультразвуковой аэрозольный аппарат состоит из генератора электрических колебаний, питающего пьезоэлектрический преобразователь, соединенный акустически с промежуточной средой. В качестве промежуточной среды используется элемент в виде тела вращения с конусным, экспоненциальным или ступенчатым изменением диаметра вдоль длины (концентратор). При этом большая торцевая поверхность концентратора образована плоскими гранями, выполненными симметрично относительно его продольной оси на равных расстояниях от центра меньшей торцевой поверхности. Преобразователь выполнен в виде пьезоэлектрических пластин, соединенных с каждой из граней. В центре меньшей из торцевых поверхностей концентратора размещена полость, сообщающаяся с одной стороны, с этой поверхностью посредством капиллярного отверстия для выхода аэрозоля, а с другой стороны, с резервуаром для подачи распыляемой жидкости.

Наиболее эффективным вариантом реализации аэрозольного аппарата является одновременное питание преобразователя электрическими колебаниями двух частот. Одна из питающих частот соответствует половине длины волны в материале пьезоэлектрических пластин, а вторая соответствует половине длины волны ультразвуковых колебаний в материале элемента в виде тела вращения. При этом меньшая из торцевых поверхностей концентратора имеет поверхность произвольной геометрической формы, например в виде чаши.

Существенного расширения функциональных возможностей аэрозольного аппарата можно добиться соединением полости, выполненной в центре меньшей из торцевых поверхностей, посредством капилляров, проходящих через концентратор и выходящих на большую торцевую поверхность концентратора, с резервуарами для подачи различных по свойствам распыляемых жидкостей.

На рисунке 8.25 для иллюстрации конструкции и пояснения принципа работы представлен эскиз аэрозольного аппарата.

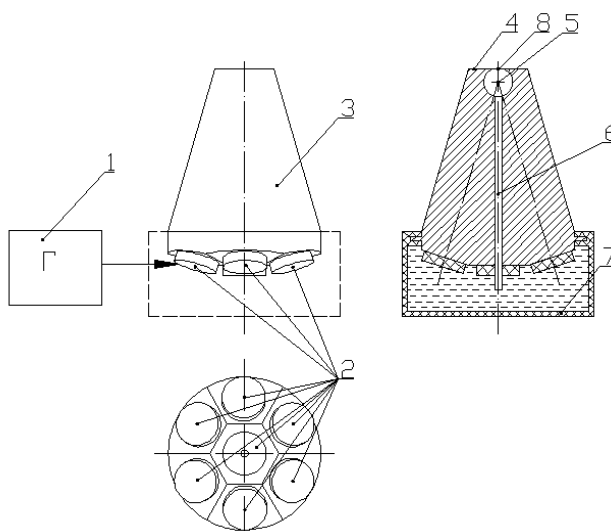
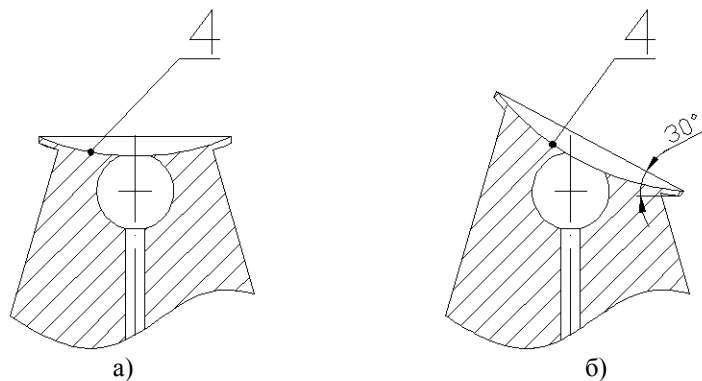


Рисунок 8.25 – Эскиз аэрозольного аппарата

Разработанный ультразвуковой аэрозольный аппарат состоит из генератора электрических колебаний 1, пьезоэлектрических пластин 2, размещенных на гранях большей торцевой поверхности элемента в виде тела вращения 3. Грани большей торцевой поверхности расположены симметрично относительно продольной акустической оси элемента 3, на равных расстояниях от центра меньшей торцевой (распылительной) поверхности 4. В центре распылительной поверхности 4 элемента 3 размещена (выполнена) полость 5, образующая распы-

лительную камеру и имеющая капиллярное отверстие 8 для вывода образованного аэрозоля потребителю. По капилляру 6 полость 5 сообщается с резервуаром для распыляемой жидкости 7.

Распылительная поверхность 4 может иметь поверхность произвольной геометрической формы, например, в виде чаши (рисунок 8.26, а), имеющей произвольный наклон относительно продольной акустической оси элемента 3 (рисунок 8.26, б).



а) – чашеобразная распылительная поверхность;
б) – наклонная распылительная поверхность

Рисунок 8.26 – Возможная форма распылительной поверхности

Полость 5, выполненная в центре распылительной поверхности 4, может соединяться с резервуарами 7 для подачи различных по свойствам распыляемых жидкостей посредством нескольких капилляров 6, проходящих через концентратор и выходящих на большую из торцевых концентратора (рисунок 8.27).

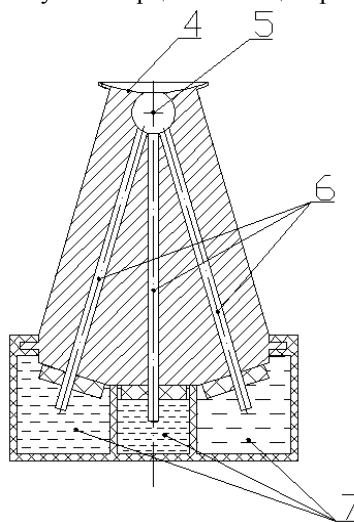


Рисунок 8.27 – Аэрозольный аппарат с возможностью одновременного распыления трех различных жидкостей

В целом конструкция предлагаемого распылителя представляет собой двухчастотную ультразвуковую колебательную систему с ярко выраженными резонансами килогерцового (низкочастотного) и мегагерцового (высокочастотного) диапазонов (резонансы пьезоэлектрических пластин, например, 2,5 МГц и всей конструкции, например, 120 кГц). Система может возбуждаться одновременно на двух резонансах или на каждом в отдельности.

Работа распылительного аппарата осуществляется следующим образом [152].

При возбуждении на частоте килогерцового диапазона (120 кГц), распылитель представляет собой пьезоэлектрическую колебательную систему с концентратором ультразвуковых колебаний, роль которого выполняет элемент 3. В этом случае генератор 1 создает электрические колебания ультразвуковой частоты, равной продольной резонансной частоте элемента 3. Мощности ультразвуковых колебаний, генерируемые пьезоэлектрическими пластинами 2, складываются на распылительной поверхности 4, и распыление жидкости происходит со всей поверхности 4. Форма и направление формируемого факела распыления определяются формой распылительной поверхности 4.

На рисунке 8.28 показан факел распыления, формирующийся поверхностью распыления в форме чаши, с углом наклона 30° . Подача жидкости на распылительную поверхность 4 происходит посредством капилляра 6 за счет разряжения возникающего на поверхности 4. Средний диаметр капель аэрозоля, формируемого на этой частоте, равен 18–20 мкм.

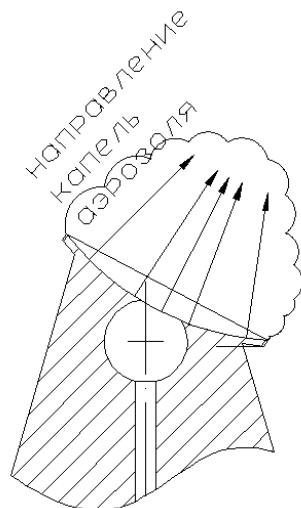


Рисунок 8.28 – Формируемый факел аэрозоля

На частоте мегагерцового диапазона генератор 1 создает электрические колебания высокой частоты, равной резонансной частоте (например, 2,5 МГц) пьезоэлектрических пластин 2, преобразуемые за счет пьезоэффекта пьезоэлектрическими пластинами 2 в ультразвуковые колебания, собираемые в полости 5 в центре распылительной поверхности 4 концентратора 3. Ультразвуковые колебания, возникающие в полости 5, вызывают разряжение внутри этой полости, обеспечивающие подачу распыляемой жидкости по капилляру 6 в полость 5. При этом сечение капилляра 6 выбирается таким образом, чтобы силы поверхностного натяжения удерживали находящуюся в нем жидкость, исключая ее самопроизвольное вытекание при любом положении аэрозольного аппарата. При выполнении нескольких капилляров 6 одновременная подача различных распыляемых жидкостей осуществляется аналогичным образом и под действием ультразвуковых колебаний в полости 5 происходит их смешивание. После заполнения полости 5 ультразвуковые колебания, приходящие в эту полость, окончательно фокусируются в распыляемой жидкости, вызывая ее мелкодисперсное (3–5 мкм) распыление через капиллярное отверстие 8.

Наиболее эффективным является режим работы, при котором генератор 1 создает электрические колебания высокой частоты мегагерцового диапазона (2,5 МГц), модулированные колебаниями килогерцового диапазона (120 кГц) (рисунок 8.29). В этом случае происходит одновременное высокочастотное распыление жидкости из полости 5 и низкочастотное распыление с поверхности 4.

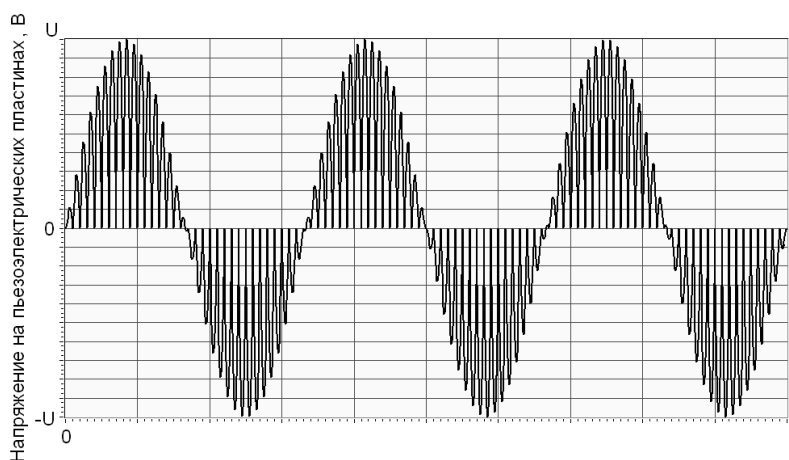


Рисунок 8.29 – Форма напряжения, питающего распылитель

Получаемый в таком режиме распыления аэрозоль имеет распределение капель различного размера в общем объеме аэрозоля, показанное на рисунке 8.30.

На гистограмме, показанной на рисунке 8.30 (ось X – диаметр капли, ось Y – процентное содержание капель указанного диаметра в общем объеме состава аэрозоля), отчетливо видны два максимума, соответствующие диаметрам капель (3–5 мкм и 18–20 мкм), образующихся при возбуждении распылителя на частотах его основных резонансов (2,5 МГц – резонанс пьезоэлектрических пластин 2, и 120 кГц – резонанс элемента в виде тела вращения 3). Промежуток между основными диаметрами капель (3–5 мкм и 18–20 мкм) также достаточно «плотно» заполнен каплями промежуточного диаметра. Изменяя взаимное расположение основных резонансов распылителя можно регулировать плотность заполнения этого промежутка.

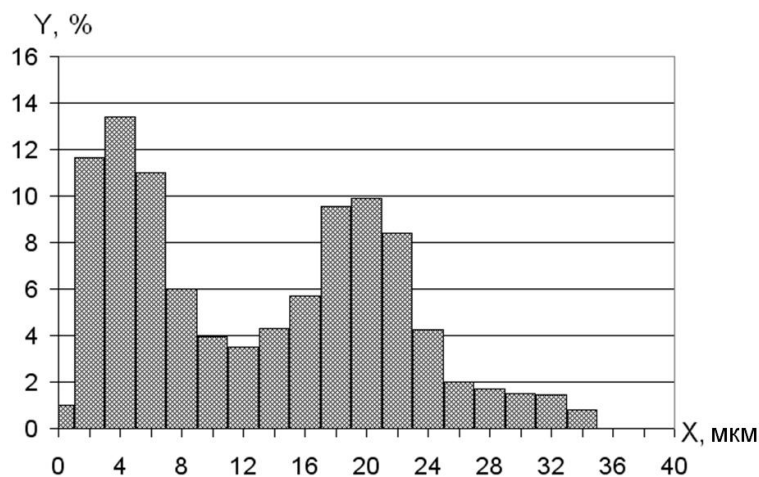


Рисунок 8.30 – Распределение капель формируемого аэрозоля

Таким образом, в предлагаемой конструкции происходит двойное фокусирование ультразвуковых колебаний:

- 1) в металлическом концентраторе;
- 2) в малом объеме жидкости, находящейся в полости 5 (в активной зоне распылителя).

Это позволяет говорить об эффективности применения предлагаемого аэрозольного аппарата для генерации аэрозоля с заданными дисперсными характеристиками. Об энергетической эффективности предлагаемой конструкции распылителя можно судить по степени фокусировки ультразвуковой энергии в материале концентратора 3 (рисунок 8.31). Интенсивность звуковой энергии в полости 5 в центре торцевой поверхности 4 (в распылительной камере) не менее чем в 30 раз превосходит интенсивность звуковой энергии на поверхности пьезоэлектрических пластин 2, при этом в процессе распыления воды с производительностью распыления 1 мл/мин расходуется не более 3 Вт электрической энергии. Все это позволяет говорить о высокой энергетической эффективности преобразователя.

Благодаря таким низким энергетическим затратам электронный генератор для питания распылителя может иметь простое схемотехническое решение и выполняться по схеме автогенератора, изготовленного на одной интегральной схеме (например, FSFR1700 фирмы FAIRCHILD SEMICONDUCTOR) с возможностью питания от стандартного гальванического элемента. При этом суммарная электрическая мощность, потребляемая устройством (с учетом потерь), не превысит 5–6 Ватт.

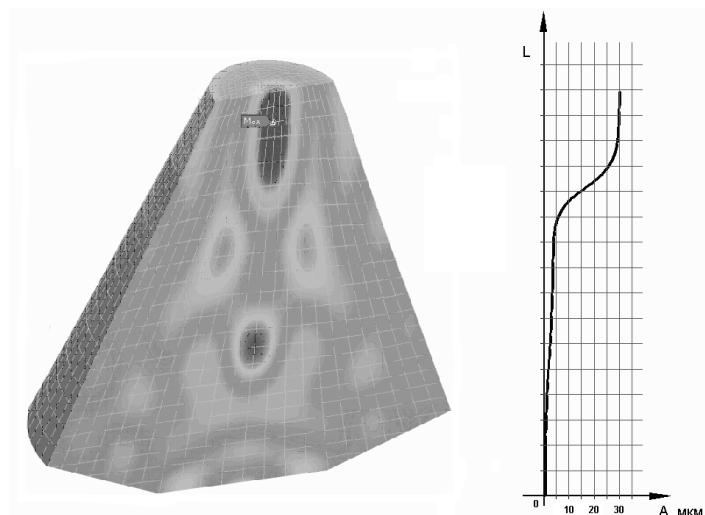


Рисунок 8.31 – Фокусирование УЗК в концентраторе

Предложенные конструкции ультразвукового аэрозольного аппарата позволяют создать портативные ультразвуковые аэрозольные аппараты, в которых отсутствует возможность вытекания распыляемой жидкости. Применение такого аэрозольного аппарата максимально просто – аналогично применению ингалятора для астматиков. Нажал кнопку – происходит генерация аэрозоля. Однако в отличие от существующих портативных ингаляторов, использующих гидродинамический способ распыления, в предложенном устройстве формируется мягкий равномерный аэрозоль, легко проникающий в альвеолы легких.

Таким образом, проведенные исследования обеспечили дальнейшее развитие технологии ультразвукового распыления жидкостей. Полученные результаты позволили создать более 10 типов ультразвуковых распылителей различного назначения. Внешний вид и технические характеристики разработанного оборудования приведены в Приложении А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работ получили дальнейшее развитие ультразвуковые технологии мелкодисперсного распыления различных жидкостей (в т.ч. высоковязких). Это развитие стало возможным благодаря применению автоматического управления процессом распыления, разработке методик расчета ультразвуковых распылителей, созданию современных образцов ультразвуковой распылительной техники.

Представленные в работе результаты теоретических и экспериментальных исследований показали возможность повышения эффективности ультразвукового распыления за счет выявления, установления и автоматического поддержания оптимального режима ультразвукового воздействия. В результате определены физические свойства жидкостей, оказывающие наибольшее влияние на процесс распыления и требующие учета их влияния, и разработана теоретическая модель, поэтапно описывающая процесс распыления и позволяющая определить оптимальную толщину слоя распыляемой жидкости, необходимую амплитуду ультразвуковых колебаний в зависимости от свойств этой жидкости и требуемой производительности распыления.

На основании анализа полученных результатов предложен способ автоматического управления процессом ультразвукового распыления, положенный в основу концепции созданных ультразвуковых распылителей. Предложены и исследованы узлы ультразвукового аппарата, необходимые для его практической реализации.

Конечным итогом проведенных работ явилось создание различных модификаций ультразвукового распылительного оборудования, отличающегося высокой производительностью и заданной дисперсностью распыления, допустимой вязкостью распыляемых жидкостей и имеющего широкий круг областей применения: промышленность, медицина, электроника, нанотехнологии и др.