

2 ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Реализуемые на практике в настоящее время способы распыления жидкостей основаны на использовании различных способов подвода энергии. На этом основана классификация наиболее часто применяемых на практике способов распыления жидкостей [15], представленная на рисунке 2.1.

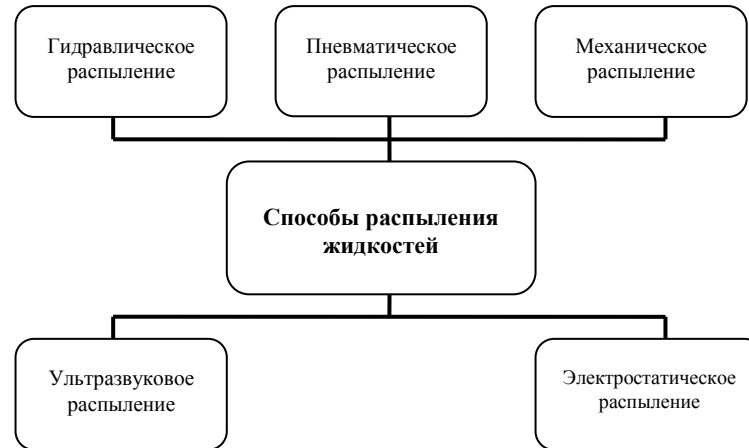


Рисунок 2.1 – Классификация способов распыления жидкостей

Для количественной оценки эффективности параметров факела распыла, получаемого при помощи указанных способов распыления жидкостей, введены следующие характеристики, общие для всех способов распыления [15].

Дисперсные, определяющие факел как некоторую совокупность частиц различных размеров. Они включают: дифференциальные (частотные) и интегральные (суммарные) кривые распределения числа (поверхности, массы) капель по диаметрам; удельную поверхность капель; средний диаметр капель; удельную поверхность капель и иногда критерий гомогенности, показывающий степень однородности распыла.

Абсцисса максимума на частотной кривой (или точек перегиба на суммарных кривых) представляет собой диаметр наиболее часто встречающихся капель. Этот диаметр называется модой. Диаметр, который делит количество частиц под суммарной кривой пополам, принято называть медианным.

Другие средние диаметры, характеризующие распыл можно представить общей формулой:

$$d_{f,k} = \left(\frac{\sum d_i^f n_i}{\sum d_i^k n_i} \right)^{\frac{1}{f-k}}, \quad (2.1)$$

где f, k – целые числа, зависящие от способа осреднения;

i – номер фракции, на которые разбита совокупность капель;

d_i – средней диаметр i -й фракции;

n_i – число капель i -й фракции.

В инженерной практике для определения дисперсных характеристик используются эмпирические (чаще всего критериальные) уравнения, полученные при обобщении экспериментальных материалов для каждой конструкции или класса распылителей.

Характеристики распределения, отражающие профиль удельных потоков жидкости по сечению факела. К ним относятся коэффициент радиальной $k_{i,\delta}$ и окружной $k_{i,\hat{i}}$ неравномерности. Первый показывает, насколько распределение плотности орошения (отношение секундного расхода жидкости к площади перпендикулярной движению капель) отличается от идеально равномерного, а второй позволяет оценить, насколько факел распыла симметричен относительно оси:

$$k_{i,\delta} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \frac{|q_i - \bar{q}|}{q} f_i, \quad (2.2)$$

$$k_{i,\hat{i}} = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{\bar{q}}, \quad (2.3)$$

где $F = \sum_{i=1}^n f_i$ – полная площадь факела в исследуемом сечении;

q_i – плотность орошения i -й кольцевой зоны;

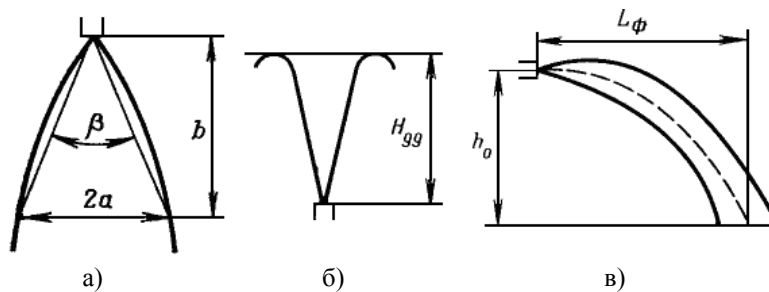
$\bar{q} = \sum q_i / N$ – средняя по сечению плотность орошения;

N – число кольцевых зон, на которое разбито сечение секторных зон, на которое разбито сечение факела;

q_{\max} и q_{\min} – максимальная и минимальная плотность орошения секторных зон, на которые разбиваются факел при определении $k_{i,i}$.

Коэффициент неравномерности в значительной мере определяется и характером распределения плотности орошения по сечению факела.

Характеристики формы, позволяющие определять габариты факела на определенном расстоянии h от распылителя. К ним относятся корневой угол факела $\beta = 2 \arctg\left(\frac{a}{b}\right)$ (рисунок 2.2, а), диаметр факела на расстоянии h и дальнобойность факела. При вертикальном факеле за дальнобойность принимаю высоту H_{99} , на которую поднимается не менее 99 % всей жидкости (рисунок 2.2, б), а при горизонтальном – расстояние L_ϕ от кромки распылителя до перпендикуляра, восстановленного из точки пересечения центральной линии факела с контрольной плоскостью (рисунок 2.2, в).



а) – корневой угол; б, в – дальнобойность вертикального и горизонтального факелов соответственно
 Рисунок 2.2 – Определение корневого угла факела и его дальнобойности

Энергетические характеристики, использующиеся для оценки экономичности способа распыливания или распыливающего устройства.

Подводимая к распылителю энергия E расходуется: на преодоление сил поверхностного натяжения при распаде струи (пленки) жидкости на капли – энергия распыливания E_p ; на сообщение жидкости поступательного движения – гидравлическая энергия E_r ; на преодоление сил трения в распылителе и диссипацию энергии в потоке – энергия потерь E_γ .

Таким образом, $E = E_p + E_r + E_\gamma$. Отношение $\frac{E_p}{E} = \eta_p$ называется КПД распыливания. Он отражает долю энергии, пошедшей на образование новой поверхности (капель), и зависит главным образом от способа распыливания и физических свойств жидкости (обычно η_p не превышает сотых долей процента). Отношение $\frac{E_p}{E} = \eta_A$ – гидравлическое КПД. Он характеризует потери энергии в распылителе (т.к. $E_\gamma \approx E - E_r$) и зависит от его конструкции, качества изготовления и режима течения жидкости.

Гидродинамические параметры, которые включают скорости капель и газа в любом сечении факела и порозность факела. Они необходимы для расчета тепломассообменных процессов, протекающих в распылах, и определяются начальной скоростью и размером капель, формой факела, а также свойствами газовой среды.

2.1 Гидравлическое распыление

При гидравлическом распылении [15–17] основным фактором энергетического воздействия, приводящим к распаду жидкости на капли, является давление нагнетания. Проходя через распыляющее устройство (материальное сопло или форсунку), жидкостной поток, во-первых, приобретает довольно высокую скорость, во-вторых, преобразуется в форму, способствующую быстрому распаду (струя, пленка, крупные частицы, в зависимости от принадлежности распылителя к тому или иному классу).

Технически процесс гидравлического распыления реализуется при помощи форсунок, которые по принципу действия подразделяются на струйные, с соударением струй, ударно-струйные, центробежные, центробежно-струйные и комбинированные форсунки.

Струйные форсунки представляют собой насадок с цилиндрическим или какой-либо другой формы отверстием. Вытекающая из него под действием перепада давления струя распадается на капли, образуя грубый полидисперсный факел с малым корневым углом.

Работа форсунок с соударением струй основана на взаимном разбивании на капли нескольких струй, вытекающих из соответствующих насадок. Из точки столкновения двух цилиндрических струй результирующий поток растекается радиально, образуя плоскую пленку, распадающуюся на капли. При столкновении трех и более цилиндрических струй предотвращается выброс части жидкости в верхнюю полуплоскость, а столкновение плоских струй позволяет получить факел, имеющий в сечении форму, близкую к прямоугольной.

В ударно-струйных форсунках распыливание происходит за счет удара струи о расположенный напротив сопла отражательный элемент. В зависимости от конструкции отражателя образуется факел в виде одиночного полого конуса или в виде нескольких вставленных друг в друга конусов.

Центробежные форсунки имеют либо тангенциальные входные отверстия, либо шнек (или аналогичный элемент), что придает подаваемой жидкости вращательное движение. В сопловом канале жидкость движется вдоль его стенки в виде тонкой пленки, а центр заполняет так называемый воздушный вихрь. При истечении из сопла пленка распадается, образуя факел в виде полого конуса.

Центробежно-струйные форсунки отличаются от центробежных наличием двух потоков, взаимодействующих в камере смешения, на которые разделяется подводимая жидкость. Первому, периферийному, сообщается вращение, а второй подается в камеру смешения в виде осевой струи. Вращающийся поток передает часть энергии центральной струе и частично раскручивает ее, а сам несколько тормозится. В результате образуется единый результирующий поток, который за пределами соплового канала разрушается с образованием факела в виде заполненного конуса.

Комбинированные форсунки состояются из двух или более распылителей рассмотренных классов, объединенных общим корпусом.

Наиболее распространенные струйные форсунки [16] представляют собой насадку с цилиндрическим или какой-либо другой формы отверстием (соплом). Вытекающая из него под действием перепада давления струя распадается на капли с довольно большим разбросом размеров по диаметру. На рисунке 2.3 приведены схемы струйных форсунок с цилиндрическим, щелевым, кольцевым соплом и с соплом в виде круговой прорези.

Гидравлическое распыление – простой и самый экономичный по потреблению энергии способ распыления (2–4 кВт на распыление 1 т жидкости). Однако такой способ имеет серьезные недостатки, обусловленные тем, что создаваемый при гидравлическом распылении факел – неоднородный. Также он имеет среди существующих способов распыления самую большую дисперсию образующихся капель и сильно затрудненное регулирование расхода при заданном качестве дробления жидкости. Кроме этого, рассмотренным способом практически неосуществимо:

- распыление высоковязких жидкостей, широко применяемых в химических производствах;
- распыление жидкости с малым расходом;
- мелкодисперсное распыление.

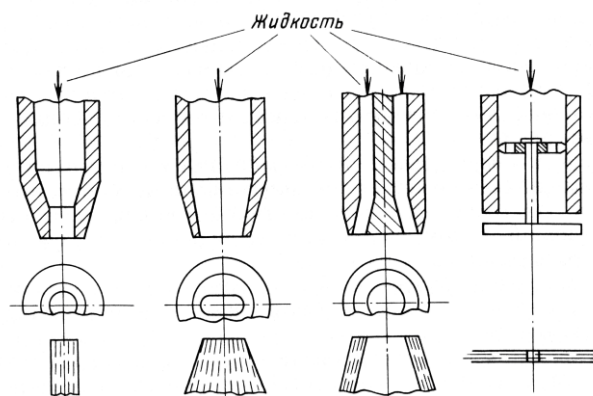


Рисунок 2.3 – Формы сопловых каналов и образующихся струй в струйных форсунках

Таким образом, способ гидравлического распыления применяется в химическом производстве только благодаря относительной простоте его реализации.

2.2 Механическое распыление

При этом способе жидкость получает энергетическое воздействие вследствие трения о быстровращающийся рабочий элемент [18, 19]. Приобретая вместе с рабочим элементом вращательное движение, жидкость под действием центробежных сил срывается с распылителя (в виде пленок или струй) и дробится на капли.

При классификации механических распылителей необходимо учитывать два основных признака, определяющих механизм течения и дробления жидкости: способ ее подвода и конструкцию рабочего элемента.

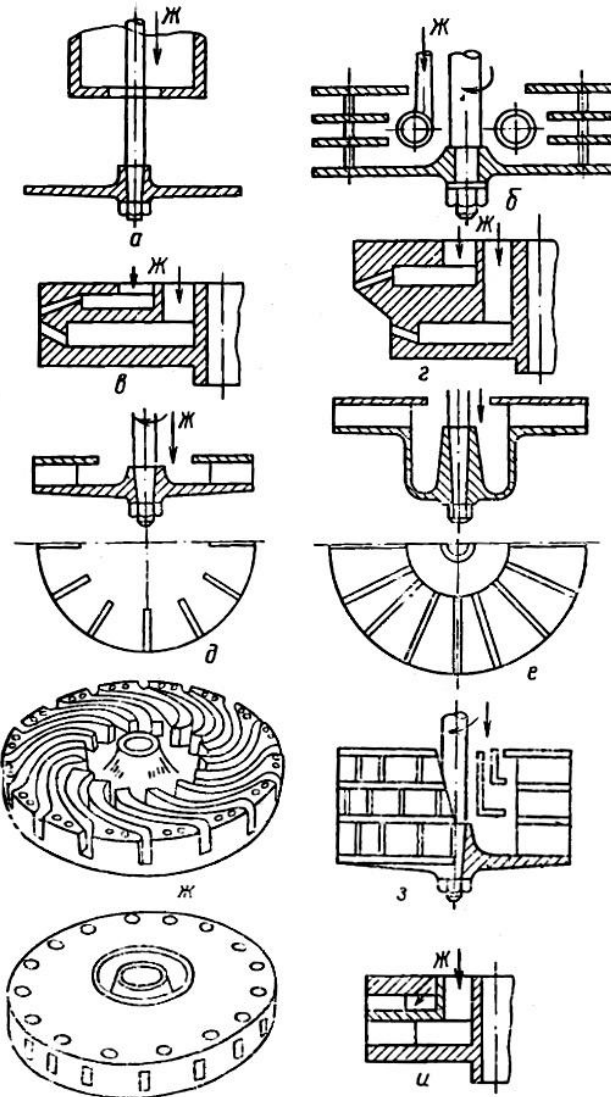
По способу подвода жидкости механические распылители делятся на устройства с непосредственной подачей жидкости на рабочий элемент и погружные. По конструкции рабочего элемента можно выделить дисковые, чашечные, конусные, звездочные, сопловые и реактивные распылители.

Принцип работы механических распылителей с дисковым, чашечным, конусным и звездочным элементами аналогичен. Под действием центробежных сил распыляемая жидкость течет по рабочему элементу и распыливается за его пределами. Конструктивными особенностями обеспечивается различный характер распределения жидкости в распыле. В конусном распылителе, в отличие от погружного дискового, центробежные силы способствуют подъему жидкости из питательной емкости, а распыление осуществляется равномерно по всему периметру в горизонтальной плоскости. Сопловые и реактивные распылители по характеру течения жидкости и принципу распыления мало отличаются от гидравлических форсунок, а наличие вращающегося узла объединяет их с механическими распылителями, т.е. они занимают как бы промежуточное положение. В сопловых распылителях перепад давления жидкости на соплах создается под действием центробежных сил, а в реактивных – под действием энергии нагнетания, причем сопла в них расположены под некоторым углом к оси вала, что обуславливает возникновение реактивного момента вращения.

Форма образующегося газожидкостного факела и все его характеристики при механическом распылении определяются конструкцией и классом рабочего элемента. Исключение составляют распыляющие устройства, в которых рабочий элемент приводится во вращение за счет энергии самой распыляемой жидкости (прежде всего реактивные распылители), так как привод и рабочий элемент в них обычно представляют единые устройства.

Формы рабочих элементов обусловлены требованием создания равномерно расположенной по смоченному периметру тонкой пленки и образования определенного факела распыленных частиц с минимальной разницей в размерах. Рабочие элементы формируют пленку жидкости и режим ее течения, предопределяя степень ее турбулизации и внутренние пульсации, от которых зависит качество дробления.

Дисковые рабочие элементы с непосредственной подачей жидкости. Наибольшим многообразием конструктивных вариантов отличаются дисковые рабочие элементы. Наиболее типичные из них представлены на рисунке 2.4. Самым простым является тарельчатый диск (см. рисунок 2.4, а). На рисунке 2.4, б показан плоский многоярусный диск, имеющий три рабочие плоскости и крышку. Жидкость по трубе поступает в коллектор и через отверстия – в полость диска в виде струй. Последние, попадая на тарелки диска, формируются в пленку на рабочих поверхностях соответствующего яруса.



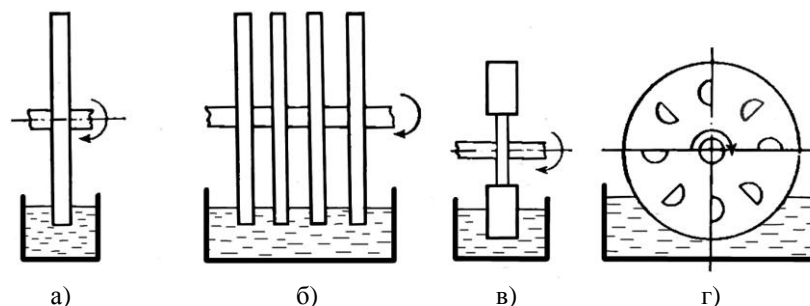
а – гладкий одиночный диск; б – гладкий многоярусный диск;
 в, г – с пересечением факелов; д, е, ж, з, и – лопастные диски

Рисунок 2.4 – Схемы дисковых распыляющих элементов с непосредственной подачей жидкости

Дисковые рабочие элементы с соударением (пересечением) двух факелов представлены на рисунке 2.4, в, г. В схеме на рисунке 2.4, в пересечение происходит на одинаковых расстояниях обоих факелов от кромки диска, а на рисунке 2.4, г – на разных, т.е. соударяются два факела с различной дисперсностью.

Рассмотренные дисковые рабочие элементы распылителей хотя и позволяют создавать широкий факел, но обладают значительным вентиляционным эффектом, что во многих случаях является их существенным недостатком. Кроме того, большинство из рассмотренных рабочих элементов довольно громоздки.

Другим распространенным типом рабочих элементов механических распылителей являются погружные рабочие элементы. Погружные диски выполняются гладкими и лопастными (рисунок 2.5, а–г), причем на общем валу может быть установлено несколько дисков.



а – одиночный диск; б – многодисковый распылитель;
в – лопастной диск; г – диск с карманами
Рисунок 2.5 – Схемы погружных рабочих элементов

Все погружные диски отличаются неравномерностью распределения жидкости по периметру непогруженной части. Для некоторого выравнивания распределения в конструкцию дисков вводят специальные устройства, например карманы (см. рисунок 2.5, г), которые заполняются жидкостью при погружении и опорожняются во второй фазе движения непогруженной части, т.е. в зоне пониженного самопитания. Однако полного выравнивания не удается обеспечить даже путем конструктивных усложнений.

Также недостатками рассматриваемого способа является то, что вращающиеся распылители дороги, сложны в изготовлении и эксплуатации, имеют высокую энергоемкость (свыше 15 кВт на распыление 1 т жидкости), не позволяют осуществлять мелкодисперсное распыление и, кроме того, как уже указывалось, обладают вентиляционным эффектом. Механическое распыление используют главным образом для дробления вязких жидкостей и суспензий при условии, что другие способы распыления не применимы.

2.3 Пневматическое распыление

При этом способе распыления энергия подводится к жидкости в основном в результате динамического взаимодействия жидкости с потоком газа [20]. При пневматическом распылении определяющим фактором разрушения сплошности жидкости является воздействие скоростного потока газа, выходящего из канала с большой скоростью (50–300 м/с), в то время как скорость истечения жидкости сравнительно невелика. При этом возникает трение между струями газа и жидкости, в результате чего струя жидкости как бы вытягивается в отдельные нити. Эти нити быстро распадаются в местах утончения и образуют мелкие капли.

Сложность исследования процессов, протекающих в пневматических форсунках, затрудняется невозможностью выделения какого-либо параметра в качестве основной характеристики. Поэтому авторами [16] разработана классификация пневматических форсунок по пяти основным признакам.

Первым из них является перепад давления распыляемой жидкости и распыляющего агента (газа). По перепаду давления пневматические форсунки делятся на форсунки низкого давления (давление жидкости 30–200 кПа, давление газа 10–25 кПа), высокого давления (давление жидкости 5–500 кПа, давление газа 0,1–0,6 МПа) и пневмогидравлические (давление жидкости 0,05–0,5 МПа, давление газа 50–200 кПа).

По месту контакта распыляемой жидкости и распыляющего газа пневматические форсунки делят на форсунки внешнего и внутреннего смешения. В форсунках внешнего смешения взаимодействие потоков и собственно процесс распыливания происходят за пределами форсунки, в непосредственной близости от сопла, под действием разности скоростей распыляемой жидкости, распыляющего газа и окружающей среды. В форсунках внутреннего смешения потоки взаимодействуют перед истечением из форсунки, обычно в конечном объеме внешнего газового (воздушного) сопла, длина которого несколько больше, чем внутреннего жидкостного. Из сопла вытекает газожидкостная смесь, и образовавшиеся при внутреннем смешении первичные крупные капли в результате взаимодействия с окружающей средой распадаются на более мелкие.

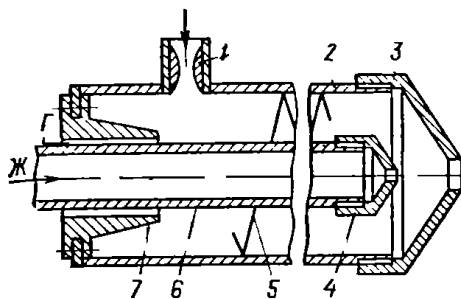
По распределению массы распыляемой жидкости и распыляющего газа пневматические форсунки могут быть одно- и многоструйными. В одноструйных форсунках взаимодействует только одна струя жидкости с одной струей газа. Такие форсунки могут быть внешнего и внутреннего смешения. Многоструйные форсунки обычно выполняют по одному из двух вариантов. По первому варианту жидкостная струя (движущаяся по внутреннему кольцевому каналу) омывается с двух сторон газовыми струями (первая течет по внутреннему цилиндрическому каналу, вторая – по внешнему кольцевому); такие форсунки называют двухсторонними. По второму варианту газовая струя взаимодействует с несколькими втекающими в нее струями жидкости, т.е. выполняется несколько ступеней смешения. Такие форсунки называют многоступенчатыми; они могут быть только внутреннего смешения.

В зависимости от направления движения жидкости и газа перед взаимодействием пневматические форсунки можно разделить на форсунки с однонаправленным, встречным и перекрестным движением потоков.

По характеру движения потоков перед распыливанием (что в значительной мере определяет форму факела распыла) пневматические форсунки делят на прямоструйные и вихревые. В прямоструйных форсунках жидкость и газ вытекают из каналов в виде сплошной (цилиндрической, кольцевой или плоской) струи. В вихревых форсунках жидкости или газу, или обоим потокам перед их взаимодействием придается вращательное движение – противоположное или однонаправленное.

На рисунке 2.6 приведена схема одной из разновидностей пневматической форсунки.

К достоинствам пневматического способа распыления относятся: возможность получения относительно мелкодисперсных капель жидкости (средним диаметром порядка 100–200 мкм), менее выраженная зависимость качества распыления от расхода жидкости, по сравнению с рассмотренными способами, надежность в эксплуатации, возможность распыления относительно вязких жидкостей.



1 – тангенциально встроенный патрубок; 2 – внешняя труба;
3, 4 – сопла; 5 – спиральный завихритель; 6 – внутренняя труба;
7 – втулка

Рисунок 2.6 – Схема пневматической форсунки

Недостатками способа являются:

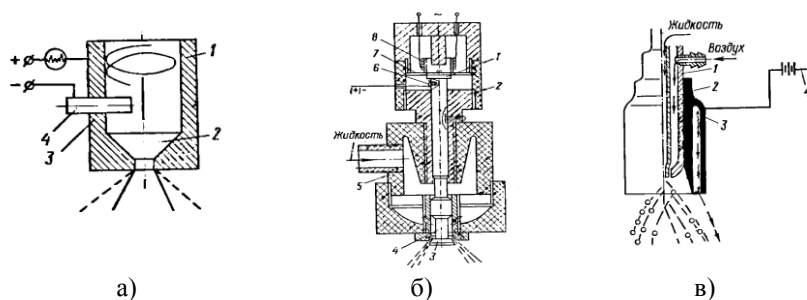
- высокий расход энергии на распыление (50–60 кВт на 1 т жидкости);
- необходимость в распыливающем агенте и в оборудовании для его подачи, что значительно сокращает область применения данного метода;
- достаточно высокая дисперсия диаметров капель получаемого распыла.

2.4 Электростатическое распыление

При реализации этого способа жидкости еще до ее истечения или в момент истечения сообщают электростатический заряд [15]. Под действием кулоновских сил пленка жидкости распадается на капли таких размеров, при которых силы взаимного отталкивания капель уравниваются силами поверхностного натяжения. Электризация распыляемой жидкости осуществляется путем подвода потенциала к штуцеру распылителя, электростатической индукцией, коронным разрядом и другими способами, и осуществляется в специализированных форсунках.

Форсунки с искусственной электризацией распыляемой жидкости можно условно разделить на три основные группы: для распыления жидкостей (в том числе и вязких), для нанесения покрытий и для распыления порошков (рисунок 2.7).

Недостатками электростатического распыления являются необходимость в дорогостоящем оборудовании, его высокая энергоемкость, малая производительность и сложность обслуживания. Главным образом этот метод находит применение в некоторых типах распылительных сушилок и при нанесении покрытий методом распыления.



а) 1 – корпус; 2 – камера закручивания;
3 – электроизолирующая втулка; 4 – электропроводный стержень;
б) 1 – диэлектрическая шайба; 2 – втулка; 3 – отражатель;
4 – электрод; 5 – корпус; 6 – контактный болт; 7 – мембрана;
8 – электромагнит; в) 1 – корпус; 2 – кольцевой изолятор;
3 – кольцо с электродами; 4 – генератор
Рисунок 2.7 – Форсунки для электростатического распыления

2.5 Проблемы и перспективные способы распыления жидкостей

Из проведенного анализа следует, что все рассмотренные способы распыления [15–20] обладают рядом недостатков, которые ограничивают их возможности и вызывают значительное снижение эффективности химико-технологических процессов, основанных на распылении.

Так, например, задача распыления очень малых количеств жидкости встречается довольно часто [21]. Такая потребность возникает при необходимости быстрого испарения криогенных жидкостей в специальных аппаратах, при генерировании аэрозолей или тумана в замкнутом объеме климатических камер, при получении очень чистых веществ в практике лабораторных исследований на малых моделях, при распылении жидкости для спектрального анализа и т.п. Создать распылитель, который обеспечивал бы однородное распыление при очень малых расходах жидкости, на основе традиционных методов весьма сложно [15].

Задачи распыления жидкостей, содержащих механические включения или продукты с повышенной склонностью к адгезии, приходится решать, например, в аппаратах мокрой газоочистки с циркуляционным использованием промывной жидкости, в охладителях систем водооборота и т.д. В этом случае, из рассмотренных способов для распыления подходят лишь механические распылители с погружными рабочими элементами. Если же расход жидкости незначителен или требуется получение высокодисперсного распыла, например, в аппаратах малой мощности, то и механическое распыление становится непригодным.

Помимо инженерных задач, немаловажной проблемой распылительной техники является повышение экономичности распыления. В установках небольшой производительности затраты энергии на распыление жидкости незначительны и составляют несколько процентов от общих затрат. В многотоннажных производствах, когда распылению подвергаются сотни и даже тысячи кубометров жидкости в час, например в градирнях, расходы электроэнергии составляют тысячи кВт/ч. В этих случаях повышение экономичности распыления становится насущной задачей, а ее решение дает существенный экономический эффект.

Вместе с тем известно [15, 16, 19], что КПД распыления всех рассмотренных устройств составляет сотые доли процента. Значение $\text{КПД}=0,1\%$ можно считать максимальным для рассмотренных способов распыления. Под КПД распыления понимается доля энергии, необходимой для образования новой поверхности, от общих энергозатрат на распыление единицы объема жидкости.

Независимо от выбранного способа распыления уменьшение размера капли неизбежно влечет за собой повышение удельных энергозатрат, т.е. снижение КПД распыления. Так, при гидравлическом распылении для уменьшения размера капель приходится увеличивать перепад давления жидкости на форсунке. Например, при распылении 1 м^3 воды при $P=0,2\text{--}0,4\text{ МПа}$ размер капель составляет $250\text{--}300\text{ мкм}$, а КПД – $0,05\text{--}0,07\%$. Для получения капель диаметром 100 мкм перепад давления приходится увеличивать до $1\text{--}1,5\text{ МПа}$, при этом КПД падает до $0,02\text{--}0,03\%$. Если требуемый размер частиц составляет 50 мкм , давление возрастает до $3\text{--}4\text{ МПа}$, а КПД снижается до тысячных долей процента.

Таким образом, удельные энергозатраты быстро возрастают с уменьшением размера частиц. Аналогичная картина наблюдается и при использовании других рассмотренных способов распыления, с той лишь разницей, что начальное значение КПД еще ниже. При пневматическом распылении приходится увеличивать расход распыляющего агента, а при механическом – частоту вращения рабочего элемента.

Увеличить долю энергии, затрачиваемой непосредственно на распыление, решить проблемы инженерного характера, стоящие перед распыляющей техникой, позволяют новые, перспективные способы распыления, к которым относится ультразвуковое (УЗ) распыление.

2.6 Принцип и физический механизм ультразвукового распыления жидкостей

При ультразвуковом способе распыления жидкость переходит в аэрозольное состояние за счет увеличения поверхностной энергии пленки жидкости, которое достигается путем наложения на нее механических колебаний высокой интенсивности [21–27] ультразвуковой частоты.

Основными преимуществами ультразвукового распыления жидкостей, по сравнению со способами, описанными выше, являются [22, 24]:

- низкая энергоемкость;
- высокая производительность процесса;
- возможность получать мелкодисперсное распыление;
- возможность получать монодисперсное распыление;
- возможность распылять высоковязкие жидкости без применения дополнительного распыляющего агента;
- наличие в каплях жидкости циркуляционных токов, способствующих ускорению процессов теплообмена, массопереноса и других на поверхности капли.

Благодаря указанным достоинствам ультразвуковое распыление жидкости находит применение в медицине, химической, радиоэлектронной и металлообрабатывающей промышленности.

При ультразвуковом распылении переход жидкости в аэрозольное состояние может осуществляться при помощи различных способов подвода ультразвуковой энергии, расходуемой на распыление жидкостей, анализ эффективности которых приведен ниже.

2.6.1 Классификация способов ультразвукового распыления жидкостей

В аэрозольное состояние под действием ультразвуковых колебаний жидкость переходит на границе раздела газовой и жидкой сред. Акустическая энергия может быть подведена к зоне распыления как со стороны жидкости, так и со стороны газа. Существует следующая классификация способов акустического распыления жидкости [28]:

1. Распыление жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через газ.
2. Распыление жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через жидкость:
 - а) распыление жидкости в фонтане (высокочастотные ультразвуковые колебания);
 - б) распыление жидкости в слое (низкочастотные УЗ колебания);

Распыление жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через газ – наиболее исследованный способ акустического распыления жидкости. О физическом механизме распыления жидкости этим способом высказано два общих предположения. Фортман В. К. [29] полагает, что аэрозоль образуется в результате разрушения струй и капель жидкости турбулентными пульсациями давления, вызванными мощным звуковым полем. Ламекин Н. С. [30, 31] считает, что механизм распыления – кавитационный.

Для реализации такого процесса распыления используются газоструйные излучатели, в активную зону которых подается жидкость. Пример распыления при помощи такого излучателя показан на рисунке 2.8. Образуемый при этом распыл имеет самый высокий разброс диаметров капель среди ультразвуковых методов распыления.



Рисунок 2.8 – Распыление газоструйным излучателем

Например, при распылении воды средние диаметры капель лежат в пределах 18–260 мкм. Поэтому этот способ ограничено применяют только для решения задач, где требуется высокая производительность и дис-

перный состав получаемого распыла не имеет принципиального значения, например, в форсунках мощных водогрейных котлов, для карбюрации в двигателях внутреннего сгорания, в некоторых типах распылительных сушилок, противопожарных установках. Основным достоинством данного способа является более низкая энергоёмкость по сравнению со способами, рассмотренными ранее.

В случае распыления жидкости с подведением акустической энергии к рабочей зоне через жидкость различают распыление высокочастотными (1–3 МГц) [22, 32, 33] и низкочастотными (22–200 кГц) ультразвуковыми колебаниями [22, 26].

Распыление жидкости высокочастотными ультразвуковыми колебаниями осуществляется направлением из глубины жидкости на ее поверхность пучка мощных высокочастотных ультразвуковых волн. При этом на поверхности жидкости образуется так называемый ультразвуковой фонтан. В верхней части такого фонтана происходит распыление жидкости с образованием тонкого и стойкого тумана, как показано на рисунке 2.9.

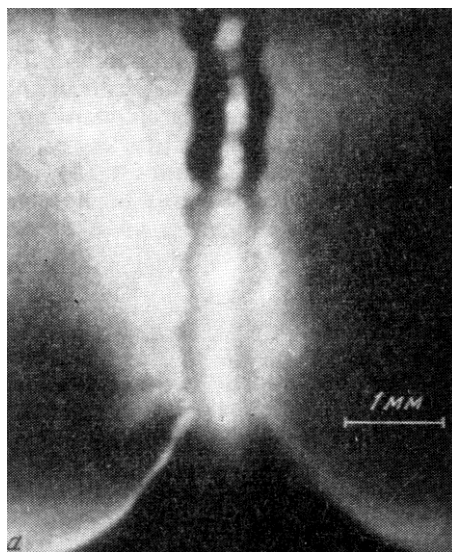
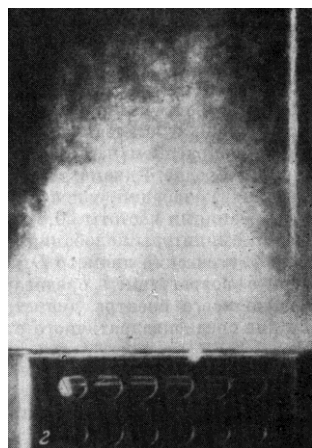


Рисунок 2.9 – Ультразвуковой фонтан

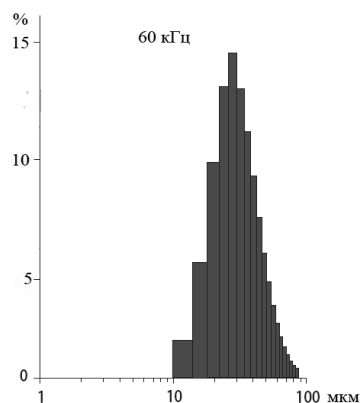
На сегодняшний день установлено, что при распылении в фонтане стоячие капиллярные волны возбуждаются на поверхности струи под действием кавитации в струе, т.к. причиной их возбуждения являются периодические гидравлические удары при захлопывании кавитационных пузырьков [34]. Распыление происходит в верхней части фонтана с образованием тонкого стойкого монодисперсного аэрозоля, размер капель которого составляет 2–4 мкм.

Для практической реализации ультразвукового способа распыления в фонтане используют фокусирующие излучатели с резонансной частотой 1–3 МГц в виде вогнутых фокусирующих пьезоэлектрических пластин. Распылительное устройство такого типа имеет небольшие размеры, энергетические затраты и невысокую производительность на более 0,2 л/час. Столь низкая производительность высокочастотного способа ультразвукового распыления и малый размер капель получающегося аэрозоля делают применение данного способа весьма специфичным и практически не применимым в химической промышленности. Однако данный метод является незаменимым для применения в медицинских ингаляторах [35] для создания высококачественных аэрозолей и при лабораторном спектральном анализе жидкостей [22].

При реализации ультразвукового распыления в слое стоячие капиллярные волны образуются на поверхности слоя жидкости, покрывающей колеблющуюся поверхность [22]. С увеличением амплитуды колебаний поверхности амплитуда волн увеличивается, достигая предельной величины, при которой происходит отделение от них капель жидкости (рисунок 2.10, а).



а)



б)

а – образование капель;
 б – гистограмма распределения диаметров капель
 Рисунок 2.10 – Распыление жидкости в слое

Распыление в слое осуществляется ультразвуковыми колебаниями с частотой от десятков до сотен кГц; возможный диаметр капель распыла лежит в диапазоне от единиц до сотен микрон и зависит от используемой частоты ультразвуковых колебаний, а производительность одного ультразвукового распылителя может достигать 800 мл/сек [24]. При этом отклонение диаметров капель от среднего значения и энергопотребление являются минимальными из всех рассмотренных способов распыления жидкостей [36] (рисунок 2.10, б).

Толщина слоя жидкости, покрывающего колеблющуюся поверхность, является конечной величиной и не может превышать значение (2.4), при котором распыление прекращается [22].

$$h = \frac{\lambda}{2}. \quad (2.4)$$

$$0 < h < \frac{\lambda}{2}. \quad (2.5)$$

Внутри интервала (2.5) существует более тонкая и пока еще не объяснимая зависимость производительности распыления от толщины слоя, например, при очень тонких слоях жидкости распыление прекращается.

Распыление воды акустическими колебаниями частоты 20 кГц ($\lambda = 75$ мм) и амплитуде поверхности преобразователя 30 мк происходит только в том случае, если $0,4 \text{ мм} < h < 3,2 \text{ мм}$, причем максимум интенсивности соответствует толщине $h \approx 0,8$ мм.

Таким образом, одним из основных параметров, влияющих на интенсивность процесса УЗ распыления является толщина слоя жидкости. Для каждой жидкости существует свой, отличный от других диапазон толщин слоя жидкости, при которых происходит распыление. Внутри этого диапазона существует вполне определенная толщина слоя жидкости, при котором интенсивность процесса распыления будет максимальна. В настоящий момент отсутствуют теоретические основы для определения этой «эффективной» толщины. Для каждой жидкости она определяется путем многократных экспериментов. При этом в зависимости от физических свойств жидкости, мощности ультразвукового излучения и ряда других факторов могут реализовываться различные механизмы каплеобразования, рассмотренные ниже.

2.6.2 Механизмы каплеобразования при распылении жидкости в слое

Наблюдения Антоневи́ча Е. В. [37], проведенные визуально и с помощью скоростной киносъемки, показывают, что механизмы образования капель жидкости при распылении жидкости в слое низкочастотными ультразвуковыми колебаниями бывают разные:

- 1) разрушение резонансных парогазовых пузырьков, пульсирующих вблизи поверхности жидкости;
- 2) воздействие ударных волн, образующихся в результате захлопывания кавитационных полостей у поверхности раздела жидкость–газ;
- 3) выплескивание жидкости над парогазовыми пузырьками, колеблющимися как целое у ее поверхности;
- 4) отрыв капелек жидкости от гребней стоячих капиллярных волн конечной амплитуды [38] на поверхности жидкости.

Антоневи́ч Е. В. пришел к выводу, что основная часть капель образуется четвертым способом, то есть в результате отделения капель от гребней капиллярных волн конечной амплитуды. Второй механизм приводит к

образованию крупных капель-брызг, диаметр которых на порядки больше диаметра капель, образующихся из капиллярных волн, и должен исключаться при ультразвуковом распылении.

В свою очередь, механизм образования капиллярных волн на поверхности жидкости также может быть различным. Так, согласно кавитационно-волновой гипотезе распыления вязких жидкостей, имеющих аномально высокое затухание звуковой волны жидкостей, выдвинутой Богуславским Ю. Я. и Экнадиосянцем О. К. [22, 28] и развитой Новицким Б. Г. [23], капиллярные волны на поверхности раздела фаз жидкость–воздух возбуждаются параметрически и при этом существует два механизма параметрического возбуждения капиллярных волн:

- возбуждение под действием пульсаций резонансных парогазовых пузырьков у поверхности жидкости;
- возбуждение под действием ударных волн, образующихся при захлопывании кавитационной полости (пузырька).

Оба приведенных механизма имеют в своей основе один и тот же физический эффект – образование в капельной жидкости полостей, заполненных газом, паром или их смесью (так называемых кавитационных пузырьков) – **кавитацию** [39]. Кавитационные пузырьки образуются в тех местах, где давление в жидкости становится ниже некоторого критического значения $P_{\text{ед}}$. В реальной жидкости $P_{\text{ед}}$ приблизительно равно давлению насыщенного пара этой жидкости.

При этом резонансный парогазовый [40] пузырек представляет собой предельный случай кавитационного пузырька, имеющего максимально возможные размеры, при котором последний в силу высокого газосодержания и большой присоединенной массы жидкости, обусловленной геометрическими размерами пузырька, пульсирует в ультразвуковом поле, мало изменяя свои размеры. Пульсации подобных пузырьков являются достаточно устойчивыми и слабо зависят от свойств жидкости и интенсивности ультразвукового воздействия. Поэтому ультразвуковое распыление вязких жидкостей на сегодняшний день осуществляется именно при помощи такого способа параметрического возбуждения капиллярных волн. Однако этот способ не позволяет получить однородный факел распыления с низкой дисперсией капель. Это связано в первую очередь с малым количеством возможных резонансных пузырьков [41], каждый из которых, пульсируя в ультразвуковом поле, ведет себя как отдельный источник ультразвуковых колебаний. При этом факел распыления принимает вид, показанный на рисунке 2.11, а.



а)

б)

а – при помощи резонансных пузырьков;

б – при помощи кавитационных пузырьков

Рисунок 2.11 – Фото распыления жидкости в слое

Второй способ параметрического возбуждения капиллярных волн свободен от этих недостатков. Это связано в первую очередь с тем, что количество кавитационных пузырьков в единичном объеме жидкости значительно превосходит количество резонансных [42]. Поэтому при возбуждении капиллярных волн при помощи кавитационных пузырьков можно считать, что возбуждение волн, а, следовательно, и распыление происходят равномерно по всей поверхности (рисунок 2.11, б).

Эффективность рассмотренного способа значительно выше, а энергоемкость меньше, чем у остальных способов распыления. Это связано с развитием кавитации, которую как нелинейный эффект можно представить в качестве трансформатора мощности, в котором энергия акустических колебаний, относительно медленно запаасающаяся в течение периода разрежения, освобождается за короткий отрезок времени при захлопывании пузырька с образованием ударной волны [39, 43–45]. Энергия ударной волны значительно превосходит энергию первичной ультразвуковой волны, поэтому за счет такого преобразования мощности ультразвуковых колебаний становится возможным осуществлять распыление при значительно меньших энергозатратах.

Несмотря на указанные достоинства кавитационного возбуждения капиллярных волн, на сегодняшний день не изучены режимы акустического воздействия, приводящие к возникновению кавитации и позволяющие поддерживать кавитацию в тонком слое жидкости. Это связано с различиями в свойствах распыляемых жидкостей, что приводит к различным порогам кавитации для каждой жидкости, различным амплитудам ультразвуку-

ковых колебаний, необходимых для обеспечения покрытия колеблющейся поверхности распылителя слоем кавитационных пузырьков, с неизученностью зависимости интенсивности кавитации от слоя жидкости.

2.6.3 Анализ факторов, влияющих на эффективность ультразвукового распыления

Из литературных источников [22, 23, 25, 28, 34] известно, что существует ряд факторов, влияющих на эффективность УЗ распыления жидкости. Эти факторы условно можно разделить на две группы: внешние и внутренние (рисунок 2.12).

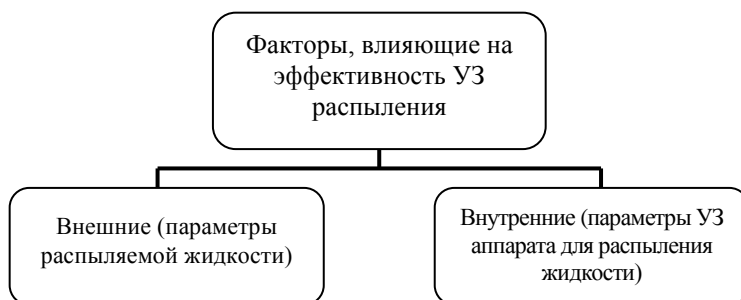


Рисунок 2.12 – Структура факторов, влияющих на эффективность ультразвукового распыления

К внешним относятся параметры, характеризующие распыляемую жидкость. К внутренним – параметры УЗ воздействия, геометрические параметры распылителя.

Внешние факторы. При УЗ распылении жидкости в слое, распыляемая жидкость характеризуется несколькими параметрами, оказывающими основное влияние на кинетику и интенсивность процесса (рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 – Внешние параметры

Этими параметрами являются:

- вязкость. Она определяет необходимую амплитуду колебаний излучающей поверхности, необходимую для достижения заданной производительности распыления;
- поверхностное натяжение жидкости. Оно определяет то количество акустической энергии, которое необходимо израсходовать на увеличение общей свободной поверхности распыляемой жидкости;
- толщина слоя озвучиваемой жидкости. Для каждой жидкости существует свой, отличный от других диапазон толщин слоя жидкости, при которых происходит распыление. Внутри этого диапазона существует вполне определенная толщина слоя жидкости, при которой интенсивность процесса распыления, при прочих равных условиях, будет максимальна. Этот параметр является наиболее важным с точки зрения достижения максимальной эффективности процесса распыления. При этом осуществлять его варьирование практически наиболее просто из всех перечисленных выше параметров.

Внутренние параметры. Для УЗ распыления наиболее важными являются следующие параметры ультразвукового воздействия (рисунок 2.13).

Частота УЗ колебаний определяет наиболее часто встречающийся диаметр капель. Поэтому выбор требуемой резонансной частоты является важным этапом в проектировании ультразвукового распылителя.

Амплитуда колебаний. Известно, что с ростом амплитуды колебаний линейно возрастает и интенсивность акустического распыления [22, 23]. Однако при превышении амплитудой УЗ колебаний некоторого порогового значения, происходит разбрызгивание жидкости, и дальнейшее увеличение амплитуды УЗ колебаний является

нецелесообразным. Следовательно, существует объективная необходимость в определении этого порогового значения для достижения максимальной эффективности распыления.

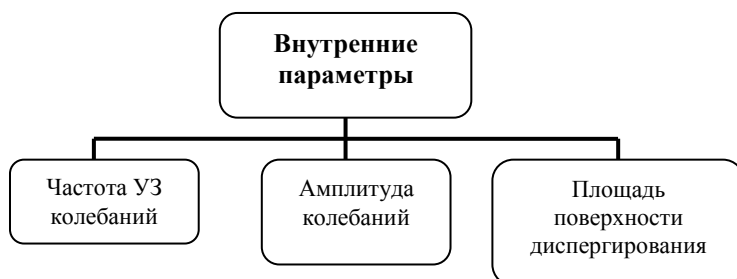


Рисунок 2.13 – Внутренние параметры

Установление степени взаимного влияния внешних и внутренних параметров позволит исключить неблагоприятные факторы, ограничивающие эффективность УЗ распыления. Кроме того, выделение среди указанных параметров, содержащих в себе информацию о ходе процесса распыления, позволит организовать автоматическое управление процессом распыления.

2.6.4 Структура ультразвукового оборудования для распыления жидкости

Существующее ультразвуковое оборудование для распыления жидкости различной мощности, производительности, степени сложности и назначения базируется на общих принципах работы и сходно по своей структуре [2].

На рисунке 2.14 представлена структурная схема УЗ технологического аппарата, который состоит из сетевого выпрямителя 1, транзисторного усилителя (инвертора) 2, задающего генератора ультразвуковой частоты и устройства управления 3, цепи согласования 4, электроакустического преобразователя 5, диспергирующего окончания 6.

Как правило, в современном оборудовании элементы 1–4 конструктивно объединены в функционально законченное устройство, называемое электронным генератором ультразвуковой частоты [50–51].

Принцип работы большинства существующих ультразвуковых аппаратов для распыления жидкости заключается в следующем: источник питания 1 преобразует переменное электрическое напряжение промышленной частоты в постоянное напряжение [46–49], необходимое для питания электрической схемы и выходных каскадов задающего генератора 2. Задающий генератор ультразвуковой частоты 2 обеспечивает преобразование постоянного напряжения в напряжение ультразвуковой частоты, необходимое для питания колебательной системы. Выходные каскады генератора могут работать как в режиме усиления (режим АВ) [50], так и в ключевом режиме [51]. Задачей устройства 4 является обеспечение согласования активного выходного сопротивления генератора с изменяющимся входным комплексным сопротивлением колебательной системы [52].

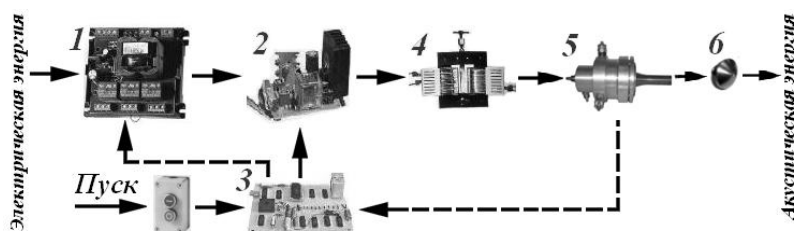


Рисунок 2.14 – Структурная схема ультразвукового аппарата для распыления жидкостей

Ультразвуковая колебательная система 5 обеспечивает преобразование энергии электрических колебаний в энергию механических колебаний и их ввод в обрабатываемые среды [53, 54]. Колебательная система включает в себя преобразователь электрических колебаний в ультразвуковые и волноводную систему (усилитель–концентратор), усиливающую ультразвуковые колебания. Колебательная система, являясь частью ультразвукового аппарата для диспергирования жидкостей, является электрической нагрузкой генератора и представляет собой настроенную электромеханическую резонансную систему, к главным характеристикам которой относятся резонансная частота и добротность. Параметры такой колебательной системы очень чувствительны к воздействию на неё различных воздействий. Поэтому

любое воздействие на колебательную систему меняет её основные характеристики и требует изменения параметров генератора [55, 56].

Рабочий инструмент 6 обеспечивает создание ультразвуковых колебаний, и с его поверхности осуществляется непосредственное распыление жидкости, находящейся в непосредственном контакте с ними. Инструмент может выполняться монолитно с колебательной системой или быть сменным. Сменность инструментов значительно расширяет функциональные возможности ультразвукового распылителя, позволяя формировать факелы распыления различной формы и плотности. Однако при использовании различных по форме и размерам инструментов возникает проблема обеспечения их эффективного и равнопроизводительного функционирования [57].

Блок управления 3 обеспечивает контроль работы генератора, режимы запуска и остановки процесса распыления, осуществляет подстройку частоты выходного напряжения генератора в соответствии с собственной резонансной частотой колебательной системы. При наличии регулируемого источника питания, блок управления осуществляет также регулировку его выходного напряжения, т.е. осуществляет стабилизацию амплитуды ультразвукового воздействия. Кроме этого, в ряде специализированных устройств фирмы Sono-Tek блок 3 осуществляет управление подачей жидкости (включение/выключение) по заранее заданной программе для реализации технологических процессов, связанных с необходимостью периодического распыления малых объемов жидкости, например при микрокапсуляции [58].

Таким образом, распыление различных жидкостей является важной задачей при реализации большого числа технологических процессов: начиная от нанесения различных покрытий и заканчивая спектральным анализом веществ. Кроме этого, выход передовых технологий промышленности на новый уровень развития – уровень наночастиц – предъявляет все более жесткие требования к способам и оборудованию для распыления жидкостей. В этой ситуации наиболее широко используемые на практике способы распыления (пневматическое, безвоздушное и др.), разработанные еще в конце XIX и начале XX веков, становятся неприменимыми, и, как показано в проведенном анализе, ультразвуковой способ распыления, бывший до недавнего времени лишь одним из «экспериментальных» способов распыления, выходит на лидирующие позиции, особенно в области «высоких» технологий.

В связи с этим все большее значение приобретает задача обеспечения максимальной эффективности процесса ультразвукового распыления с учетом требований, предъявляемых к параметрам формируемого распыла со стороны технологического процесса.