

УДК 532.66:541.182:537.3

КАПИЛЛЯРНО-ВИБРАЦИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Е. Ю. РОЗИНА

Одесская государственная академия холода

Получено 15.04.2002

Описан капиллярно-вибрационный метод распыления жидкости. Экспериментально исследованы различные режимы распыления, обсуждены физические процессы, лежащие в основе метода. Капиллярно-вибрационные режимы распыления, их параметры и стабильность классифицированы с точки зрения баланса притока – оттока жидкости на срезе рабочего капилляра.

Описаний капілярно-вібраційний метод розпилення рідини. Експериментально досліджені різні режими розпилення, обговорені фізичні процеси, які лежать в основі методу. Капілярно-вібраційні режими розпилення, їхні параметри й стабільність класифіковані з точки зору балансу притоку – відтоку рідини на зрізі робочого капіляра.

The capillary-vibrational method of liquid spraying is described. Various regimes of the atomization are investigated experimentally. Physical processes behind this method are discussed. Capillary-vibrational regimes of spraying, their parameters and stability are classified from the viewpoint of balance of the fluid's inflow – outflow on the exit of working capillary.

ВВЕДЕНИЕ

Аэрозольные технологии находят самое широкое применение в различных областях техники, в биологии и медицине. Достаточно упомянуть физиотерапевтические методы, использующие лекарственные средства в аэрозольной форме, или проблему создания комфортных условий жизнедеятельности человека, что предполагает очистку воздуха и стабилизацию его влажности. В электронной промышленности аэрозольные технологии применяются при изготовлении электронных плат для нанесения фоторезиста или создания защитного покрытия на готовых изделиях. Широкий диапазон приложений предполагает различие в требованиях к потоку аэрозольных частиц, что, в свою очередь, обуславливает большое разнообразие методов диспергирования жидкости в газах. В отдельных случаях нужно получить монодисперсный аэрозоль (для потребностей метрологии, при нанесении тонкопленочных покрытий), в других ситуациях необходимо создать стабильный поток частиц с регулируемыми параметрами. Широко распространенный классический метод распыления основан на так называемом, “рэлеевском распаде струи” [1, 2]. Для получения монодисперсных аэрозолей используют дисковые [1] и электрогидродинамические распылители [3, 4]. Несмотря на кажущееся разнообразие методов диспергирования, в их основе лежит создание гидродинамической неустойчивости на поверхности раздела жидкость – газ.

Еще один хорошо известный способ создания не-

устойчивости на границе раздела жидкость – газ, обеспечивающий распыление жидкости [5, 6] – это возбуждение в жидкости колебаний ультразвуковой частоты, причем интерес к ультразвуковым методам распыления в последнее время вновь возрастает [7, 8]. Одна из причин этого состоит в том, что при ультразвуковом воздействии имеются наиболее широкие возможности для управления параметрами потока диспергированных частиц (посредством изменения как частоты, так и амплитуды воздействия). Однако при этом существует проблема неустойчивости работы ультразвуковых распылителей. В классическом ультразвуковом методе колебания создаются в объеме жидкости, а распыление жидкости наблюдается в слое [1, 6, 7] и фонтане [5, 6, 8]. Основным условием стабильной работы ультразвуковых установок является постоянство акустической нагрузки на излучатель. В то же время, процесс распыления предполагает убыль массы жидкости над поверхностью излучателя. Таким образом, неустойчивость заложена в самой природе этого процесса. Другими словами, если не обеспечить скорость натекания жидкости, равную скорости ее распыления, то получить стационарный поток распыляемых частиц с неизменными параметрами весьма сложно. Распыление жидкости – это малорасходный процесс, следовательно, насос, используемый для подачи жидкости, должен быть также малорасходным и иметь постоянную и легко регулируемую скорость подкачки жидкости. Если учесть тот факт, что скорость натекания и скорость распыления должны коррелировать между

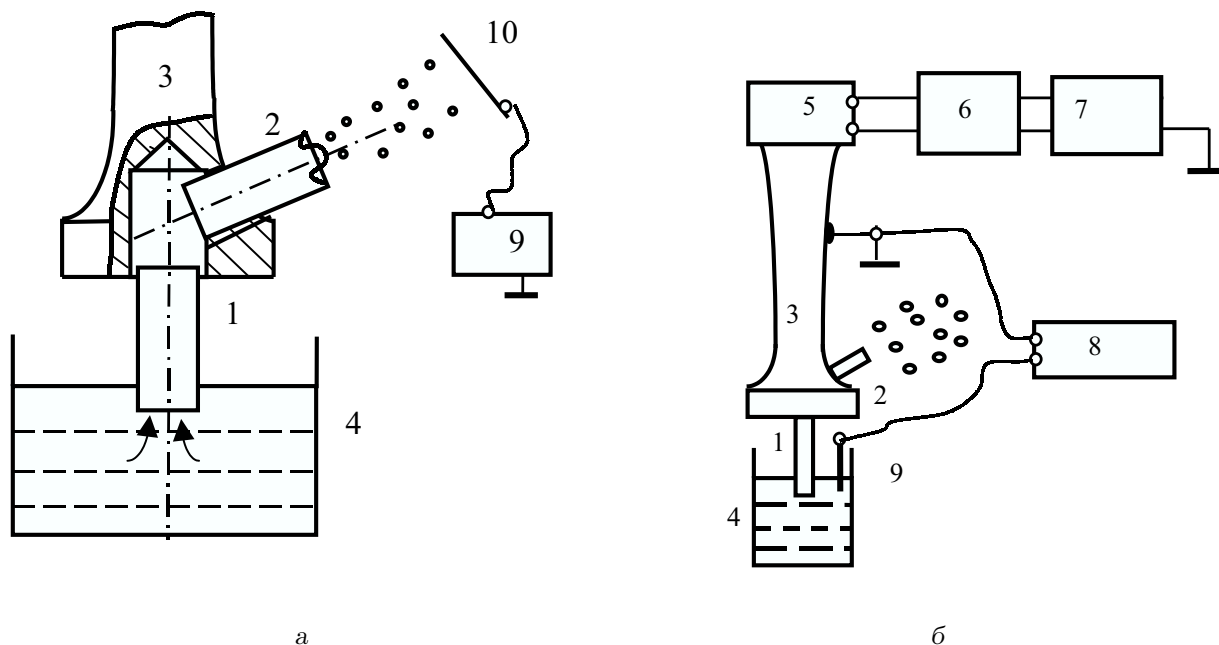


Рис. 1. Установка для распыления жидкости:
а – схема крепления капилляров в теле концентратора, б – схема установки

собой, то оптимальной является ситуация, когда скорость распыления и скорость подкачки регулируются одним и тем же элементом установки. Эта идея была реализована в эксперименте [9].

В данной работе описаны режимы капиллярно-вибрационного распыления жидкостей, а также эксперименты, направленные на выяснение механизма процесса распыления жидкости при таком методе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка, реализующая капиллярно-вибрационное распыление жидкости, схематически представлена на рис. 1. Основными ее элементами являются два капилляра 1 и 2, механически соединенные с ультразвуковым концентратором 3. Капилляр 1, ориентированный соосно с концентратором, погружен в распыляемую жидкость, заполняющую стакан 4. Колебания капилляра 1 обеспечиваются ультразвуковым преобразователем 5, сигнал на который подается через усилитель 6 от генератора 7. Используемые в экспериментах задающий генератор и усилитель допускали плавную подстройку частоты в диапазоне $18 \div 22$ кГц. Для капилляров 1 и 2 в теле концентратора высверлены два цилиндрических отверстия таким образом,

что закрепленные капилляры образуют сквозной канал, по которому при наличии перепада давлений может протекать жидкость. В нашем случае рабочие капилляры имели одинаковый диаметр 0.8 мм, а их длины менялись в диапазоне $12 \div 18$ мм. Глубина погружения капилляра 1 составляла $1 \div 7$ мм.

При возбуждении ультразвуковых колебаний концентратора закрепленный на нем капилляр 1 совершает колебательное движение вдоль своей оси. Жидкость поднимается по капилляру 1 выше уровня жидкости в сосуде 4 и заполняет полость, образованную в теле концентратора. В отсутствие капилляра 2 жидкость поднимается к внешней поверхности концентратора, покрывает ее тонкой пленкой, и начинается активный процесс распыления. При этом наблюдается как выброс крупных капель из отверстия, так и тонкопленочное распыление с образованием мелких капель с поверхности концентратора. Существуют два фактора, делающие этот способ распыления практически нерегулируемым: во-первых, случайным образом изменяется площадь распыляющей поверхности; во-вторых, участие двух механизмов распыления обуславливает большой разброс частиц по размерам. Таким образом, несмотря на высокую эффективность распыления (большой расход жидкости), этот режим оказывается нетехнологичным.

Заметим, что использование капилляра 2 позволяет:

- исключить неконтролируемое тонкопленочное распыление с поверхности концентратора;
- создать направленный поток распыляемой жидкости;
- организовать различные режимы распыления.

2. ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Было выявлено, что процесс распыления, как многие явления в ультразвуковом поле, имеет пороговый характер, т. е. наблюдается при амплитудах вибраций капилляров, превышающих некоторую минимальную величину $h^* = 1.6$ мкм (эта амплитуда достигается при напряжении на излучателе $U = 10 \div 12$ В). В эксперименте при изменении напряжения на излучателе (и, соответственно, амплитуды колебаний поверхности концентратора h) регистрировали основные параметры процесса распыления:

- наиболее вероятный размер капель;
- скорость их генерации;
- стабильность этого процесса.

2.1. Режимы распыления

Для определения размера капель использовался стандартный метод “затопления”. На стеклянную подложку наносили вазелиновое масло, предварительно насыщенное парами воды. Микрокапли жидкости, движущиеся после отрыва с некоторой скоростью, тормозятся в слое вязкого вазелинового масла и относительно продолжительное время (до нескольких минут) существуют в нем, не растворяясь. Размер формирующихся капель определялся непосредственно (под микроскопом) или по полученным фотографиям.

В зависимости от амплитуды колебаний h оказалось возможным выделить три режима распыления.

Первый режим охватывает узкий диапазон амплитуд $h \approx 1.6 \div 1.8$ мкм, незначительно превышающих пороговое значение h^* (соответствующие напряжения на излучателе – $12 \div 14$ В). От поверхности мениска отрываются практически одинаковые капли, средний размер которых порядка

40 мкм. В этом режиме скорость подкачки жидкости капилляром 1 очень мала (она меньше скорости распыления). Поэтому процесс распыления носит прерывистый характер: капли генерируются в течение времени порядка 10 с, затем процесс прерывается до тех пор, пока мениск вновь не поднимется к зоне распыления. Из-за малой скорости подъема жидкости по капиллярной системе для инициирования процесса необходимо предварительно создать разрежение в ней, чтобы жидкость заполнила оба капилляра и мениск оказался в зоне распыления (на срезе капилляра 2).

Второй режим наблюдается при $h \approx 1.8 \div 3.2$ мкм (напряжение на излучателе изменяется в диапазоне $14 \div 25$ В). Средний диаметр образующихся частиц составляет 80 мкм, но в поле зрения микроскопа присутствует малое количество капель кратного размера 120 мкм. Возможными причинами регистрации таких капель может быть как их реальный отрыв от мениска, так и несовершенство метода регистрации, поскольку не исключено случайное слияние двух капель на подложке при достаточно плотном потоке частиц. В этом режиме скорость притока жидкости за счет подкачки капилляром 1 равна скорости ухода жидкости за счет ее распыления, что обеспечивает непрерывность процесса распыления.

Третий режим характерен для амплитуд смещения излучателя свыше 3.2 мкм (диапазон напряжений $25 \div 45$ В). Из капилляра вырывается мощный поток распыленной жидкости, в которой присутствуют капли практически произвольного размера из диапазона $80 \div 340$ мкм, причем с увеличением амплитуды доля крупных частиц в потоке возрастает.

Таким образом, вибрационно-капиллярный метод позволяет реализовать два технологичных непрерывных режима распыления: малорасходный режим 2, в котором образуются капли близких размеров из диапазона 80 ± 10 мкм, и режим эффективного распыления 3, в котором создается направленный скоростной поток разнокалиберных капель.

2.2. Сравнительный анализ методов капиллярного распыления жидкости

Оптимизация вибрационно-капиллярного метода распыления невозможна без исследования физических процессов, лежащих в его основе. Но прежде, чем обсуждать эти вопросы, перечислим известные методы, в которых для распыления применяют капилляры, и отметим характерные отличия от описанного метода, использующего два

капилляра.

Метод электростатического диспергирования предполагает продавливание распыляемой жидкости через капилляр. При этом нестабильность, способствующая отрыву капли от капилляра, обусловлена действием сил электростатического отталкивания [3, 4]. Кроме того, неподвижный капилляр используется в генераторе капель с вибрирующей иглой. Жидкость вытеснена к срезу капилляра, и в нее погружен конец иглы. Колебания иглы на частоте порядка 1 кГц обеспечивают вырывание с поверхности жидкости одинаковых капель диаметром 150 мкм. Их размер, как и в предыдущем случае, соизмерим с диаметром капилляра, а направление движения потока капель задается направлением движения колеблющейся иглы [10].

Принципиальное отличие обоих методов от рассматриваемого в данной работе очевидно. В классическом методе, основанном на Рэлеевском распаде струи, жидкость продавливают через капилляр малого диаметра, на вытекающей струе возникает капиллярная нестабильность, что в конечном итоге приводит к разрыву струи на капли. Размеры капель соизмеримы с длиной капиллярной волны λ , сформированной на поверхности струи, а длина волны, в свою очередь, определяется диаметром струи D_j в соответствии с соотношением $\lambda = 4.58D_j$. Отсюда следует, что уменьшить диаметр капель можно, только уменьшая диаметр струи и, соответственно, диаметр капилляра. Очевидно, что для капилляров малого диаметра значительно возрастает давление, необходимое для продавливания жидкости и создания скоростной струи. Поэтому реально используются капилляры с внутренним диаметром не менее 0.1 мм, а капли, создаваемые упомянутым способом, оказываются достаточно крупными (их размер превышает диаметр капилляра) [2, 3].

Модифицированный метод разрушения струи, на первый взгляд, близок к описанному капиллярно-вибрационному методу распыления. В этом методе жидкость протекает по капилляру вследствие перепада статического давления на его концах. Нестабильность поверхности струи вытекающей жидкости стимулируется колебаниями капилляра, через который жидкость протекает [11, 12]. Оптимальная частота колебаний определяется отношением скорости вытекания струи к длине поверхностной волны, сформированной на струе, и при малых диаметрах капилляра попадает в ультразвуковой диапазон. Вибрации капилляра перпендикулярны оси капилляра, т.е. направлению движения потока

капель. В нашем случае распыляющий капилляр 2 при колебаниях также имеет составляющую скорости, перпендикулярную его оси (см. рис. 1). Характерно, что при поперечных колебаниях капилляра отрываются капли, имеющие диаметр 250 мкм, т.е. существенно превосходящие диаметр использованного капилляра, как и в классическом методе распада струи [12]. В нашем же случае размер капель, по крайней мере, на порядок меньше диаметра распыляющего капилляра.

Таким образом, в модифицированном методе [11, 12] капилляр используется для создания струи малого диаметра. Диаметр струи определяет размер капель, а высокочастотные вибрации конца капилляра способствуют созданию гидродинамической неустойчивости, обеспечивающей разрыв струи. В экспериментах по капиллярно-вибрационному распылению в режимах 1 и 2 вообще нет “струи”, с поверхности мениска отрываются отдельные капли, и их размер не определяется диаметром капилляра.

2.3. Размеры распыляемых частиц

Для выяснения механизма распыления жидкости процессы, протекающие у среза распыляющего капилляра 2, регистрировались видеокамерой. Характерные стоп-кадры, оттранслированные в компьютер, приведены на рис. 2.

В отсутствие вибраций мениск, предварительно подтянутый к срезу распыляющего капилляра, имеет обычную вогнутую форму и не рассеивает падающий на него свет. При увеличении амплитуды вибраций происходит вспучивание мениска в центральной части и образование стационарной волновой структуры в области, прилегающей к стенкам капилляра (см. рис. 2, а). Дальнейшее повышение амплитуды вибраций приводит к тому, что волновой процесс охватывает всю поверхность вспученного мениска. Об этом свидетельствует ее равномерная освещенность без затемнений и бликов (см. рис. 2, б). Такое состояние предшествует началу режима распыления. При достижении пороговой амплитуды h^* над вспученной частью мениска образуются микрокапли жидкости, но, так как концентрация частиц крайне мала и движение происходит с относительно высокими скоростями, они практически неразличимы (соответствующие кадры не приведены).

На рис. 2, в показана направленная струя распыляемой жидкости, характерная для режима распыления 3. Подчеркнем, что поток образовавшихся частиц вырывается из канала вибрирующего капилляра. При этом на внешней стенке ка-

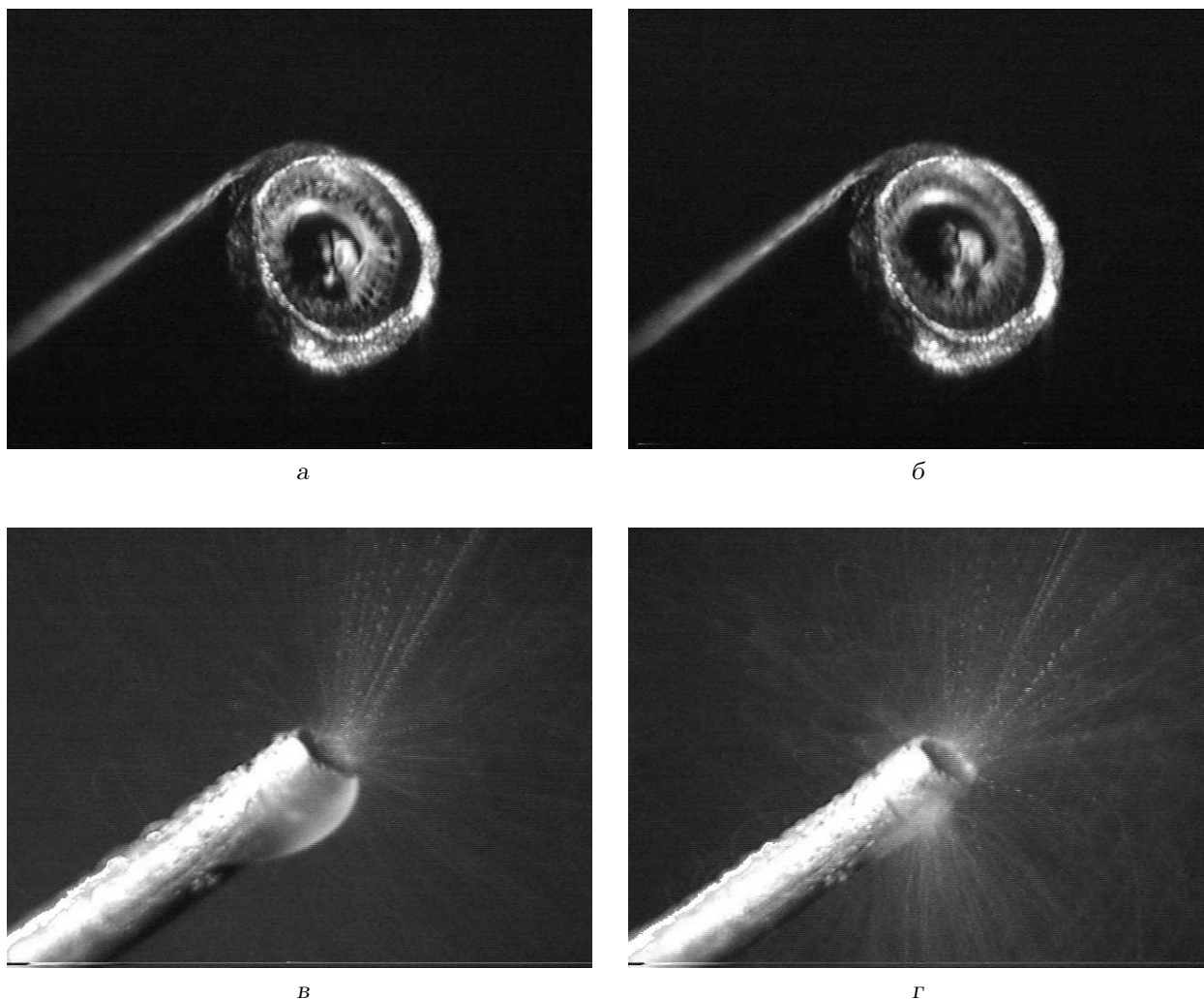


Рис. 2. Результаты видеосъемки процессов у среза распыляющего капилляра при различных напряжениях на излучателе:
а – 8 В, б – 9 В, в – 28 В, г – 40 В

пилляра зафиксирована крупная капля жидкости, которая существует в стационарном состоянии и не распыляется. Это означает, что амплитуда поперечных вибраций капилляра 2 недостаточна не только для распыления жидкости, не ограниченной его стенками, но и для отрыва крупной капли. При дальнейшем увеличении амплитуды смещения и, соответственно, амплитуды поперечных колебаний распыляющего капилляра начинается режим ненаправленного распыления как из канала капилляра, так и с его внешней поверхности (см. рис. 2, г). Включение добавочного источника распыления – внешней поверхности капилляра при больших амплитудах вибраций – является, по-видимому, основной причиной большого разброса капель по размерам в режиме 3. Очевидно, что

появление зафиксированной капли (рис. 2, в) на внешней поверхности капилляра и, следовательно, ее распыление при достаточных амплитудах колебаний обусловлены несбалансированностью потоков распыляемой и натекающей в зону распыления жидкости. Как отмечалось выше, в режиме 3 скорость натекания значительно превышает скорость распыления жидкости с поверхности мениска. Именно это, в конечном счете, и является причиной большого разброса капель жидкости по размерам, характерного для этого режима распыления.

Два фактора позволяют предположить, что в режимах 1 и 2 распыление жидкости с поверхности мениска происходит по капиллярно-волновому механизму: во-первых, на поверхности мениска

реально наблюдается волновая структура; во-вторых, в обоих режимах отрываются капли приблизительно одинакового диаметра (40 и 80 мкм соответственно). Согласно установившимся представлениям [6], для капиллярно-волнового механизма распыления характерно, что средний диаметр капель D должен коррелировать с длиной капиллярной волны λ_k : $D = \alpha \lambda_k$. Длина капиллярной волны связана с поверхностным натяжением жидкости σ , ее плотностью ρ и частотой ультразвуковых колебаний f соотношением

$$\lambda_k = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}}. \quad (1)$$

Подставляя в это выражение значения физических параметров воды и частоту ультразвуковых колебаний 20 кГц, получаем $\lambda_k = 10^{-4}$ м. По данным различных авторов, приведенным в обзоре [6], параметр α принимает значения $0.3 \div 0.4$, т. е. диаметр отрывающихся капель должен принимать значения $30 \div 40$ мкм, что и зафиксировано в режиме нестационарного распыления 1. Заметим, что такое совпадение характерно только для случая предельно малых амплитуд поверхностной волны. Увеличение амплитуды вибраций приводит к двукратному увеличению размеров капель по сравнению со значениями, рассчитанным из соотношения (1). Причины этого расхождения, возможно, связаны с тем, что формула (1) получена в предположении о безграничной плоской поверхности жидкости, в то время как в наших экспериментах форма распыляющей поверхности существенно иная: она ограничена стенками капилляра и не является плоской.

Сопоставление с экспериментальными результатами, полученными различными авторами, показывает, что размер наблюдаемых частиц хорошо ложится на частотную зависимость диаметра капель при распылении жидкости в слое, приведенную в обзоре [6]. Близкие размеры частиц (50 мкм) при тех же частотах, что и в наших экспериментах, приведены в работе [7]. Как видно, предложенный капиллярно-вибрационный способ распыления дает частицы тех же размеров, что и классический ультразвуковой метод распыления жидкости в слое. Таким образом, распыление жидкости с поверхности вспученного мениска на срезе капилляра 2 происходит, как и в классических ультразвуковых методах, по капиллярно-волновому механизму. Следует, однако, отметить, что стабильность условий распыления, которую невозможно обеспечить при распылении жидкости в слое, в наших экспериментах обеспечивается непрерывной подкачкой жидкости в зону распыления через

капилляр 1.

2.4. Механизм движения жидкости по капилляру

При классических ультразвуковых методах распыления (в слое и фонтане) ультразвуковая волна падает на поверхность раздела жидкость–газ из объема жидкости. Направление распространения падающей волны определяет направление движения капель жидкости, которые отрываются от поверхности. Кроме того, звуковой пучок, падающий на границу раздела, создает радиационное давление, которое обуславливает вспучивание этой поверхности, предшествующее фонтанированию жидкости. В наших экспериментах наблюдается как вспучивание мениска (см. рис. 2, а, б), так и направленное движение потока частиц с достаточно большими скоростями в режиме распыления 3 (см. рис. 2, г). Поэтому возникает вопрос: в чем причина наблюдаемых эффектов, если в объеме жидкости нет явного источника ультразвуковых колебаний?

Еще один интересный вопрос: каким образом жидкость подается в зону распыления (другими словами, в чем причина подъема жидкости по вибрирующему капилляру 1)? Заметим, что это описано в литературе. Для объяснения природы кавитационного подъема жидкости по капиллярам (кавитационный режим звукокапиллярного эффекта) авторами работы [13] проведена серия экспериментов, которые, по их мнению, моделируют явление кавитационного подъема. В одном из экспериментов капилляр погружали в жидкость и возбуждали его продольные колебания. При этом наблюдалось увеличение уровня жидкости в капилляре. Описанное явление рассматривали как следствие асимметрии гидродинамического сопротивления на входе в капилляр для втекающей и вытекающей жидкости.

Для условий нашего эксперимента избыточное давление ΔP , обусловленное осевыми колебаниями капилляра 1, было измерено непосредственно. Для этого распыляющий конец капилляра 2 соединяли с U-образным манометром эластичной трубкой. При этом распыление прекращалось и в трубке возникал поток сплошной жидкости. Уровень жидкости в манометре изменялся, и при некоторой разности уровней, определяемой избыточным давлением ΔP , поток жидкости в трубке останавливался. Результаты измерений ΔP таким компенсационным методом при различных напряжениях (и, соответственно, амплитудах смещения капилляра), соответствующих режиму 2, представлены

на рис. 3 кривой 1. Не анализируя интерпретацию эффекта вибрационного подъема, предложенную авторами работ [13, 14], обсудим возможность другого подхода, который позволяет дать ответ на оба поставленных вопроса.

Оптическая регистрация формы мениска на распыляющем конце капилляра 2 (рис. 2, а, б) показала, что при установлении вибраций концентратора с закрепленными капиллярами мениск у среза капилляра 2 представляет собой не традиционную вогнутую полусферу, а имеет достаточно сложную форму с характерной впусченностью на оси, вдали от стенок. Явление впусчивания плоской поверхности жидкости под действием ультразвука давно и хорошо известно [5, 6]. Его связывают с действием радиационного давления звукового пучка на границу раздела жидкость – газ. Форма поверхности жидкости в трубке, по которой распространяется акустическая волна, теоретически исследована в работе [15], причем предполагаемый профиль поверхности мениска в такой трубке близок к наблюдаемому в наших экспериментах. Поэтому возникло предположение, что деформация мениска обусловлена радиационным давлением волны, распространяющейся по сквозному каналу, образованному капиллярами 1, 2. Источником этой волны могут быть конец вибрирующего капилляра 1 или пузырьки, которые при вибрациях накапливаются в канале и пульсируют там на своих резонансных частотах.

В нашем исследовании использовались металлические (непрозрачные) капилляры, поэтому второе предположение обсуждать не будем: оно требует экспериментального обоснования. Для проверки первого предположения пьезоцип погружали в стакан 4 с распыляемой жидкостью. Он действительно регистрировал звуковые колебания достаточно высокой амплитуды (например, на расстоянии 0,7 см от среза капилляра 1 она достигала 10^4 Па), линейно зависящей от амплитуды смещения капилляра. Таким образом, при колебаниях капилляра 1 в жидкости, заполняющей сосуд 4, возбуждается ультразвуковая волна на частоте, задаваемой преобразователем. Согласно сделанному предположению, источником этой волны является нижний срез капилляра, и волна, излучаемая во всех направлениях, распространяется также и по волноводу, образованному двумя связанными капиллярами 1 и 2. По капиллярным волноводам звуковая волна распространяется с определенным затуханием [16], но при достаточной амплитуде давления P_{mo} у среза нижнего капилляра ее падение на мениск может обусловить как его впусченность, так и направленное движение

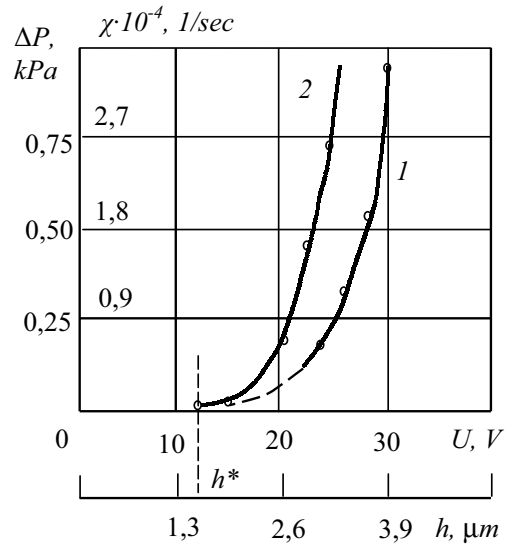


Рис. 3. Влияние амплитуды h на ΔP (кривая 1) и χ (кривая 2)

отрывающихся микрокапель жидкости. Создавая постоянное давление на мениск, сгенерированная звуковая волна может обусловить его смещение в капиллярной системе в направлении от источника колебаний, что, следуя традициям молекулярной физики, интерпретируют как подъем жидкости в капилляре.

2.5. Определение частоты отрыва капель

Одним из определяющих параметров при распылении жидкости является частота отрыва капель $\chi = \Delta N / \Delta t$, где ΔN – количество капель, отрывающихся за время Δt . Для определения этого параметра во многих случаях используются сложные электронно-оптические счетчики частиц. В данном случае была использована относительно простая методика, основанная на явлении зарядения капель жидкости при их отрыве.

Известно, что при распылении воды образуются заряженные капли, электрический заряд которых определяется их размером [17]. Детальные исследования процесса образования капель в генераторе с вибрирующей иглой показали, что они имеют одинаковый размер 150 мкм и несут одинаковый отрицательный заряд [10, 18]. В предположении, что в условиях нашего эксперимента также могут отрываться заряженные капли, микровольтметром 8 (см. рис. 1, б) была измерена разность потенциалов между заземленным корпусом концентратора 3 и электродом 9, погруженным в

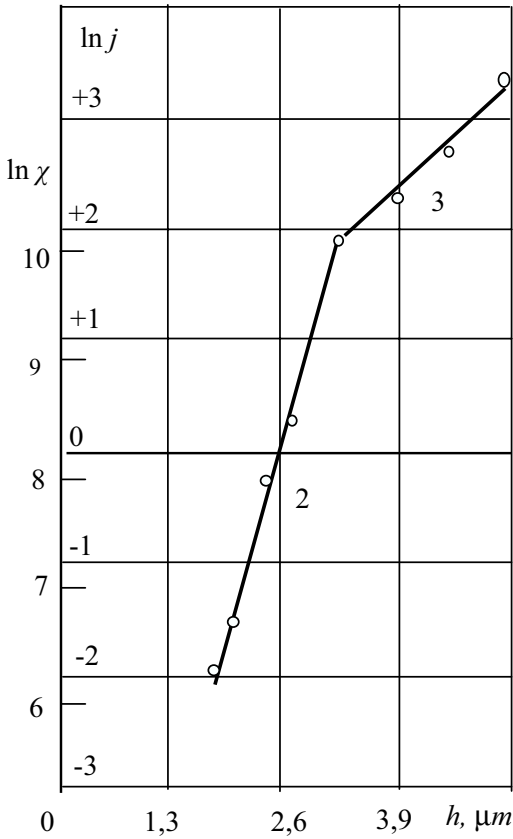


Рис. 4. Влияние амплитуды колебаний h на $\ln j$ (правая шкала) и $\ln \chi$ (левая шкала)

распыляемую дистиллированную воду. Установлено, что без ультразвука и при амплитудах колебаний, недостаточных для инициирования процесса распыления, устанавливается начальная разность потенциалов ~ 2.5 мВ, а в процессе распыления она может достигать значений $25 \div 30$ мВ (т. е. на порядок превышать начальное значение). Потенциал погруженного электрода 9 всегда повышается, что обусловлено уносом избыточного отрицательного заряда отрывающимися каплями. Это подтверждается и тем, что пластинка из медной фольги 10 площадью 1.8 см^2 , подсоединенная к положительной клемме источника напряжения 11 , изменяет траекторию всех частиц и захватывает их, если ее потенциал превышает $+1.0$ кВ.

Указанный эффект был использован для определения массового расхода жидкости $j = \Delta m / \Delta t$ при распылении. На торсионных весах с точностью до 0.5 мг определяли массу напыленной жидкости Δm за достаточно продолжительное (до десятков секунд) время Δt и по этим значениям рас-

считывали величину j . При увеличении напряжения на излучателе от 10 до 40 В массовый расход изменяется от 0.15 до 26 мг/с, т. е. более чем на два порядка. Поэтому для удобства результаты измерений приведены в полулогарифмическом масштабе (рис. 4). Линейность зависимости $\ln j(U)$ свидетельствует о том, что увеличение амплитуды вибраций приводит к экспоненциальному возрастанию расхода распыляемой жидкости. Обратим внимание, что на графике не представлены значения, определяющие режим распыления 1 . Как указывалось выше, изначально это режим прерывистого, импульсного распыления. Электростатическое же воздействие существенно изменяет характер процесса, заметно интенсифицирует его и делает непрерывным. По этой причине результаты, полученные описанным способом для режима 1 , обсуждать нецелесообразно.

В режиме распыления 2 , когда скорость подкачки жидкости соизмерима со скоростью распыления, от мениска отрываются капли практически одинаковых размеров и все они улавливаются электростатическим полем. Масса напыленной на подложку жидкости Δm пропорциональна количеству капель ΔN . При этом выполняется очевидное соотношение

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{m_o \Delta N}{\Delta t}, \tag{2}$$

где $m_o = 4/3\pi a^3 \rho$ – масса одной капли радиуса a . Таким образом, для режима 2 величина массового расхода однозначно определяет скорость генерации капель жидкости $\chi = \Delta N / \Delta t$, и участок кривой на рис. 4, соответствующий режиму 2 , характеризует одновременно и массовый расход и скорость генерации капель. При выборе соответствующих масштабов вертикальной оси на рис. 4 обе зависимости – $\ln j(h)$ и $\ln \chi(h)$ – представлены участком 2 приведенной кривой.

Зависимость $\chi(U)$ для режима 2 представлена кривой 2 на рис. 3. Она имеет такой же характер, что и кривая 1 .

Как уже отмечалось, режим 3 отличается очень высокой интенсивностью распыления: из распыляющего капилляра, как из сопла, вырывается направленный поток частиц с большими скоростями. Одновременно происходит всестороннее распыление с внешней поверхности капилляра. Поэтому значительная часть образовавшихся капель не захватывается электростатически заряженной подложкой. Кроме того, капли существенно различаются по размерам, и погрешность в определении скорости их генерации из соотношения (2) становится недопустимо большой.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вывод о том, что распыление жидкости в вибрационно-капиллярном методе происходит по капиллярно-волновому механизму, так же как в традиционных ультразвуковых методах, важен, поскольку, с одной стороны, он позволяет обозначить направления оптимизации рассматриваемого метода. Например, для ультразвуковых методов хорошо известно [6], что средний размер частиц в существенной степени зависит от частоты колебаний. В частности, использование частот мегагерцового диапазона позволяет получать частицы со средним размером порядка нескольких микрон и минимальным разбросом, удовлетворяющим критерию монодисперсного аэрозоля. Следует ожидать, что повышение частоты позволит получить стабильный поток монодисперсных частиц, что является весьма актуальной задачей физики аэродисперсных систем.

С другой стороны, появляется возможность более детального изучения закономерностей процесса распыления. В работе [6, с. 382] при обсуждении распыления жидкости в фонтане и слое отмечено следующее: “Вряд ли возможно оценить размер активной зоны и длительность ее существования, а следовательно, рассчитать скорость и производительность распыления жидкости”. Неявно эта проблема присутствует практически в любом исследовании, где делаются попытки количественной оценки экспериментальных результатов [7]. При капиллярно-вибрационном распылении активной (т.е. распыляющей) зоной является поверхность мениска, стабилизированного на срезе вибрирующего капилляра. Таким образом, распыляющая поверхность, по крайней мере в режиме 2, является строго определенной и ограниченной, что позволяет проанализировать некоторые допущения, принимаемые при обсуждении закономерностей процесса.

При оценках параметров процесса распыления (интенсивности и размеров капель) с позиций капиллярно-волновой гипотезы предполагается, что отрыв капель от гребней поверхностной волны происходит в течение каждого периода звуковых колебаний [6, с. 381]; [7]. В результате наших экспериментов появилась возможность оценить некоторые параметры, характеризующие частоту отрыва капель от поверхности мениска (они приведены в таблице). Величина χ определена как количество капель, оторвавшихся от поверхности за единицу времени со всей поверхности мениска. Поэтому произведение $N_T = T\chi$ характеризует количество капель, оторвавшихся от его по-

Таблица. Параметры, характеризующие частоту отрыва капель от поверхности мениска

U , В	χ , c^{-1}	$N_T = T\chi$	$\kappa = 1/N_T$, периоды
13	$0.560 \cdot 10^3$	0.025	40.00
15	$0.746 \cdot 10^3$	0.037	26.00
18	$2.790 \cdot 10^3$	0.140	7.10
20	$5.410 \cdot 10^3$	0.275	3.60
25	$2.610 \cdot 10^4$	1.300	0.77

верхности за один период. Обратная ему величина $\kappa = 1/N_T$ определяет среднее количество периодов, необходимое для отрыва хотя бы одной капли с поверхности мениска. Как видно из таблицы, для мениска площадью 0.43 мм^2 (диаметр капилляра 0.8 мм) при малых амплитудах колебаний параметр κ достигает 40 периодов и закономерно уменьшается при возрастании амплитуды колебаний. Если учесть, что на поверхности мениска укладывается до $S/\lambda^2 \sim 100$ длин волн, то становится очевидным, что часто используемое допущение о том, что каждая длина волны генерирует одну каплю [8, 9], является достаточно произвольным.

Линейность зависимости $\ln \chi(U)$, представленной на рис. 4, позволяет аппроксимировать влияние амплитуды колебаний на скорость генерации капель $\chi(h)$ функцией вида

$$\chi = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \chi_o \exp[\alpha(h - h^*)]. \quad (3)$$

Величина h^* определяет пороговую амплитуду колебаний вибратора, при которой начинается процесс распыления. Не анализируя физического смысла параметров χ_o и α , приведем их значения, определенные по графику $\ln \chi(U)$ на рис. 4: $\chi_o = 550 \text{ с}^{-1}$, $\alpha = 2.25 \text{ мкм}^{-1}$.

Обратим внимание на то, что параметр $N_T = T\chi$ есть не что иное, как вероятность отрыва капли в течение одного периода со всей поверхности мениска. Действительно, вероятность того, что в течение данного периода оторвется одна капля, естественно представить как отношение T/τ , где τ – интервал между отрывом двух последовательных капель или, иначе, – время, необходимое для образования одной капли. Очевидно, что

$$\tau = \frac{\Delta t}{N} = \frac{1}{\chi}. \quad (4)$$

Тогда вероятность T/τ определится как $T\chi = N_T$. Как видно из таблицы, эта величина намного меньше единицы. Учитывая соотношение между

диаметром капилляра и длиной капиллярной волны, можно утверждать, что вероятность генерации одной капли каждой волной в данный период оказывается еще на два порядка меньше. Характерно, что как только вероятность отрыва капли с поверхности мениска в течение одного периода достигла единицы, произошел переход в режим распыления 3, в котором отрываются крупные капли кратных размеров.

Из проведенных экспериментов также следует, что при возрастании амплитуды h увеличение размера капель не происходит постепенно, параллельно изменению амплитуды. Наиболее вероятный размер капель увеличивается скачком одновременно со сменой режима распыления. Таким образом, в рамках режима 2 не происходит увеличения размера капель. Увеличение же массового расхода распыляемой жидкости обусловлено исключительно экспоненциальным увеличением вероятности отрыва капель.

Возвращаясь к рис. 4, заметим, что переход из режима 2 в режим 3 характеризуется изломом на зависимости $\ln j(U)$. Поскольку при этом переходе резко возрастают размеры капель (до 340 мкм), то уменьшение наклона кривой свидетельствует об уменьшении вероятности их отрыва.

ВЫВОДЫ

1. В капиллярно-вибрационном распылении жидкости оба капилляра выполняют различные функции. Капилляр 2 фиксирует мениск, на поверхности которого сформирован стационарный волновой процесс, и задает направление потока образовавшихся капель; стенки этого капилляра строго ограничивают площадь зоны распыления. Основная функция капилляра 1 заключается в создании непрерывного притока жидкости в зону распыления с целью обеспечения стационарности условий распыления и соответственно постоянства параметров потока капель. Возможно, что его вибрации являются источником волны, которая, распространяясь в капиллярном канале, обеспечивает вспучивание мениска и его разрыв с образованием микрокапель при достаточных амплитудах вибраций.
2. Процесс отрыва капель при распылении жидкости носит вероятностный характер. При увеличении амплитуды смещения капилляров (в рамках каждого режима распыления) увеличивается вероятность отрыва капель, а не их средний размер.
3. Отрыв капель от поверхности мениска происходит по капиллярно-волновому механизму, как в классических ультразвуковых методах, поэтому управлять процессом распыления можно, изменяя амплитуду и частоту вибраций. Кроме того, метод капиллярно-вибрационного распыления жидкостей, в отличие от классических ультразвуковых методов, позволяет осуществлять электростатическое управление процессом при малых амплитудах вибраций.

1. Hidy G. M., Brock J. R. The dynamics of aerocolloidal systems.– Oxford: Pergamon Press, 1970.– 379 p.
2. Spangler C. A., Hibing J. H., Heister S. D. Nonlinear modelling of jet atomization in the wind-induced regime // Phys.Fluids A.– 1995.– 7, N 5.– P. 964–971.
3. Michelson D. Electrostatic atomization.– New York: Hilger, 1990.– 150 p.
4. Ширяева С. О., Григорьев А. И., Подвальный Л. С. О классификации режимов электростатического диспергирования жидкостей // Письма в ЖТФ.– 1993.– 19, N 4.– С. 36–41.
5. Бергман Л. Ультразвук.– М.: ИИЛ, 1957.– 725 с.
6. Экнадиосянц О. К. Получение аэрозолей // Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л. Д. Розенберга.– М.: Наука, 1970.– С. 337–394.
7. Rajan R., Pandit A. B. Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation // Ultrasonics.– 2001.– 39, N 4.– P. 235–255.
8. Charuau J., Tierce P., Birocheau M. The ultrasonic generation of droplets for the production of submicron size particles // J. Aerosol Sci.– 1994.– 25, Suppl. 1.– P. 232–234.
9. Розіна О. Ю. Пристрій для розпилення рідини // Патент на винахід України, по кл. B01J 19/10. Опубл. 16.04.2001. Бюл. N 3.
10. Лопатенко С. В., Контуш С. М. Разделение заряда при частичном слиянии капель // Метеорология и гидрология.– 1981.– N 11.– С. 54–57.
11. Явельский М. Б. Устройство для получения монодисперсного потока капель жидкости // Авт. свид. СССР N 348239, по кл. B05B 17.06.– Опубл. 23.08.1972.– Бюл. N 25.
12. Blaisot J., Leadoux M., Ducret D., Vendel J. A new monosized drop generator // J. Aerosol Sci.– 1994.– 25, N 1.– P. 231–232.
13. Кардашев Г. А., Соболев В. Д., Чураев Н. В., Шаталов А. Л. Влияние колебаний на уровень жидкости в капилляре // Коллоид. ж.– 1976.– 38, N 3.– С. 461–466.
14. Яценко А. В. Влияние акустических колебаний на проникновение жидкости в капиллярные каналы // Коллоид. ж.– 1986.– 48, N 2.– С. 390–393.

15. Луковский И. А., Тимоха А. Н. Об акустическом воздействии на свободную поверхность ограниченного объема жидкости // Акуст. ж.– 1991.– **37**, N 1.– С. 144–149.
16. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука.– М.: Изд-во Москов. ун-та, 1960.– 334 с.
17. Леб Л. Статическая электризация.– М.-Л.: Гос. энерг. издат, 1963.– 407 с.
18. Листовничий А. В., Контуш С. М., Красницкий В. И. Баллоэлектрические эффекты и квазиравновесный двойной слой // Коллоид. ж.– 1990.– **52**, N 2.– С. 374–377.