
ПРИЛАДИ І МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ

УДК 632.6

Контуш С.М., Ахмеров А.Ю., Мандель В.Е., Чурашов В.П.

Одесский национальный университет имени И.И.Мечникова

E-mail: skontush@odessaglobe.com

Пневматический генератор струи монодисперсных капель

Анализируется взаимное согласования времени роста и разрушения пузырька воздуха и периода колебаний круговых капиллярных волн на поверхности тонкого слоя жидкости. Найдены две оптимальные конструкции генератора струи монодисперсных капель с разрушением пузырьков в тонком слое жидкости и показаны варианты его функционирования

Получение монодисперсных капель разных жидкостей является важным процессом для современных технологий [1-6]. Известно, что при использовании в технике наиболее распространенных пневматического и механического методов распыления жидкостей образуется, как правило, поток полидисперсных капель, что нежелательно для многих научных и технологических приложений [1]. Лишь в одном из известных механических устройств монодисперсные капли образуются при стекании пленки жидкости с края вращающегося диска [2]. Ультразвуковой и электростатический способы распыления жидкостей также не дают капли строго одинакового размера [3,4].

В основе образования струй монодисперсных капель лежит явление капиллярности жидкостей, согласованное с влиянием некоторых внешних сил. Возникновение капиллярных волн на поверхности жидкостей хорошо известно. Так, их развитие на тонких струях жидкостей приводит к распаду струй на капли и к управляемому процессу образования монодисперсных капель [1]. Такой подход известен со времени исследований Дж. Рэлея, проведенных им в конце 19 века.

Большое распространение монодисперсное генерирование капель получило при маркировании изделий с помощью каплеструйных принтеров [2], в которых тонкая струя капель красящей жидкости, управляемая электрическим полем и компьютером, формирует любые символы на движущихся поверхностях. Широко распространенные струйные принтеры также используют потоки монодисперсных капель, образующихся одновременно из нескольких сопел очень малого диаметра под действием колебаний в жидкости. На плоских поверхностях жидкости капиллярные волны от разных источников взаимодействуют друг с другом с образованием интерференционных картин, подобных оптическим. Подобно этому, взаимодействуют друг с другом капиллярные волны, отраженные от препятствий и при правильной организации взаимодействия по-

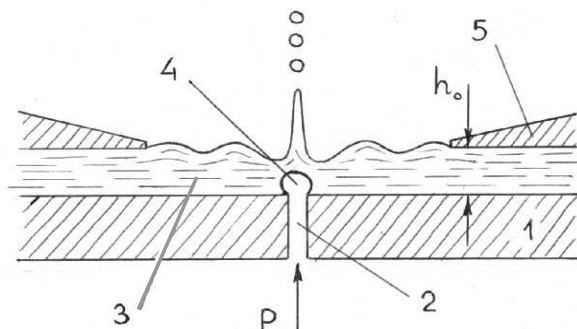


Рис. 1. Схема работы генератора струи монодисперсных капель
 1 – плоская пластина, 2 – сопло, 3 – пленка жидкости,
 4 – пузырек воздуха, 5 – кольцо

тока газа (воздуха) с распыляемой жидкостью становится возможным монодисперсное пневматическое распыление.

Рассмотрим случай образования капель при пропускании газа через тонкий слой жидкости, окруженной кольцевой стенкой или кольцом (рис. 1). Слой жидкости находится на хорошо смачиваемой подложке, а газ подается через малое сопло в центре системы с таким расходом, чтобы в жидкости возникали пузырьки газа, следующие один за другим после разрушения предыдущего.

На рис. 1 показано, что при разрушении пузырька возникают два явления – кумулятивный всплеск от разрушающегося пузырька (его “схлопывание”) и радиальные поверхностные (капиллярные) волны, идущие от центра системы к окружающей слой жидкости круговой стенке.

В работе [3] показано, что в следующей фазе процесса от пика всплеска отделяется капля, а возникающая на поверхности жидкости круговая капиллярная волна отражается от стенки и возвращается центру системы, к отверстию, через которое подается в жидкость воздух. К этому моменту над отверстием должен “вырасти” новый пузырек воздуха. Под воздействием сходящейся к центру волны его верхняя часть (“купол”) разрушается, и выброс нового всплеска и возникновение круговой волны повторяются.

Основным условием многократного повторения описанного процесса является точное совпадение фаз роста пузырька до критического размера, равного толщине слоя жидкости, и возвращения к центру круговой волны. Основную роль в описанном явлении образования отдельных капель играют капиллярные эффекты, поэтому все элементы системы должны быть достаточно малых размеров, чтобы гравитационные и аэродинамические эффекты не влияли на образование капель.

Повторяющиеся акты возникновения и разрушения пузырьков представляют собою периодическое воздействие, которое возбуждает колебания резо-

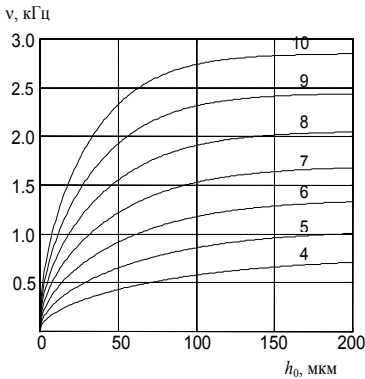


Рис. 2. Зависимость собственных частот от толщины пленки; цифры возле кривых означают номера мод, к которым они относятся

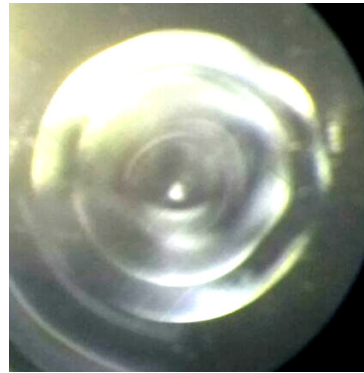


Рис. 3. Фотография стоячих волн на поверхности водяной пленки внутри ограничивающего кольца

натора, состоящего из пленки жидкости, окруженной кольцом. В общем случае может возникать большое число мод, что приводит к очевидной нерегулярности колебаний, однако, если временные характеристики роста и распада пузырьков должным образом согласованы с периодом какой-либо моды, то только одна эта мода и возбуждается.

С другой стороны, периодическое движение капиллярных волн на поверхности пленки обеспечивает своеобразную самоподдержку и самоподстройку моды, создавая в определенные моменты времени условия, которые принуждают пузырьки схлопываться согласованно с капиллярными колебаниями (например, путем вариаций толщины пленки или давления в отверстии). Иными словами, в такой системе реализуется режим **автоколебаний**, при котором все параметры движения периодически воспроизводятся с большой точностью; в итоге образующиеся капли приобретают строго одинаковые размеры и скорости.

Основное условие достижения такого режима состоит во взаимном согласовании времени роста пузырька и периода колебаний круговых капиллярных волн на поверхности жидкости. В данной системе может возбуждаться только дискретный набор собственных колебательных мод с четко определенными частотами колебаний [7], которые определяются по вытекающей из теории капиллярных волн формуле:

$$v_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{s_n}{R}\right)^3 \frac{T}{\rho} \tanh\left(\frac{s_n h_0}{R}\right)}, \quad (1)$$

где R – радиус кольца, T – поверхностное натяжение пленки, h_0 – ее номинальная толщина, ρ – плотность жидкости, а s_n есть n -й корень функции Бесселя

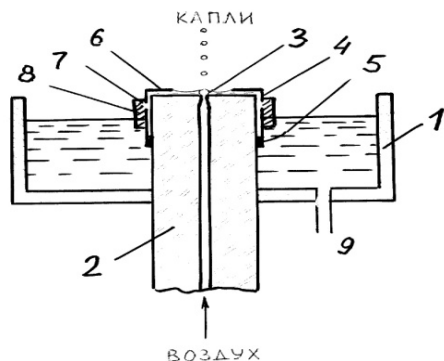


Рис. 4а. Схема генератора капель с выбросом капель вверх

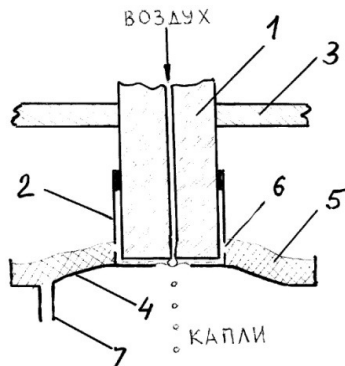


Рис. 4б. Схема генератора капель с выбросом капель вниз

селя $J_1(x)$. Эти частоты существенно зависят от конструктивных параметров прибора; в частности, зависимость от толщины пленки, что иллюстрируется рис. 2.

Типичная картина колебаний пленки видна на микрофотографии (рис.3)

Создание реальной конструкции генератора монодисперсных капель (ГМК) данного типа связано с преодолением некоторых технических проблем, связанных с наличием нескольких параметров, очень малые изменения которых значительно влияют на его устойчивую работу. В первую очередь, конструкция ГМК требует изготовления сопла малого диаметра в хорошо смачиваемой плоской поверхности торца капиллярной трубки. Кроме этого, необходимо обеспечить устойчивость и заданную толщину слоя жидкости над соплом, а также поддержание постоянства малого давления подачи воздуха. В связи с этим были испытаны несколько разных конструкций ГМК, и найдены два его оптимальных варианта со следующими параметрами:

- оптимальный диаметр сопла лежит в пределах 20 – 30 мкм;
- диаметр кольца резонатора должен быть равен 2 мм;
- зазор между плоскостью с соплом и кольцом резонатора должен быть равен 0,2 – 0,3 мм;
- для лучшего смачивания поверхность торца капиллярной трубки с соплом делается слегка шероховатой (матрируется) абразивным методом.

Расположение сопла для подачи воздуха в центре подверженной гравитации жидкой пленки не дает, по-видимому, возможности конструировать такой ГМК с выбросом капель в каком-либо боковом направлении. Но с учетом того факта, что работа генератора основана на явлении капиллярности, возможна конструкция ГМК с выбросом капель строго вниз. На этом основании были сконструированы два ГМК: в одном капли выбрасывались строго вверх, в другом - строго вниз (рис.4, а,б).

Основной частью обоих генераторов является толстостенный стеклянный капилляр 2, установленный в центре небольшого сосуда 1. В верхней части капилляра внутренний канал сужается, образуя сопло диаметром около 20-30 мкм. Торец капилляра имеет матовую поверхность. Важной частью генератора является насадка 4 на конец капилляра с соплом. Она состоит (рис.4а) из металлической муфты 5, плотно одеваемой на капилляр, верхняя часть которой (длиной около 6-7 мм) имеет внутренний диаметр примерно на 0,5 мм больший, чем наружный диаметр капилляра. Эта часть заканчивается пластиной 6 с отверстием, диаметр которого равен 2 мм. Она играет роль кольца для отражения круговых волн. Вблизи пластины 6 металлическая муфта 5 имеет прорези 7 для подачи жидкости в зазор между пластиной 6 и торцом капилляра 2. Прорези окружены кольцом 8 из подходящего гигроскопического материала. Муфта насаживается на капилляр таким образом, чтобы торец капилляра с соплом не доходил до пластины на 0,2 – 0,3 мм.

С использованием этих двух основных частей (толстостенный капилляр и насадка) генератор может быть собран для двух основных случаев – генерации струи капель, движущихся вверх, и, наоборот, для струи капель, движущихся вниз. В первом случае (рис.4а) капилляр 2 вместе с насадкой 4 устанавливается в корпусе 1 так, чтобы пластина 6 была сверху. Снизу этого сосуда имеется патрубок 9 для подвода к генератору жидкости.

Во втором случае (рис.4б) капилляр 1 вместе с насадкой 2 устанавливается с помощью держателя 3 так, чтобы торец капилляра был направлен вниз. Для подачи жидкости для распыления используется скрепленный с насадкой 2 небольшой плоский сосуд 4 с гигроскопическим материалом 5, который имеет в дне отверстие, край которого играет роль кольца для отражения капиллярных волн. Сосуд 4 имеет вид прямоугольника размером 15х30 мм с бортом вокруг высотой 0,5 мм, на которой уложен гигроскопический материал. Край отверстия в гигроскопическом материале плотно прилегает к прорезям 6 на насадке. Снизу к пластине укреплен патрубок 7 для подачи жидкости.

Для изучения работы ГМК генератор 1-го типа был установлен на жестком основании, на котором также были укреплены для проведения измерений осветитель, малооборотный двигатель со штангой с предметным стеклом для улавливания капель и бинокулярный микроскоп для фотографирования капиллярных волн на поверхности жидкости и капель на предметном стекле. Кроме того, над генератором был установлен лазерный измеритель размеров капель, работа которого основана на регистрации тени от капель, пересекающих плоский поток лазерного излучения [8]. Для подачи воздуха в генератор использовался микрокомпрессор, буферный сосуд с манометром и микрокран. Уровень жидкости в сосуде с генератором регулировался простой U-образной системой.

Важным условием длительной эксплуатации генератора является тщательная очистка воды и воздуха, используемых в процессе измерений. Это связано с малым диаметром сопла генератора, в котором при длительной работе осаждаются частицы, как из воздуха, так и из жидкости.

Разнообразные сведения о работе описанного генератора струи монодисперсных капель получены в результате комплексного изучения его параметров.

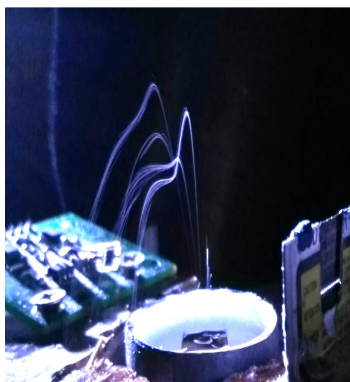


Рис. 5а. Режим генерации нескольких струй капель

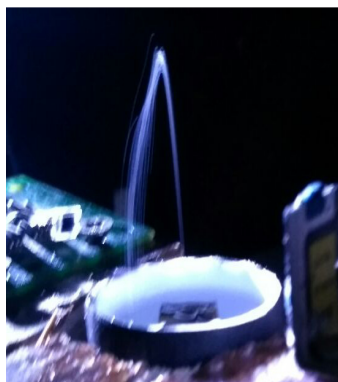


Рис. 5б. Режим генерации одиночной струи капель

В качестве примера ниже приведены результаты измерений параметров одного из таких генераторов.

Для приведения генератора монодисперсных капель в действие, прежде всего, необходимо наполнить жидкостью (например, дистиллированной водой) сосуд 2 до такого уровня, чтобы на поверхности стеклянного капилляра образовалась пленка. Затем следует подать сжатый воздух в капилляр под таким давлением, чтобы возникло разбрызгивание жидкости над соплом из тонкого слоя жидкости в виде хаотически летящих капель. Затем необходимо медленно снижать давление до прекращения процесса разбрызгивания жидкости. Опять несколько раз повышая и снижая давление, нужно найти такое его значение, что даже очень небольшое повышение которого приводит к хаотическому разбрызгиванию.

Далее необходимо медленно уменьшать количество жидкости, подаваемое в зону образования капель посредством понижения уровня жидкости в сосуде 2. Очень медленное изменение этого параметра при стабильном давлении воздуха приведет к “сворачиванию” хаотического разбрызгивания и образованию 2-3 тонких струй капель. Последующее малое снижение подачи жидкости выведет генератор на рабочий режим – генерирование тонкой струи монодисперсных капель.

Ниже приведены фотографии потоков капель, полученные при разных режимах работы генератора. Как видно из них, при настройке генератора вначале возникают несколько струй капель (рис.5а), а при возникновении резонансного режима образуется одиночная струя монодисперсных капель (рис.5б).

Соответственно, капли не всегда являются монодисперсными - монодисперсный режим реализуется лишь при резонансном режиме работы устройства. Если капли осаждались на стеклянную пластину, покрытую тонким слоем масла и двигающуюся со скоростью 10 см/с, то можно определить как частоту их образования, так и их линейные размеры с помощью микроскопа.

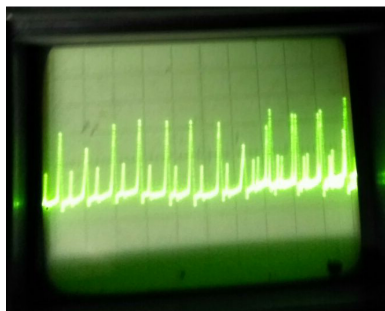


Рис. 6а. Осциллограмма образования двух струй капель

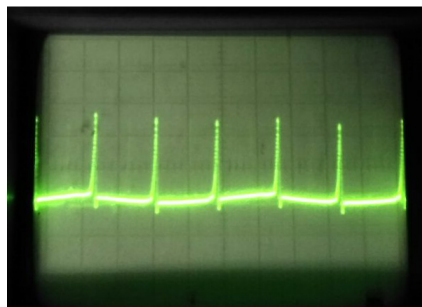


Рис. 6б. Осциллограмма образования одиночной струи монодисперсных капель

Эти явления иллюстрируются данными регистрации капель лазерным теневым счетчиком. Так, на Рис.6 показаны осциллограммы двух разных случаев – образования двух разной дисперсности струй (Рис.6а) и одиночной струи монодисперсных капель (Рис.6б).

В соответствии с проведенным анализом, системы из таких стоячих волн должны не постепенно, а скачками переходить одна в другую при изменении одной из переменных. В качестве такой переменной было использовано давление воздуха. По мере повышения давления система волн из 2-х или 3-х колец отдельными шагами переходит из такой системы в более сложную. При этом, естественно, увеличивается частота образования капель и их размер.

При проведении предыдущих отдельных измерений характеристик ГМК получены также сведения о двух явлениях, сопровождающих его работу.

Во-первых, обнаружено, что при периодических колебаниях жидкой пленки при устойчивой работе ГМК возникают звуковые волны в окружающей среде той же частоты, что и при генерировании капель [9]. Эти звуковые волны были зарегистрированы с помощью чувствительного микрофона и записаны в компьютере.

Во-вторых, как и в других процессах дробления воды, образующиеся в ГМК капли воды несут на себе электрические заряды отрицательного знака.

Значения зарядов невелики, но все капли заряжены строго одинаково [10, 11]. Естественная зарядка капель воды обусловлена наличием на поверхности воды (и некоторых водных растворов) двойных электрических слоев, разрушение которых при образовании капель приводит к разделению зарядов. Положительные заряды при этом остаются на элементах ГМК.

В принципе, управление параметрами генерации осуществляется также путем изменения номинальной толщины пленки h_0 и радиуса резонансного кольца R . Несмотря на трудности обеспечения стабильной работы в широком диапазоне перестраиваемых параметров, эксперименты с различными образцами позволили получить генерацию струй капель при следующих параметрах: $p_a = (1.1 - 1.5) \cdot 10^5$ Па, $h_0 = 40 - 150$ мкм, диаметр сопла - 10 - 20 мкм. В этих услови-

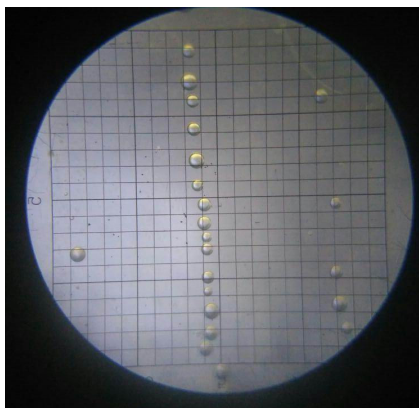


Рис. 7. Микрофотография монодисперсных капель, осажденных на подложку (диаметр капель 80 мкм, частота генерирования 380 Гц)

ях диаметр капель изменялся в пределах от 6 до 50 мкм, их скорости лежали в интервале между 0.5 и 3.0 м/с, а частоты $\nu = 0.6 - 10$ кГц. Степень монодисперсности капель, по визуальным оценкам с помощью микроскопа, достигает нескольких процентов.

Таким образом, в результате проведенной работы найдены две оптимальные конструкции генератора струи монодисперсных капель с разрушением пузырьков в тонком слое жидкости и показаны возможные варианты его функционирования.

Литература:

1. Дитякин Ю. Ф., Клячко Л. А. и др. Распыливание жидкостей. – М.: Машиностроение, 1977. – 207 с.
2. Дунский В.Ф., Никитин Н.В., Соколов М.С. Монодисперсные аэрозоли. – М.: Изд-во “Наука”, 1975. – 192 с.
3. Хмелев В.Н. Ультразвуковое распыливание жидкостей, Изд. Алт. гос. техн. ун-та, Бийск, 2010. – 271 с.
4. Верещагин И.П. и др. Электрогазодинамика дисперсных систем. - М.: Энергия, 1974. – 480 с.
5. Монодиспергирование веществ: принципы и применение / Под ред. В.А.Григорьева. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 331 с.
6. Безруков В.И. Основы электрокаплевоструйных технологий. Изд-во “Судостроение”, 2001. – 256 с.
7. Bekshaev A.Ya., Kontush S.M., Rybak S.S., Schweiger G., Esen C. Resonance penetration of gas bubbles through a thin liquid layer: a capillary resonator and its use for the generation of droplets // Journal of Aerosol Science. – 2003. – Vol. 34. – P. 469-484.

8. Черненко А.С., Контуш С.М., Зинченко А.С., Калинин В.В., Калугин В.В. Определение гранулометрического состава порошков пылеугольного топлива автоматизированной системой определения дисперсности. // Приборы и методы измерений – Минск, БНТУ, 2015, №1 (10). – С.87-94.
9. Kontush S.M., Rybak S.S., Leonova L.Yu. The pneumatic capillary wave whistle. Proceeding of the XIII Session of the Russian Acoustical Society, Moscow, August 25-29, 2003. – pp. 411-414.
10. Krasnitski V.I., Apasov A.M., Kontush S.M. The inductive charging of water droplets under partial coalescence. // Letters in Journal of Technical Physics. – 1990. – V.16. – №.18.
11. Lopatenko S.V., Kontush S.M. Some characteristics of drops charging during of breaking up of water streams // Physics of Aerocolloidal Systems. – 1980. – №.21.

Контуш С.М., Ахмеров О.Ю., Мандель В.Ю., Чурашов В.П.
Пневматичний генератор струменя монодисперсних крапель

АНОТАЦІЯ

Наведена теорія виникнення струменя монодисперсних крапель при узгодженні часу зростання і руйнування пухирців повітря та періоду кругових капілярних коливань на поверхні тонкого шару рідини. Розроблено дві оптимальні конструкції відповідного генератора струменя монодисперсних крапель і показані можливі варіанти його функціонування.

Kontush S.M., Akhmerov O.Yu., Mandel V.Yu., Churashov V.P.
Pneumatic jet generator of monodisperse drops

SUMMARY

The emergence's theory of a jet of monodisperse droplets is given when the growth and destruction time of air bubbles and the oscillations period of circular capillary on the thin liquid layer's surface is coordinated. Two optimal designs of the corresponding generator of a monodisperse droplets jet are developed and possible variants of its functioning are shown.