

УДК 541.182

А. С. Михайловская*, С. С. Рыбак**

*ИМЭМ, Одесский национальный университет им.И.И.Мечникова,

**Одесская государственная академия холода

СТОЯЧИЕ КАПИЛЛЯРНЫЕ ВОЛНЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ В ПНЕВМАТИЧЕСКОМ РЕЗОНАНСНОМ ГЕНЕРАТОРЕ МОНОДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬ

Рекомендовано до друку науковим семінаром
кафедри загальної фізики ОДАХ 02.04.2000

Проведено експериментальні виміри частоти генерації крапель і витрати повітря. Зроблено теоретичний розрахунок гравітаційно - капілярних хвиль у тонкому прошарку рідини, вміщеної в циліндричну судину. Показано, що обмірюванні частоти генерації крапель із високою точністю збігаються з власними частотами капілярних мод. Встановлена найбільш ймовірна збуджувана мода для даної конструкції генератора.

Проведены экспериментальные измерения частоты генерации капель и расхода воздуха. Проведен теоретический расчет гравитационно-капиллярных волн в тонком слое жидкости, помещенной в цилиндрический сосуд. Показано, что измеренные частоты генерации капель с высокой точностью совпадают с собственными частотами капиллярных мод. Установлена наиболее вероятная возбуждаемая мода для данной конструкции генератора.

The experimental measuring of generation frequency of drops and rate of air flux are carried out. The theoretical calculation of gravity-capillary waves in a lamina of a fluid located in a cylindrical vessel is done. It is shown that the measured frequencies of drops generation coincide with split-hair accuracy with natural frequencies of capillary modes. The most probable raised mode for a sectional construction of the generator is established.

В последнее время в физико-химических исследованиях аэрозольных систем, в технологических процессах химической и биологической индустрии аэрозолей широкое распространение получили генераторы монодисперсных капель (ГМК). Основные требования к ГМК – генерируемые капли должны быть одинакового размера и заряда, все капли движутся по одной и той же траектории с фиксированным расстоянием между ними. В некоторых ГМК используется принцип кумулятивного разрушения («схлопывания») газовых пузырьков у поверхности жидкости [1,2]. Использование стоячих капиллярных волн, возбуждаемых в тонком слое жидкости, позволило увеличить частоту генерированных капель в таких генераторах и повысить монодисперсность капель и их траекторий движения [3,4].

Особенностью конструкции генератора такого типа является наличие управляющего элемента, которым является круглое кольцо радиуса R , ограничивающее слой жидкости толщины h , в центре которого из пузырьков образуются капли. Под слоем жидкости находится специальное сопло, радиуса которого $r \ll R$, через которое под давлением p подается сжатый воздух. При соответствующих значениях давления p и толщины слоя h для данной конструкции генератора образуется одномерная струя монодисперсных капель, выбрасываемых с большой частотой и двигающихся по одной траектории.

Возбуждаемые, в результате кумулятивного всплеска в ограниченном кольцом слое капиллярные волны управляют процессом образования капель, обуславливая резонансные условия разрушения газовых пузырьков. Схема и принцип работы пневматического резонансного ГМК приведены и подробно разобраны в [4].

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования работы такого генератора, проводится сравнение частот генерации капель с теоретически рас-

считанными собственными частотами капиллярных волн, возбуждаемых в слое жидкости, который находится внутри управляющего кольца.

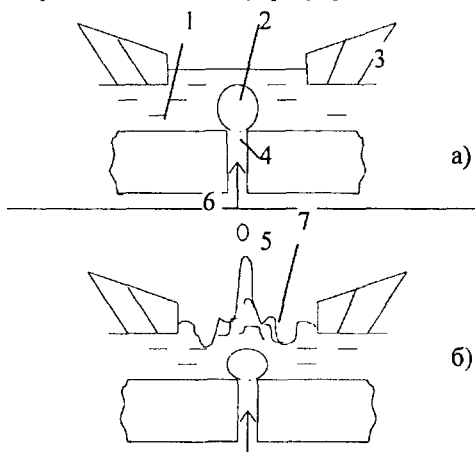


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

а) – образование первого пузырька;
б) – образования кумулятивного выброса, капли, системы стоячих волн и нового пузырька.

1-слой жидкости, 2-пузырек, 3-ограничительное кольцо, 4-отверстие для подачи газа, 5-всплеск, 6-капля, 7-стоячие волны

Для измерения частоты следования капель, выбрасываемых генератором, капли улавливались на стеклянную подложку, покрытую специальным масляным составом, который препятствует быстрому испарению капель. Подложка передвигалась

над соплом генератора с постоянной скоростью $v = 28,14 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$. Измерив с помощью микроскопа расстояние между двумя соседними каплями Δl , находим частоту

генерации капель по формуле $f = \frac{v}{\Delta l}$.

Устойчивая работа резонансного пузырькового генератора при данных диаметрах сопла и ограничительного кольца требует регулировки рабочих параметров, таких, как давление подаваемого в сопло распылителя воздуха и толщины слоя жидкости. Автоматической регулировки жидкости в приборе бывает не достаточно, и с течением времени в результате процессов расхода и испарения жидкости толщина слоя меняется. Экспериментально установлено, что с течением времени расход воздуха для одной серии измерений уменьшается, что связано, по-видимому, с засорением сопла распылителя, частота генерации становится неустойчивой и генерация капель срывается.

На рис.2 представлены экспериментально измеренные зависимости между расходом воздуха и частотой генерации капель для пневматического резонансного ГМС с диаметром сопла распылителя 30 мкм и диаметром ограничительного кольца $2R=0,38$ см. Для каждого режима работы генератора наблюдается увеличение частоты появления капель с ростом расхода воздуха.

Из рисунка видно, что капли генерируются на нескольких отдельных частотах. Эти частоты группируются неравномерно. Для объяснения последнего эффекта были рассчитаны собственные колебания тонкого слоя жидкости, помещенного в цилиндрический сосуд. Расчет проводился на основе теории капиллярно-гравитационных волн на поверхности несжимаемой жидкости в приближении бесконечно-малых волн в отсутствии вихревого движения (см., напр., [5,6]). В этом случае волновые движения жидкости происходят под действием силы тяжести и капиллярной силы и будут обладать потенциалом скоростей $\varphi = \varphi(r, z, t)$, который удовлетворяет уравнению Лапласа. В цилиндрической системе координат с началом в центре невозмущенной поверхности это уравнение имеет следующий вид:

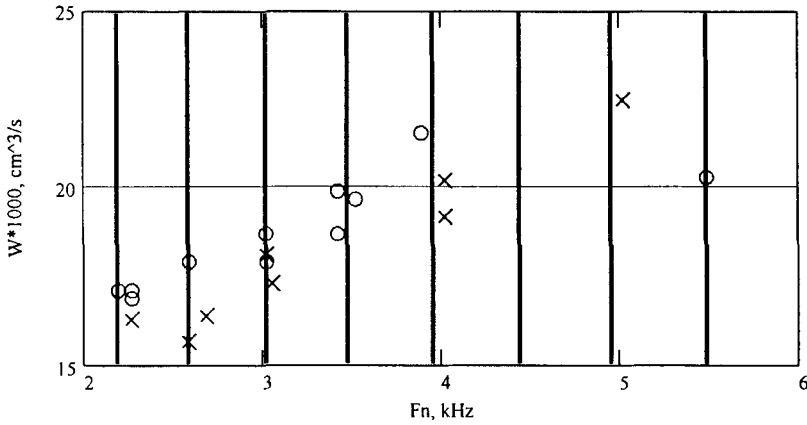


Рис.2. Измеренные значения расхода воздуха и частоты генерации капель воды для двух режимов работы пузырькового резонансного генератора капель. Вертикальные прямые линии – рассчитанные частоты собственных колебаний цилиндрического слоя воды. Расчет проводился для толщины слоя 400 мкм, радиус слоя – 0.19 см

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

Оно должно решаться совместно со следующими граничными условиями: На свободной поверхности жидкости, т.е. при $z = 0$

$$-\frac{T}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \eta}{\partial r} \right) = \frac{\partial \varphi}{\partial t} - g\eta, \quad \frac{\partial \eta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right);$$

на стенках сосуда: на дне ($z = -h$) $\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$ и на боковых стенках ($r=R$) имеем $\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$.

Здесь $\varphi = \varphi(r, z, t)$ - потенциал скоростей движения жидкости, $\eta(r, t)$ - уравнение свободной поверхности жидкости, T - коэффициент поверхностного натяжения жидкости, ρ - плотность жидкости. Решение уравнения Лапласа для потенциала будем искать методом разделения переменных $\varphi(r, z, t) = \Phi(r, t)Z(z, t)$ Уравнение непрерывности при этом принимает вид $Z(z, t) \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \Phi(r, t) \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0$ и позволяет записать два уравнения для функций $\Phi(r, t)$ и $Z(z, t)$ отдельно:

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} - k^2 Z = 0; \quad \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + k^2 r \Phi = 0; \text{ где } k - \text{ волновое число.}$$

Решением первого уравнения, удовлетворяющее граничному условию не прогибания на дне сосуда, является $Z(z, t) = \text{ch } k(h + z) \cdot D(t)$. Аналогично из второго уравнения получаем $\Phi(r, t) = J_0(kr) \cdot C_1(t)$. Тогда для потенциала скоростей можно записать следующее выражение:

$$\varphi(r, z; t) = A(t)J_0(kr) \operatorname{ch} k(z + h).$$

Для определения $A(t)$ используем условие разрывности давления на поверхности жидкости, т.е. граничное условие $\frac{T}{\rho r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z \partial r} \right) \right] = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ при $z=0$. Подставляя сюда найденное выражение для потенциала, мы получаем после ряда преобразований уравнение $\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \omega^2 A(t) = 0$, из которого следует

$$A(t) = C \cos(\omega t + \varepsilon). \text{ Здесь } \omega = \sqrt{\left(gk + k^3 \frac{T}{\rho} \right) \operatorname{th} kh} - \text{ частота колебаний, } C -$$

некоторая константа, ε - начальная фаза. Окончательно, для потенциала скоростей и свободной поверхности слоя жидкости, которыми описывается волновое движение слоя жидкости под действием силы тяжести и капиллярной силы, можно записать следующие выражения:

$$\varphi(r, z; t) = CJ_0(kr) \operatorname{ch} k(z + h) \cos(\omega t + \varepsilon),$$

$$\eta(r, t) = -\frac{C \cdot k \operatorname{sh} kh}{\omega} J_0(kr) \sin(\omega t + \varepsilon).$$

Это волновое движение представляет собой стоячую волну с частотой ω и длиной волны $\lambda = \frac{2\pi}{k}$. Отметим, что для тонких слоев с толщиной $h^2 \leq \frac{3T}{\rho g}$ фазо-

вая скорость волны $v_\varphi = \frac{\omega(k)}{k}$ монотонно растет с увеличением k .

Если поместить слой в цилиндрический сосуд, то граничные условия на стенках сосуда (условия обтекания) $\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$ при $r = R$ позволяют найти собственные

колебания (моды) слоя жидкости в рассматриваемом сосуде. Граничные условия выполняются для значений волновых чисел, удовлетворяющих при данном значении радиуса цилиндра R уравнению $J_1(kR) = 0$, где $J_1(x)$ - функция Бесселя 1-го порядка. Найдя корни функции Бесселя первого порядка x_n , $n = 1, 2, 3, \dots$, находим для стоячих гравитационно-капиллярных волн, которые возбуждаются в цилиндрическом

слое жидкости конечной глубины, значения величин волновых чисел $k_n = \frac{x_n}{R}$ и

$$\text{значения собственных частот } \omega_n = \sqrt{\left(gk_n + k_n^3 \frac{T}{\rho} \right) \operatorname{th} k_n h} \text{ и } Fn = \frac{\omega_n}{2\pi}.$$

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что в данной конструкции пневматического резонансного ГМК возбуждаются моды с номерами от $n=4$ до $n=15$. Как следует из рис.2, совпадение экспериментальных данных с расчетными находится в пределах ошибки эксперимента. Причем, в проведенной серии измерений наиболее часто возбуждается мода с номером $n=10$, частота

которой 3.019 кГц. Добавление воды, т.е. увеличение толщины слоя, во время работы генератора приводит к скачкообразному уменьшению частоты генерации капель – переходу на более низкочастотную моду. Согласно графикам на рис.4 такое явление возможно, если для данного размера ограничительного кольца толщина слоя воды превышает 100 мкм, когда частоты возбуждаемых стоячих капиллярных волн почти не зависят от толщины слоя.

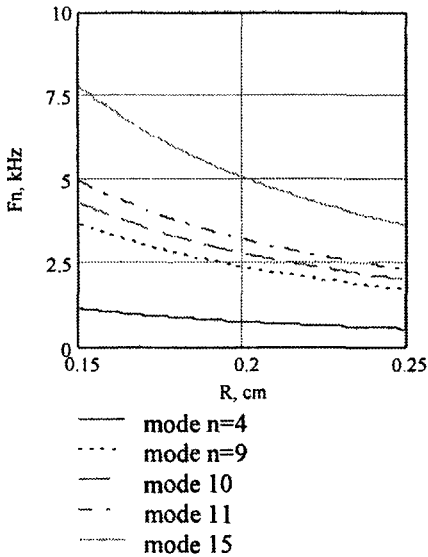


Рис.3. Рассчитанная зависимость частот собственных колебаний тонкого слоя воды толщиной 400 мкм от радиуса ограничительного кольца для пяти мод

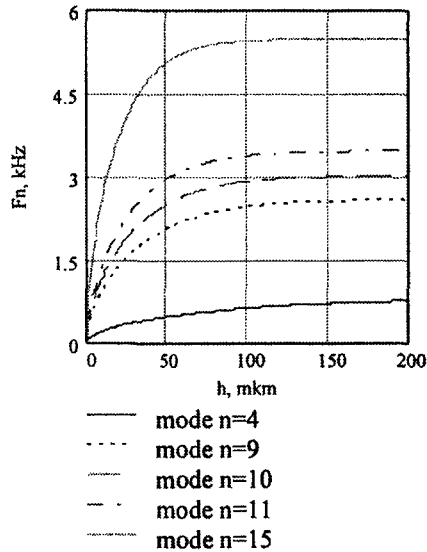


Рис.4. Рассчитанная зависимость частот собственных колебаний тонкого слоя воды, ограниченного кольцом радиуса 0.19 см, от толщины слоя для пяти мод

Таким образом, можно утверждать, что предложенный в [3] метод резонансного управления генерацией капель с помощью возбуждения стоячих капиллярных волн подтверждается экспериментальными результатами и теоретическими расчетами.

В заключение мы хотим выразить благодарность проф. Контушу С.М. за помощь и внимание к работе.

1. Spiel D., de Leeuw G. Formation and production of sea spray aerosol // J. Aeros. Sci. - 1996. - V. 27, Suppl. 1. - P. S65-S66.
2. Devarakonda V., Ray A.K., Kaiser T., Schweiger G. Vibrating orifice droplet generator for studying fast processes associated with microdroplets // Aeros. Sci. Technol. - 1998. - V. 28. - P. 531-547.
3. Контуш С.М., Романов К.В. Генерация монодисперсных капель при движении газа через тонкий слой жидкости // Физика аэродисперсных систем. - 1971. №4. - С.38-43.
4. Бекшаев А.Я., Контуш С.М., Рыбак С.С. // Вісник ОДУ. - 1999. - Т. 4, вип. 4. Фіз.-мат. науки. - С.17-21.
5. Стретт Дж. В. (Лорд Рэлей). Теория звука. Т. 2. - М., ГИТТЛ. - 1955. - 503 с.
6. Сретенский Л.Н. Теория волновых движений жидкости. М.,: Наука, 1977. - 816 с.