

УДК 697.932.6

## Форсунка для систем испарительного охлаждения и увлажнения воздуха

Канд. техн. наук, доцент **Рубцов А.К.** a\_rubtsov@rambler.ru

**Парахина Е.Г., Гурко Н.А.**

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Испарительное охлаждение лежит в основе одной из самых первых придуманных человеком систем охлаждения пространства, где охлаждение воздуха происходит за счет естественного испарения воды. Для борьбы с высокими температурами в теплый период года используется форсуночное охлаждение, а в холодный период года форсунка используется для увлажнения воздуха. В статье рассматривается форсунка с соплом выполненным в виде арочной конструкции с истечением воды через оппозитные отверстия. Обнаружено, что при истечении потока из отверстий перекрытых аркой эффективное дробление происходит как за счет соударения встречных потоков, так и вследствие возникновения под аркой автоколебательного процесса.*

*Приводятся результаты испытания форсунок различных конфигураций, с целью определения эффективного типоразмера форсунки для процесса адиабатического охлаждения воздуха. Также была проведена оценка размеров капель в зависимости от напора воды. Установлено, что с помощью рассматриваемой форсунки можно получить малые размеры капель при более низких значениях давления по сравнению с известными аналогами. При давлении 10 бар можно получить капли размером 15 мкм.*

*Ключевые слова:* испарительное охлаждение, диаметр капли, форсунка, арочный элемент.

doi: 10.17586/2310-1148-2016-9-42-48

---

## Nozzle for evaporative cooling and air humidification systems

Ph. D. **Rubtsov A.K.** a\_rubtsov@rambler.ru

**Parakhina E.G., Gurko N.A.**

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*Evaporative cooling underlies one of the earliest space cooling systems invented by human, where the air cooling realizes owing to the natural water evaporation. To combat the high temperatures in the warm season, spray cooling is used, and in the cold season nozzle is used to humidify the air. Injector with nozzle made in the form of arch with the expiration of water through the opposed openings is considered in the article. It was found that at the flow expiration from the holes barred by arch efficient crushing occurs owing to the collision counter flows and due to the occurrence of self-vibrating under the arch. Are presented test results of nozzles of various configurations, in order to determine the effective size of the nozzle for adiabatic air cooling. Also was evaluated the estimation of drops size depending upon the water pressure. It is found that by using of the described nozzle we can get smaller drops sizes at lower pressures compared to the known analogs. At a pressure of 10 bar can be obtained drop size of 15 microns.*

*Keywords:* evaporative cooling, the drop diameter, the nozzle, the arched element.

---

Многочисленные экспериментальные исследования показывают, что струи жидкости, вытекающие из отверстия в среду газа, пульсируют. При определенных условиях пульсация жидкости усиливается вдоль струи и приводит к распаду ее на капли. Характер пульсационного движения зависит от формы сопла, из которого вытекает струя, масштаба начальной турбулентности жидкости в струе, физических свойств жидкости и газа и их относительной скорости [1].

Процесс автоколебания возникающий при истечении через арочную конструкцию назван авторами «RU-эффект». Изобретение относится к технике распыления жидких сред и может быть использовано в жидкостных охладителях, в системах кондиционирования воздуха, в дождевых установках, в системах пожаротушения.

Столь распространенное применение распыливания объясняется тем, что во время этих процессах уменьшение размеров капель увеличивает коэффициент теплопередачи и, следовательно, уменьшает время протекания процесса [2].

Форсунка содержит снабженный насадок, корпус с входным отверстием для распыляемой среды. Насадка имеет, по меньшей мере, одно выпускное отверстие. Выпускное отверстие перекрыто желобобразным экраном, размещенным с внутренней стороны форсунки и обращенным своей полостью к выпускному отверстию.

Две расположенные напротив друг друга кромки экрана примыкают к поверхности форсунки, а две другие – образуют два оппозиционных отверстия.

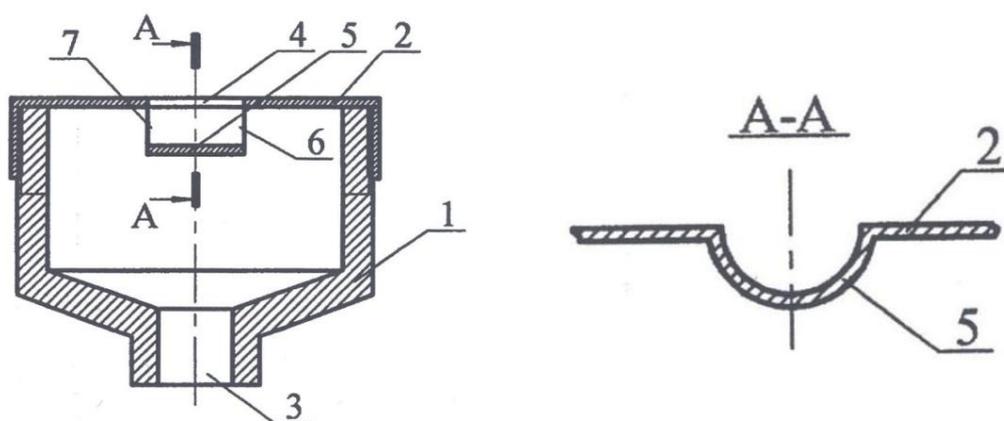


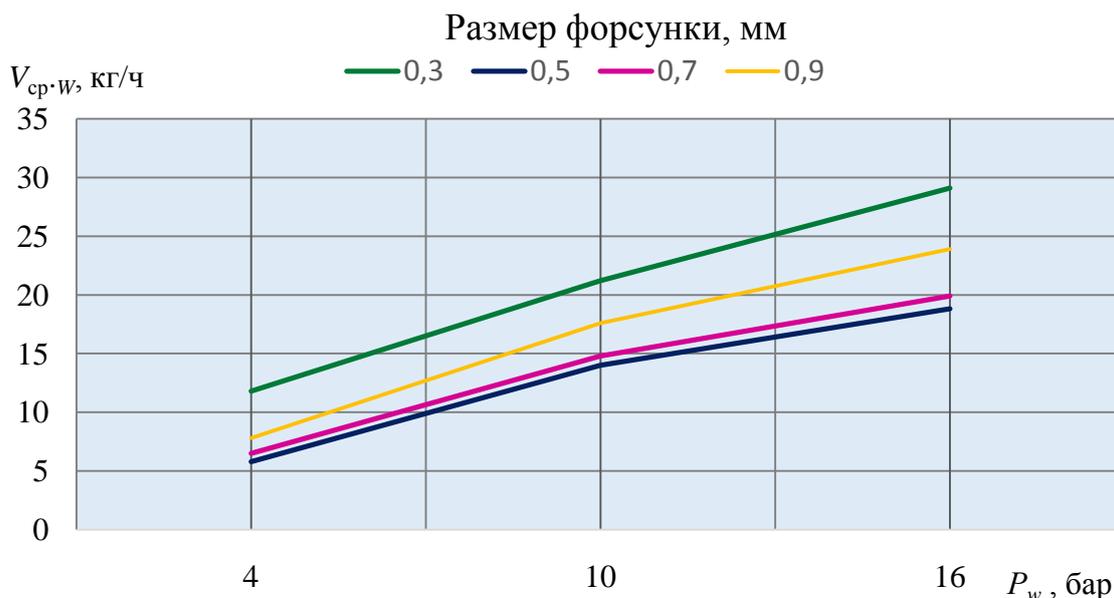
Рис. 1. Форсунка

Форсунка работает следующим образом. Распыляемая среда в виде жидкости, например, вода из водопроводной сети через отверстие 3 поступает в корпус 1. В корпусе 1 происходит столкновение потока распыляемой среды с его внутренними стенками, в результате чего происходит частичная турбулизация потока.

Дальнейшая турбулизация потока и его дробление происходит при столкновении с экраном 5, перекрывающим выпускное отверстие выполненное в насадке 2. После этого отдельные потоки распыляемой среды поступают в образованные экранами 5 оппозиционные 6 и 7 отверстия, движутся навстречу друг другу и соударяются между собой в полости экрана 5 в зоне выпускного отверстия 4.

В результате их соударения происходит дальнейшее дробление и турбулизация, что в конечном итоге приводит к повышению степени диспергирования распыляемой среды, которая выходит из форсунки наружу через выпускные отверстие 4 в виде мельчайших капель [3].

Для определения наилучшего варианта форсунки на основе RU-эффекта, подходящего для условия работы, было решено сделать экспериментальные образцы форсунок с диаметрами арок 0,3 мм, 0,5 мм, 0,7 мм, 0,9 мм.



**Рис. 2. График зависимости**

Техническим результатом, получаемым при практическом использовании предлагаемого изобретения, является сведение до минимума расхода воды за счет более эффективного разбрызгивания. Такого эффекта можно достигнуть используя форсунку диаметром 0,5 мм.

Таблица 1

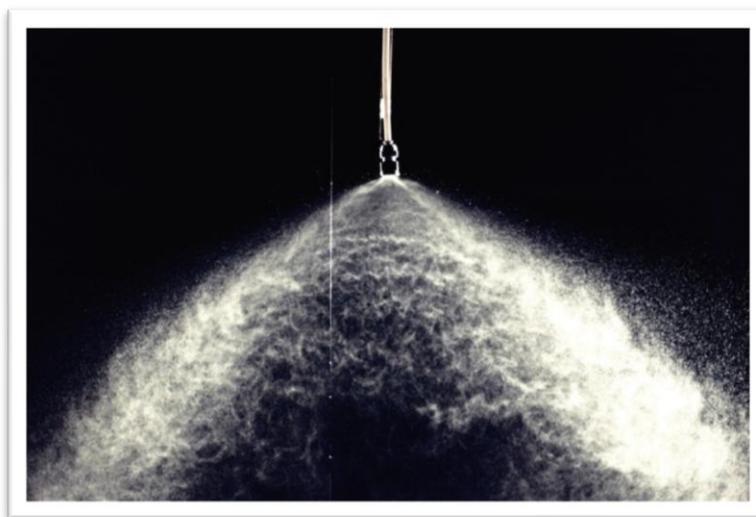
**Результаты испытаний форсунки 0,5 мм, расход, л/ч**

Размер, мм	Давление, бар		
	4	10	16
0,5×0,5	4,680	11,160	14,600
0,5×1,0	4,240	12,000	14,200
0,5×1,5	3,720	10,000	12,400
0,5×2,0	3,720	8,800	11,800

На основе полученных в данной работе результатов можно выявить оптимальные размеры форсунки.

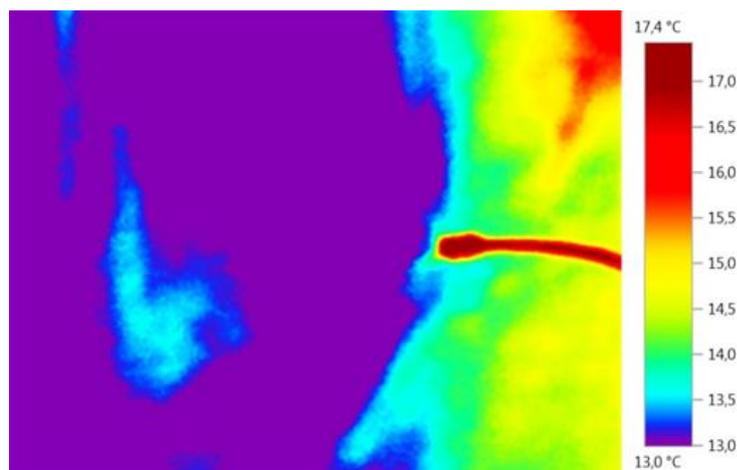
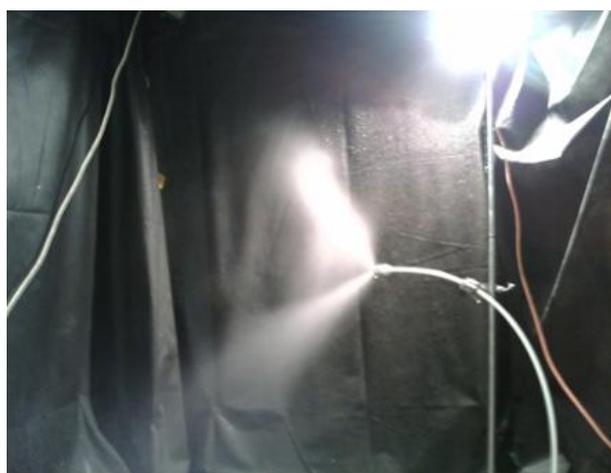
Наиболее широкий факел можно было наблюдать при типоразмере 0,5×2,0мм, при вертикальной ориентации форсунки при давлении 16 бар.

Размеры факела ≈ 0,7×0,7 м, форма факела очень подвижна, капли легко уносятся воздухом, продолжительное время витают в воздухе.



**Рис. 3 . Работа форсунки 0,5×2,0 мм при давлении 16 бар**

При помощи термографа (тепловизора), производя съемку с одной точки, можно увидеть процесс охлаждения в динамике – темные зоны (более холодные) со временем увеличиваются. На рисунке представлены поля температур окружающего воздуха в пределах от 13 °С до 17 °С.



**Рис. 4. Результаты съемки факела форсунки через тепловизор**

Из термограммы можно сделать вывод, что возможно понижение температуры окружающего воздуха в пределах 4–5 °С.

Определяющим критерием при выборе форсунок является размер (диаметр) капли. Существует несколько методов измерения размера каплей. Как наиболее современный был использован интерференционный метод регистрации Ми-рассеяния лазерного излучения на каплях (IMI, Interferometric MieImaging) [4], [5].



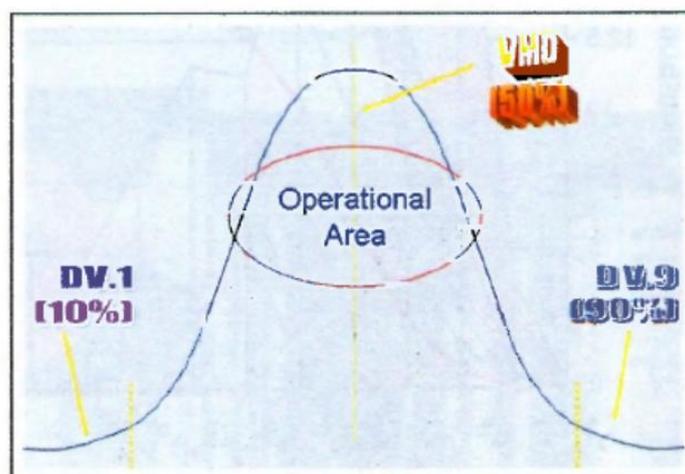
**Рис. 5. Фотография контуров интерференционного изображения капли**

На представленной фотографии программа DaVis (LaVision) определила несколько десятков капель. Несмотря на небольшое количество этих фотографий (170) ансамбль капель состоит в итоге из нескольких тысяч капель. Это позволяет построить распределение капель по диаметру, а также вычислить некоторые другие статистические данные:

$$D_{10} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{D_i^1}{p_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{D_i^0}{p_i}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{D_i^1}{p_i}}{N}; \quad D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{D_i^3}{p_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{D_i^2}{p_i}}$$

где  $D_{10}$  – средний диаметр капель,  $N$  – количество найденных на 170 фотографиях капель,  $D_i$  – диаметр капли,  $p_i$  – условная частота встречаемости капли с диаметром  $D_i$  (на гистограмме диаметров),  $D_{32}$  – величина, характеризующий распыл в целом, связанная с отношением среднего объема капли к ее площади.

DVX (где «X» = «10», «50» или «90») – величина диаметра капель такая, что в каплях распыла с диаметрами менее DVX содержится X % всего распыла. Например, если  $DV_{90} = 60$  мкм, то это означает, что 90 % всего объема воды распыла содержится в каплях, диаметр которых менее 60 мкм.



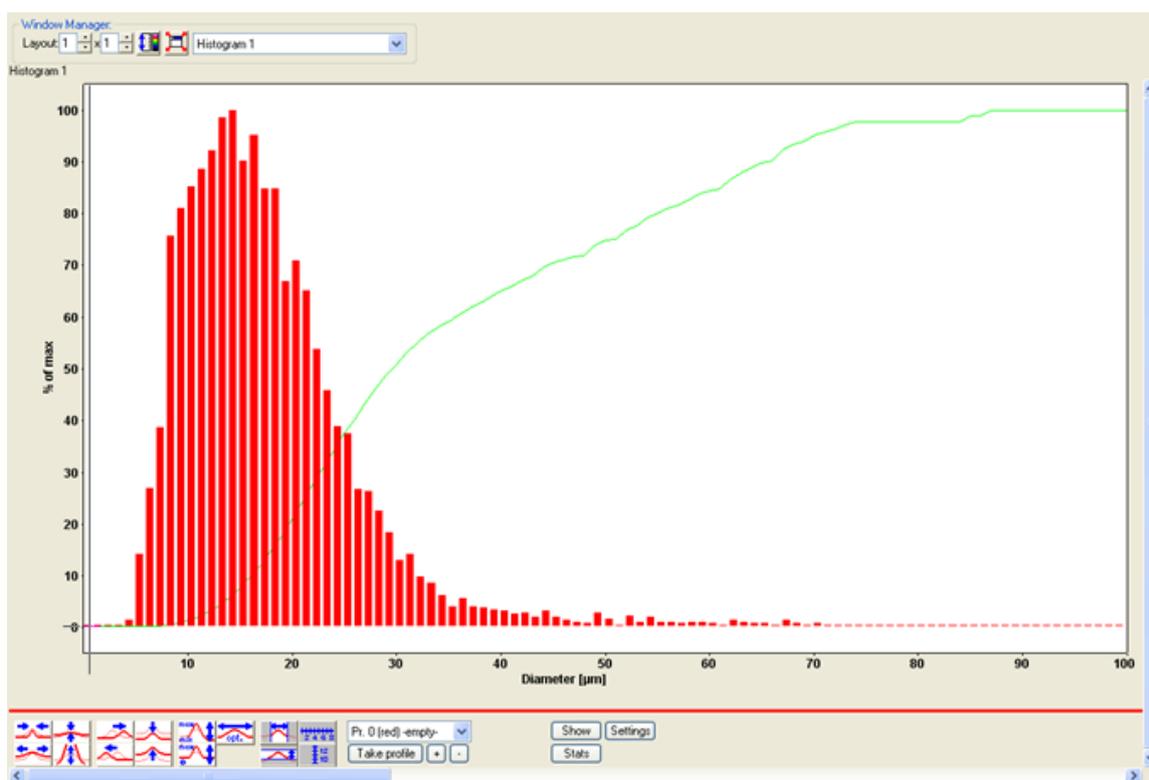
**Рис. 6. Определение медиальных значений диаметров (иллюстрация Robert E.Wolf)**

Объемные диаметры DV.1 (D10) и DV.9 (D90) соответствуют 10 % и 90 % общего объема. Значения DV.1 используются для оценки мелких капель, достигающих сепараторов влаги, DV.9 – для крупных капель, работающих на испарительное охлаждение.

Объемный (массовый) медианный диаметр VMD или диаметр медианы объема DV.5 (D50) находится из условия:

$$\int_0^{DV.5} \frac{d}{v} = \int_{DV.5}^{\infty} \frac{d}{v} = 50\%$$

Это означает, что значение DV.5 является границей между группами мелких и крупных капель, совокупный объем каждой из которых равен половине общего объема [6].



**Рис. 7. Гистограмма распределения диаметра капель при давлении 10 бар**

На представленной гистограмме присутствует кривая (зеленый цвет) зависимости удельного объема жидкости (воды) от диаметра капель, полученная интегрированием гистограммы.

Таблица 2

**Статические данные по распылу при различном давлении**

Давление, бар	N	D10 мкм	D32 мкм	DV10 мкм	DV50 мкм	DV90 мкм
10	5500	17,3	27,9	16,1	29,6	65,6
14	4100	20,9	33,4	19,8	38,4	62,9
18	3000	23,0	38,4	21,7	49,5	69,3

Исследуемая форсунка относится к форсункам среднего давления, при этом подача жидкости осуществляется пульсационным распыливанием. Сложное взаимодействие двух встречно-соосных потоков обеспечивает периодический подпор одного из них, как следствие, организуя устойчивый колебательный характер течения [7].

Возникающие при этом дополнительные колебания струи способствуют увеличению поверхностной энергии, быстрой потере устойчивости потока и, как следствие, более тонкому диспергированию [8].

При давлении 10 бар можно получить капли размером 15 мкм. При увеличении давления от 10 до 18 бар происходит средний диаметр капель распыла форсунки увеличивается с 17,3 до 20 мкм

Форсунка на основе RU-эффекта лучше по всем параметрам: угол получаемой струи спрея 130°, угасание струи быстрее в 2–3 раза, а дисперсность капель при давлении 16 бар такая же, как у центробежной форсунки при давлении выше 30 бар.

### Список литературы

1. *Витман Л.А.* Распыливание жидкости форсунками/ Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев.- Государственное энергетическое издательство, 1962. – 21 с.
2. *Витман Л.А.* Распыливание жидкости форсунками/ Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев. – Государственное энергетическое издательство, 1962. – 4 с.
3. Форсунка: пат. 2299769 Рос. Федерация: МПК В 05 В 1/02/ С.И. Бурцев, А.К. Рубцов; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество «Бюро техники кондиционирования и охлаждения» – № 2005133418/12; заявл. 19.10.2005; опубл. 27.05.2007, Бюл. № 15 – 5 с.
4. LaVision Particle Master IMI. Product Manual -<http://lavision.de/en/products/particlemaster.php>
5. LaVision Sheet Optics Thin. Product Manual- <http://www.lavision.de/en/techniques/piv.php>
6. *Луна А.И.* Кондиционирование воздуха. Основы теории. Современные технологии обработки воздуха. Изд. второе, перераб., доп., Одесса: ОГАХ, Издательство: "Издательство ВМВ", 2010. – 323 с.
7. *Куфтырев К.А.* Явление аномально высокой амплитуды автоколебаний при истечении жидкости из прямоугольного отверстия, перекрытого арочным элементом / К.А. Куфтырев, Д.М. Денисихина- <http://ru-effect.technology/>
8. *Пажи Д.Г.* Основы техники распыливание жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов.- Издательство "Химия", 1984.- 12 с.
9. *Никитин А. А., Рябова Т.В., Поддубный Р.А.* Процессы обработки воздуха в системах кондиционирования воздуха // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Холодильная техника и кондиционирование. 2015. № 2.

Статья поступила в редакцию 15.02.2016 г.