

УДК 67.05

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-3-286-72-75

*A. S. Панюлайтис, Г. Н. Овчинников, А. М. Макаров, И. В. Волков*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАПЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАБОТЕ  
УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ  
РАСХОДА ЖИДКОСТНЫХ КОМПОНЕНТОВ**

**Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: app@vstu.ru

С целью математического описания принципа действия устройства для автоматического высокоточного регулирования расхода жидкостных компонентов были рассмотрены несколько процессов, происходящих с каплей жидкости, а также свойства исследуемых жидкостей. Произведен аналитический расчет основных параметров процесса каплеобразования для различных типов жидкостей, рассмотрен профиль осесимметричной свисающей капли, выведена система уравнений, которая пойдет в основу разрабатываемой математической модели работы системы управления.

**Ключевые слова:** расходомер, высокоточное регулирование жидкости, контроль малых расходов жидкости, нефтехимическая промышленность, оптическая скамья, каплеобразование, математическая модель.

*A. S. Panyulaitis, G. N. Ovchinnikov, A. M. Makarov, I. V. Volkov*

**INVESTIGATION OF THE DROPLET FORMATION PROCESS  
DURING OPERATION OF A DEVICE FOR HIGH-PRECISION  
FLOW CONTROL OF LIQUID COMPONENTS**

**Volgograd State Technical University**

To mathematically describe the principle of operation of a device for high-precision flow control of liquid components, several processes occurring with a drop of liquid were considered, as well as the properties of the studied liquids themselves. An analytical calculation of the main parameters of the droplet formation process for various types of liquids was performed, the profile of an axisymmetric hanging drop was considered, a system of equations was derived, which will form the basis of the mathematical model of the device being developed.

**Keywords:** flow meter, high-precision liquid regulation, control of low liquid flow, petrochemical industry, optical bench, droplet formation, mathematical model.

В настоящее время существуют примеры устройств, позволяющих осуществлять точное регулирование расхода различных веществ, а также определять вязкость отобранных проб механическим методом в химической, нефтехимической, лакокрасочной промышленности, клинико-диагностических лабораториях, в области 3D-печати и др.

Бесконтактный метод измерения – один из наиболее рациональных способов измерения при работе с ядовитыми и химически активными веществами.

На сегодняшний день вопрос разработки систем высокоточного регулирования жидкостных компонентов, позволяющих производить контроль малых расходов жидкости и измерение необходимых параметров вещества, является наиболее актуальным. Новые системы необходимы для измерения и контроля нескольких физико-механических параметров одновременно.

Для решения задачи измерения и контроля малых расходов жидкости бесконтактным методом на основе существующих устройств [1, 2] была разработана конструкция модернизированной системы высокоточного регулирования расхода жидкостных компонентов. Подробное описание основных элементов системы и принцип ее работы рассматривается в статье [3].

Для математического описания принципа действия данного устройства с достаточной степенью точности необходимо рассмотреть несколько процессов, происходящих с каплей жидкости, а также основные свойства исследуемых жидкостей. Одним из наиболее важных параметров для математического описания рассматриваемых жидкостей является плотность. Для проведения исследования использовались несколько разновидностей жидкостей, значение плотности которых представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Плотность исследуемых жидкостей

Наименование жидкости	Плотность, г/см <sup>3</sup> (г/мл)
Водный раствор NaCl 0,9%	1,005
Вода	0,998
Глицерин	1,261
Этанол	0,789
Керосин	0,820

На рис. 1 представлена схема каплеобразования.

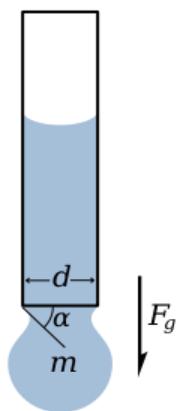


Рис. 1. Схема процесса каплеобразования

На представленной схеме, капля задерживается на конце трубы за счет силы поверхностного натяжения. Эта сила пропорциональна длине границы между жидкостью и трубкой и соответственно равна:

$$F = 2\pi R\gamma, \quad (1)$$

где  $R$  – внутренний радиус трубы, мм,  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Капля не отрывается, пока эта сила способна нейтрализовать силу тяжести, действующую на каплю в вертикальной проекции, то есть:

$$mg = 2\pi R\gamma \sin \alpha. \quad (2)$$

При увеличении массы капли, то есть при ее росте, угол  $\alpha$  будет стремиться к  $90^\circ$ , и в со-

стоянии равновесия сил, формула примет вид:  
 $mg = 2\pi R\gamma. \quad (3)$

Из формулы (3) получаем массу капли жидкости:

$$m = \frac{2\pi R\gamma}{g}. \quad (4)$$

Другими важными параметрами являются массовый расход и время пролета капли через измерительную плоскость. Массовый расход необходим для определения соответствия между объемным расходом и светопроницаемостью исследуемой жидкости. Так же он позволяет определить среднюю скорость потока жидкости. Массовый расход  $Q_m$  рассчитывается по формуле:

$$Q_m = \rho v S, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – средняя скорость потока, м/с;  $S$  – площадь сечения потока, м<sup>2</sup>.

Массовый расход и объемный расход  $Q$  связаны выражением:

$$Q_m = \rho Q. \quad (6)$$

Также объемный расход можно определить по формуле:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (7)$$

где  $V$  – объем жидкости, прошедший через некоторое сечение потока, за определенное время,  $t$  – время за которое жидкость объема  $V$  прошла через поперечное сечение потока.

Время пролета капли через измерительную плоскость:

$$t = \sqrt{\frac{2h_2}{g}} - \sqrt{\frac{2h_1}{g}}, \quad (8)$$

где  $h_2$  – конечное расстояние, измеряемое от каплеобразователя,  $h_1$  – начальное расстояние, измеряемое от каплеобразователя.

В табл. 2 представлены результаты расчета основных параметров жидкости на примере водного раствора NaCl 0,9%.

Таблица 2  
Результаты расчета

Масса одной капли $m$ , г	Поверхностное натяжение $\sigma$ , Н/м	Радиус выходного отверстия каплеобразователя $R$ , мм	Массовый расход жидкости $Q_m$ , г/сек	Площадь сечения потока $S$ , мм <sup>2</sup>	Средняя скорость потока жидкости $V$ , м/с	Объемный расход жидкости $Q$ , мл/с	Время пролета капли через измерительную плоскость $t$ , с	Объем капли жидкости $V$ , мл
0,07	0,07286	1,5	0,054	7,065	0,0076	0,0537	0,0086	0,05

Также был рассчитан объемный расход для других видов жидкостей (табл. 3).

Таблица 3  
Результаты расчета объемного расхода

Наименование жидкости	Объемный расход жидкости $Q$ мл/с	Плотность в кг/м <sup>3</sup>
Этанол	0,0684	789
Керосин	0,0659	820
Вода	0,0541	998
Водный раствор NaCl 0,9%	0,0537	1005
Глицерин	0,0428	1261

На основе полученных результатов была получена зависимость объемного расхода от плотности жидкости (рис. 2).

Для разрабатываемой математической модели процесса работы устройства необходимо

рассмотреть осесимметричную каплю, свисающую с горизонтальной плоскости  $P$  или кончика цилиндрического капилляра [4]. На рис. 3 представлен профиль висящей капли и, связанная с ней, система координат.

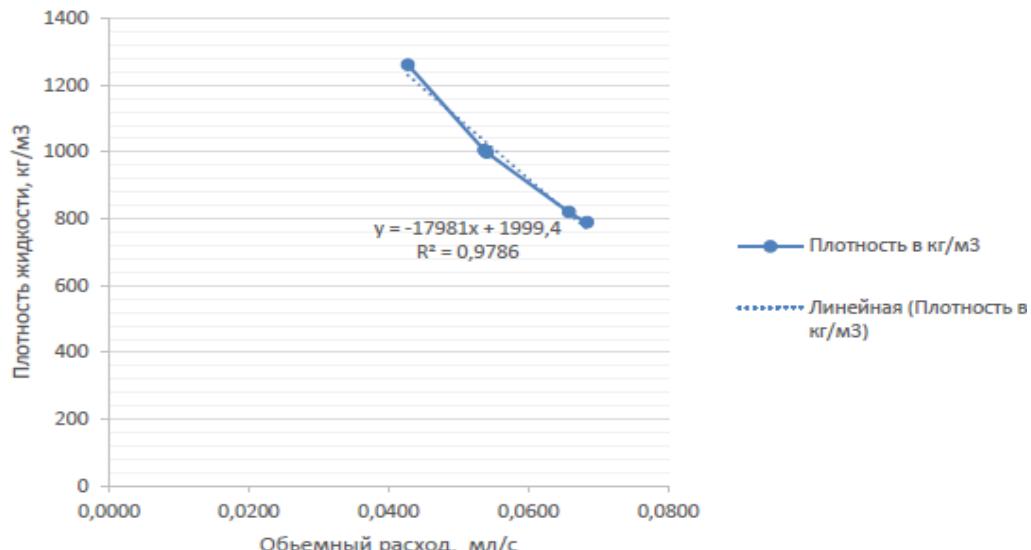


Рис. 2. Зависимость объемного расхода  $Q$  от плотности жидкости  $\rho$

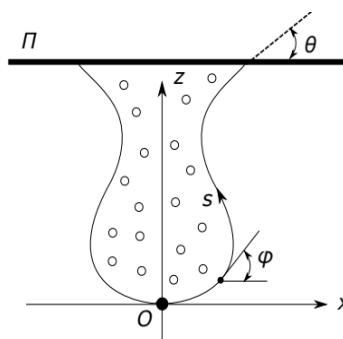


Рис. 3. Профиль осесимметричной свисающей капли

На данной схеме приняты следующие величины:  $s$  – длина дуги профиля капли, отсчитываемая от начала координат,  $\varphi$  – угол между положительным направлением касательной к профилю и положительным направлением оси  $x$ ,  $\theta$  – контактный угол смачивания.

С учетом принятых обозначений, уравнение Лапласа для висящей капли запишется в виде:

$$\frac{d^2z/dx^2}{\left[1+(dz/dx)^2\right]^{3/2}} + \frac{dz/dx}{x\left[1+(dz/dx)^2\right]^{1/2}} = \lambda - \beta z \quad (9)$$

Если от переменных  $x$  и  $z$  перейти к параметризации по величине  $\varphi$ , то в результате получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dz}{d\varphi} = \frac{x \sin \varphi}{\lambda x - \beta z x - \sin \varphi}, \\ \frac{dx}{d\varphi} = \frac{x \cos \varphi}{\lambda x - \beta z x - \sin \varphi}, \\ \frac{dv}{d\varphi} = \frac{\pi x^3 \sin \varphi}{\lambda x - \beta z x - \sin \varphi}, \\ \frac{da}{d\varphi} = \frac{2\pi x^2 \sin \varphi}{\lambda x - \beta z x - \sin \varphi}. \end{cases} \quad (10)$$

Математическое описание основных процессов, происходящих с каплей во время ее отрыва от каплеобразователя при высокоточном измерении расхода жидкости, а также расчеты основных параметров процесса каплеобразования в аналитическом виде позволяют использовать данные результаты при автоматическом регулировании процесса работы высокоточного расходомера. Рассмотренная модель двумерной висящей капли и полученная система уравнений являются основой математической модели, описывающей работу устройства для высокоточного регулирования расхода жидкостных компонентов. Данное устройство может использоваться в химической, нефтехимической, лакокрасочной промышленности, клинико-диагностических и других научно-исследовательских лабораториях, в области 3D-печати и других сферах деятельности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2490602 Российская Федерация, МПК G01F13/00. Автоматический дозатор жидкостей В. В. Непримерова / В. В. Непримеров ; заявитель и патентообладатель В. В. Непримеров. – № 2011137929/28 ; заявл. 14.09.11 ; опубл. 20.08.13, Бюл. № 23.
2. П. м. 136564 Российская Федерация, МПК G01F3/00. Датчик малых расходов жидкости / В. П. Заярный, И. В. Волков, А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2013135341 ; заявл. 26.07.13; опубл. 10.01.14, Бюл № 1 (IVч.).
3. Разработка и исследование автоматического устройства для высокоточного регулирования расхода жидкостных компонентов / А. С. Панюлайтис, Г. Н. Овчинников, И. В. Волков, Е. В. Стегачев // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (262) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2022. – С. 65–69.
4. Точные решения задачи о форме двумерной висящей капли и их свойства / А. А. Сокуров // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2020. – № 4. – С. 99–111.