

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ НА ПОДЛОЖКЕ**

*Андрей Владимирович Кокорин*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1, аспирант, тел. +7 (952) 927-05-89, e-mail: mail@andreykokorin.ru

*Александр Дмитриевич Назаров*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. +7 (913) 721-91-64, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

*Анатолий Федорович Серов*

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1, доктор технических наук, главный научный сотрудник, тел. +7 (913) 904-10-38, e-mail: serov@itp.nsc.ru

Измерительное оборудование представляет аппаратно-программный комплекс, состоящий из емкостного измерителя толщины лежащей капли, цифрового микроскопа и координатного устройства. Оборудование позволяет «сканировать» каплю и получать изменяющиеся при испарении данные высоты, формы капли и линии контакта жидкой фазы с поверхностью.

**Ключевые слова:** испарение лежащей капли, емкостный метод, экспериментальное оборудование

## **MEASURING COMPLEX FOR STUDYING EVAPORATION OF LIQUID DROPS ON A SUBSTRATE**

*Andrey V. Kokorin*

Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, 1, Akademik Lavrentyev Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russia, Ph.D. Student, phone: +7 (952) 927-05-89, e-mail: mail@andreykokorin.ru

*Alexander D. Nazarov*

Kutateladze Institute of Thermophysics of the SB RAS, 1, Akademik Lavrentyev Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russia, Grand PhD in Engineering sciences, Leading Researcher, phone: +7 (913) 721-91-64, e-mail: nazarov@itp.nsc.ru

*Anatoly F. Serov*

Kutateladze Institute of Thermophysics of the SB RAS, 1, Akademik Lavrentyev Prospekt, Novosibirsk, 630090, Russia, Grand PhD in Engineering sciences, Chief Researcher, phone: +7 (913) 904-10-38, e-mail: serov@itp.nsc.ru

The measuring equipment is a hardware-software complex consisting of a capacitive measuring device for the thickness of a lying drop, a digital microscope and a coordinate device. The equipment makes it possible to “scan” the drop and obtain the data of the height, drop shape, and the line of contact of the liquid phase with the surface that change during evaporation.

**Keywords:** evaporation of a sessile droplet, capacitive method, experimental equipment

## *Введение*

Изучение испарения капель на подложке продолжает вызывать повышенный интерес в последние годы из-за важной роли этого процесса, например, в составлении карт ДНК канцитов [1], технологии печати и нанесения покрытий [2, 3, 4], медицине [5].

Эксперимент продолжает оставаться одним из основных методов исследования процесса испарения капель. Особенно это касается изучения испарения капель сложного состава, к которым относятся смеси жидкостей и наножидкость. В настоящее время в экспериментах в основном реализуются оптические методы измерения с применением фото-, видео-, термографической аппаратуры [6, 7], методов с применением лазеров [8]. Исследователи используют весовой метод [9], или регистрируют параметры испаряющейся капли по изменению резонансных свойств пьезоэлемента [10]. Вышеперечисленные основные методы исследования имеют существенный недостаток, связанный с трудоемкостью обработки первичных данных.

От этого недостатка, в какой-то мере, свободны электрические методы измерения, под которыми понимается регистрация электрического сигнала, зависящего от физического параметра исследуемого объекта. В литературе практически не встречается экспериментальных исследований с использованием электрических методов. Непопулярность применения электрических методов объясняется тем, что эти методы часто требуют контакта зонда первичного датчика с объектом. Это недопустимо в случае исследования испарения капли жидкости, т. к. это может изменить форму, линию контакта лежащей капли и, самое главное, изменить тепло- и массообмен капли.

В настоящей работе приводится описание разработанного оборудования по исследованию испаряющейся капли на поверхности, в основе которого лежит комплексный подход совместного использования емкостного и оптического методов регистрации основных параметров испаряющейся капли, таких ее высота, форма и линия контакта жидкости с поверхностью. Емкостный метод позволяет использовать первичный датчик с зондом, не контактирующий с каплей жидкости. Таким образом, емкостный метод свободен от недостатка большинства электрических методов, но обладает их достоинством, которое заключается в возможности регистрации цифрового сигнала компьютером, что позволяет оперативно обработать данные и получить результат.

### *Принцип измерения и оборудование*

Электрический метод основан на емкостном методе измерения толщины пленки жидкости (в нашем случае пленка жидкости имеет вид капли). Первичный преобразователь измерителя представляет собой датчик с емкостным зондом, установленным на подвижной головке координатного устройства (КУ). Зонд емкостного измерителя направлен к поверхности с лежащей каплей. Регулирование высоты емкостного зонда относительно поверхности с каплей осу-

ществляется специальным микровинтом. Координатное устройство имеет возможность передвигать емкостный зонд над каплей по различным «маршрутам». При сканировании капли во времени в компьютер в цифровом виде передается информация об изменении высоты капли.

Структурная схема емкостного измерителя высоты капли состоит из первичного и вторичного измерительных преобразователей, компьютера с программным обеспечением и координатного стола (рис. 1).

Первичный измерительный преобразователь представляет собой генератор прямоугольных импульсов на базе микросхемы XR2206 [11]. В качестве внешнего конденсатора, определяющего частоту работы генератора, используется емкостный зонд  $C_f$ . Выходным сигналом первичного преобразователя является частота импульсов, которая обратно пропорциональна значению емкости зонда:

$$F = \frac{1}{RC_f} [6].$$

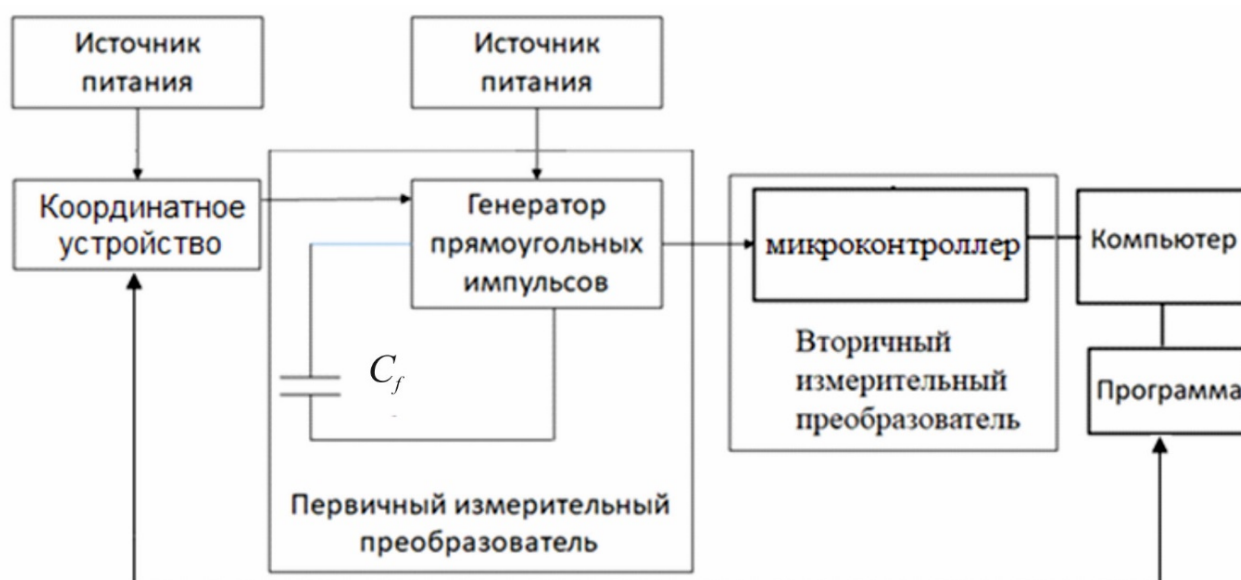


Рис. 1. Структурная схема емкостного измерителя высоты капли

Вторичный преобразователь (рис. 1) представляет собой микроконтроллер STM32F411RET6, выполняющий функцию частотомера, преобразователя измеренного значения частоты в цифровой код и передачу его в компьютер.

Координатное устройство способно передвигать подвижную головку с установленным на нем первичным преобразователем по ортогональным координатам  $X$  и  $Y$  с шагом 2 мкм. Механизм координатного устройства приводится в движение шаговыми двигателями ШД4. Управление двигателями осуществляется программой компьютера.

Визуализация испаряющейся капли реализована с помощью цифрового микроскопа, установленного неподвижно на рабочем столе координатного

устройства. Микроскоп позволяет передавать в компьютер цифровой образ профиля капли, полученный сбоку относительно поверхности подложки.

### Емкостный зонд

Зонд с емкостью  $C_f$  представляет собой цилиндрическую коаксиальную конструкцию. Геометрические размеры зонда, используемого для исследования испарения лежащей капли, показаны на рис. 2, а. Центральная обкладка зонда – металлический цилиндр в изоляции, установленный внутри медной трубки по ее оси.

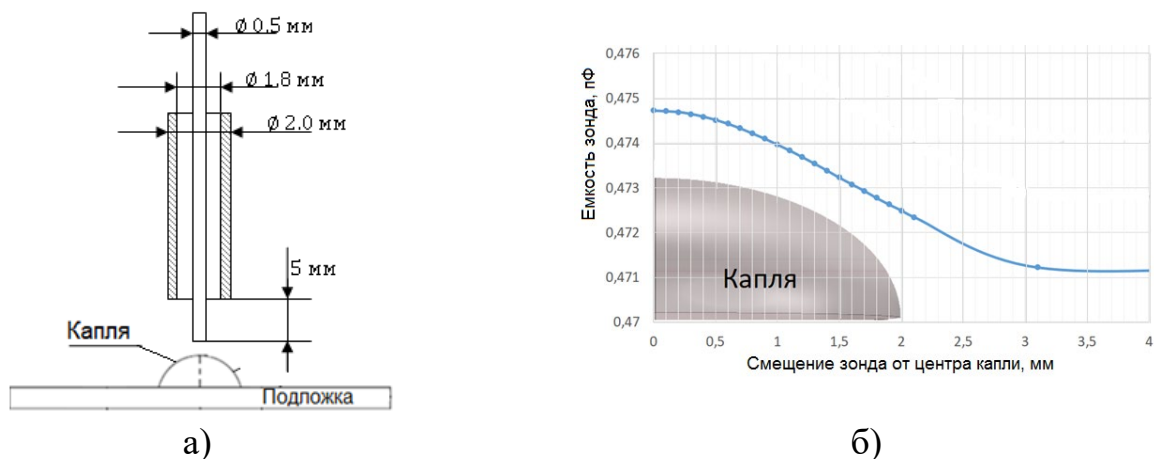


Рис. 2. Геометрические размеры зонда и его расположение над каплей (а), моделирование изменения емкости зонда от высоты профиля капли (б)

Когда зонд находится над каплей, емкость  $C_f$  изменяется в зависимости от толщины слоя жидкости (высоты капли), как это показано на рис. 2, б по результатам моделирования. Моделирование изменения емкости зонда в системе емкостный зонд – капля – подложка проведено САПР Comsol Multiphysics [12]. Моделировался зонд, представленный на рис. 2, а. Между центральной и внешней обкладками был помещен изолятор диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = 2,1$  (фторопласт). Модель капли представляла каплю дистиллированной воды с  $\varepsilon = 80$ , высотой 1,5 мм, контактная линия жидкости с поверхностью в виде круга диаметром 4 мм. Окружающая среда – воздух с диэлектрической проницаемостью 1. Для наглядности на графике изображена капля. Емкостной зонд перемещался от центра капли к ее периферии. По мере перемещения зонда емкость системы уменьшается. Пройдя границу капли, емкость продолжила изменяться и только на некотором расстоянии от капли асимптотически приблизилась к постоянной величине. Это происходит из-за влияния внешнего электрического поля, у которого распределение векторов напряженности пространственно имеет больший диаметр, чем реальный диаметр центрального электрода. По мере удаления зонда от границы капля уже не оказывает влияние на емкость.

## Анализ погрешностей

Одним из источников неопределенности при определении значения емкости зонда, а следовательно и высоты капли, является величина диэлектрической проницаемости жидкости, т.к. в исследованиях испарения капель применяются смеси жидкостей, в том числе и наножидкости, с неизвестной диэлектрической проницаемостью. Поэтому достоверные значения о высоте капли емкостный метод может дать только при наличии калибровочной зависимости изменения емкости зонда от высоты капли конкретной жидкости  $C = f(h)$ . Использование в измерительном комплексе цифрового микроскопа позволяет реализовать процедуру калибровки емкостного измерителя, не прибегая к использованию дополнительного оборудования. Получение калибровочной зависимости осуществляется на начальном этапе измерений, путем одновременной регистрации высоты капли визуальным и емкостным методами.

Основной частью емкостной измерительной системы является генератор частоты. Как и любое подобно устройство, данный генератор имеет временную и температурную нестабильности. За короткий промежуток времени они приводят к изменению генерируемой частоты на очень малое значение, однако, за достаточно большой интервал времени и при изменении температуры окружающей среды эти нестабильности могут привести к изменениям частоты на величину, превышающую полезное изменение сигнала. Так, микросхема XR2206, на которой сконструирован измерительный генератор, при изменении температуры окружающей среды от 25 °С до 50 °С может изменить частоту выходного сигнала на 0,1 %. При частоте генерации около 400 кГц изменение составит 400 Гц.

Для устранения временной и температурной нестабильностей предложен относительный метод измерения частоты. Метод заключается в том, что измерение высоты капли в данной точке (например, в центре капли) осуществляется за два этапа: 1) регистрация частоты ( $F_{\Pi}$ ) генератора, когда зонд находится за границей капли и 2) когда зонд находится над каплей ( $F_{\kappa}$ ). За полезную величину принимается изменение частоты генератора  $\Delta F$  при этих двух положениях зонда  $\Delta F = F_{\Pi} - F_{\kappa}$ . Координатное устройство способно передвинуть емкостный зонд из одного положение в другое за 1 – 2 секунды. За данный временной промежуток и временная, и температурная нестабильности генератора не приводит к сколько-нибудь значительной погрешности измерений.

Неопределенность емкостной измерительной системы больше определяется моментальной нестабильностью генератора и неопределенностью измерения частоты частотомером. Относительная неопределенность, зависящая от моментальной нестабильности генератора и от работы частотомера, была определена прямыми измерениями и составила 0,001 %. Данный вид погрешности входит в общую ошибку измерения четыре раза: два раза при регистрации частоты  $F_{\Pi}$ , и  $F_{\kappa}$  во время рабочих измерений и два раза при регистрации этих же значений при получении калибровочной зависимости. Источниками погрешностей также являются: неточность установки измерительной части зонда относительно по-

верхности подложки и погрешность кусочно-линейной аппроксимации калибровочной кривой  $\Delta F = f(h)$ .

Установка измерительной части зонда относительно поверхности подложки осуществляется специальным щупом, либо с помощью цифрового микроскопа. Оба способа имеют свою погрешность и зависят от человеческого фактора, влияние которого может превышать влияние объективных погрешностей. Для оценки общей погрешности за неопределенность установки зонда принята погрешность видео измерений, равная 2 %.

Погрешность кусочно-линейной аппроксимации зависит от количества значений в таблице соответствия. На практике погрешность аппроксимации величина непостоянная. Для расчета общей погрешности высоты капли – величина данной ошибки принята равной 3 %.

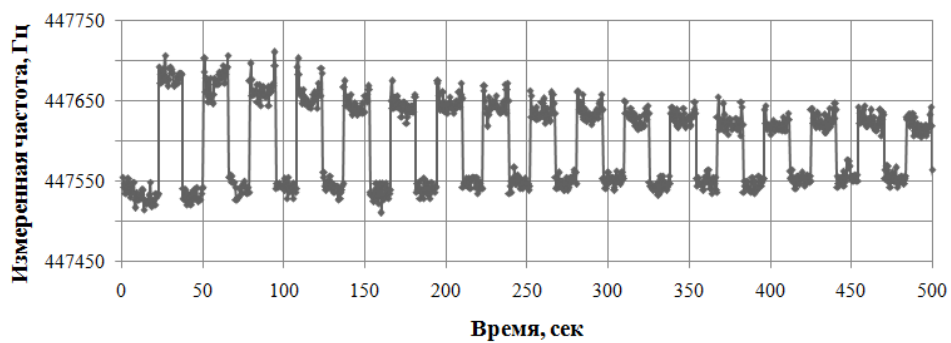
Оценка общей неопределенности измерение высоты капли емкостным оборудованием, выполненная по методике [13], составляет 4 %.

### **Результаты**

На рис. 3 приведены показания измерительного комплекса в процессе испарения капли воды на металлической подложке. На рис. 3, а демонстрируется фрагмент диаграммы изменения частоты емкостного измерителя при испарении капли в интервале времени от 0 с до 500 с. Координатным устройством первичный преобразователь с емкостным зондом перемещался от положения над центром капли (рис. 3, б, в) к положению за пределами капли. Период передвижения составлял 30 с. В результате аппаратура регистрировала изменение частоты во времени в виде прямоугольных импульсов. Вершина импульса соответствует положению зонда вне капли (частота  $F_{\text{п}}$ ), временной интервал между импульсами – над каплей ( $F_{\text{к}}$ ). Из рис. 3, а видно, что по мере испарения капли, разность  $\Delta F = F_{\text{п}} - F_{\text{к}}$  уменьшается, что соответствует уменьшению высоты капли. На рис. 3, б и 3, в показаны фотографии капли в начале измерений и после 500 с испарения. Высота капли за этот интервал времени уменьшилась на 30 % от начального значения  $d_0 = 1,12$  мм до текущего  $d = 0,78$  мм.

На рис. 4 представлена калибровочная зависимость  $\Delta F = f(d)$ , где  $d$  – высота капли воды от основания до вершины. Зависимость получена при высоте установки емкостного зонда над поверхностью  $H = 1,28$  мм. Для получения калибровочной зависимости синхронно проводились фотографирование капли цифровым микроскопом и измерения емкостным методом.

Используя калибровочную зависимость, по данным емкостного измерения, получено изменение высоты капли воды во времени до полного испарения (рис. 5, а) и восстановленная форма капли в начальный момент испарения (рис. 5, б). Для графика на рис. 5, б ось абсцисс – это отношение высоты в центре капли  $d_0$  в начальный момент времени к текущему значению высоты слоя жидкости  $d$  при смещении зонда от центра к периферии капли (ось ординат).



а)

0 сек



б)

500сек



в)

Рис. 3. Фрагмент диаграммы изменения частоты при регистрации испаряющейся капли в интервале от 0 с до 500 с (а). Фотографии капли воды в начале измерений (б) и после 500 с испарения (в)

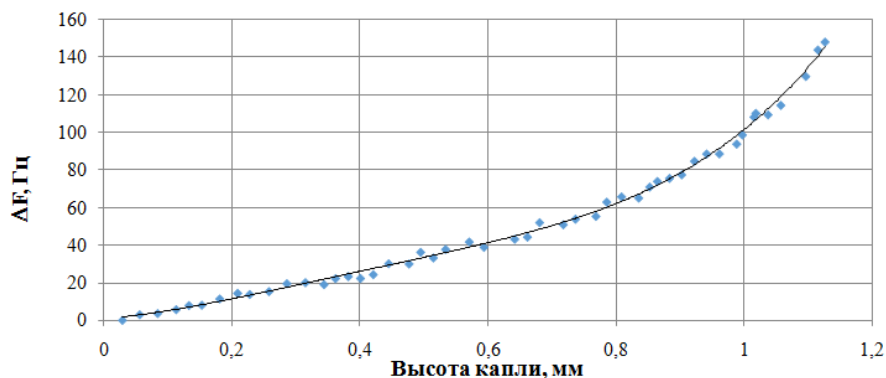
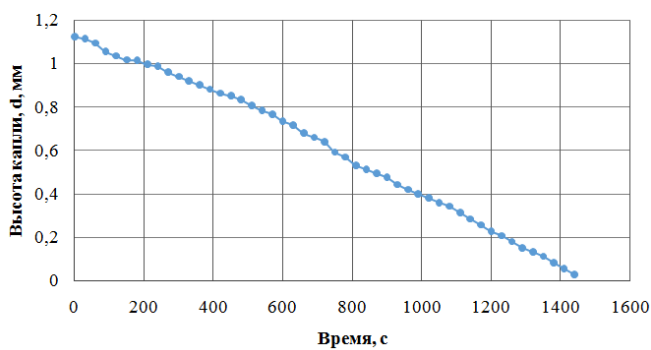
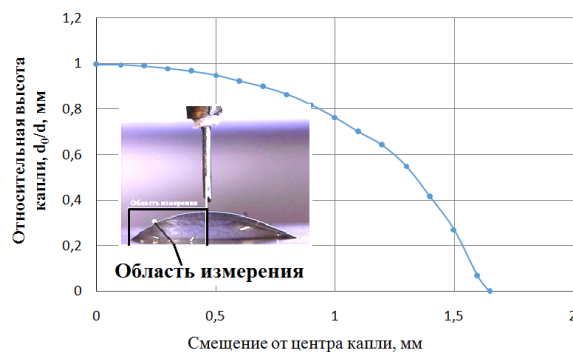


Рис. 4. Калибровочная зависимость для расчета высоты капли воды



а)



б)

Рис. 5. Динамика испарения капли воды (а) и восстановленная форма капли (б)

Обзор публикаций, посвященных испарению капель на поверхности, показал, что испарение капель чистых жидкостей, к которым относится и вода, характеризуется линейной зависимостью высоты капли от времени [6-8]. Результат, полученный с помощью разработанного измерительного комплекса, соответствует данным других авторов.

### *Заключение*

Измерительный комплекс для исследования испарения капель жидкости на поверхности на основе бесконтактных методов позволяет проводить измерения высоты капли жидкости цифровым методом и одновременно получать визуальные изображения объекта наблюдения.

Применение цифрового емкостного метода дает возможность существенно сократить время обработки первичных экспериментальных данных, в отличие от оптических методов, которые преимущественно используются в настоящее время для исследования испарения капель.

Комплекс позволяет исследовать испарение капель жидкостей любого состава, сидящих как на проводящих, так и на непроводящих подложках.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jing J. et al. Automated high resolution optical mapping using arrayed, fluid fixed DNA molecules // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 1998. – Т. 95. – № 14. – С. 8046–8051.
2. Kim D. et al. Direct writing of silver conductive patterns: Improvement of film morphology and conductance by controlling solvent compositions // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Т. 89. – № 26. – С. 264101.
3. Boneberg J. et al. The formation of nano-dot and nano-ring structures in colloidal monolayer lithography // *Langmuir*. – 1997. – Т. 13. – № 26. – С. 7080–7084.
4. Norris D. J. et al. Opaline photonic crystals: how does self-assembly work? // *Advanced Materials*. – 2004. – Т. 16. – № 16. – С. 1393–1399.
5. Sobac B., Brutin D. Structural and evaporative evolutions in desiccating sessile drops of blood // *Physical Review E*. – 2011. – Т. 84. – № 1. – С. 011603.
6. Girard F., Antoni M., Sefiane K. On the effect of Marangoni flow on evaporation rates of heated water drops // *Langmuir*. – 2008. – Т. 24. – № 17. – С. 9207–9210.
7. Кузнецов Г. В., Феоктистов Д. В., Орлова Е. Г. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2016. – Т. 23. – № 1. – С. 17.
8. Ушаков В. Л. и др. Немонотонный характер испарения лежащей капли // *Наука ЮУрГУ. Секции естественных наук: материалы 66-й науч. конф. / отв. за вып. С. Д. Ваулин; Юж.-Урал. гос. ун-т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 401с. – Издательский центр ЮУрГУ, 2014.*
9. Misyura S. Y. Evaporation of a sessile water drop and a drop of aqueous salt solution // *Scientific Reports*. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 1–11.
10. Prasad A. et al. Monitoring sessile droplet evaporation on a micromechanical device // *Analyst*. – 2014. – Т. 139. – № 21. – С. 5538–5546.
11. <https://cloud.mail.ru/public/Y8L3/CyLDEz82f>.
12. <https://www.comsol.ru>.
13. Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – Ленинград: Энергтоиздат, ленинградское отделение, 1985. – 247 с.

© А. В. Кокорин, А. Д. Назаров, А. Ф. Серов, 2021