

УДК 536.423

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДНО-СПИРТОВЫХ РАСТВОРОВ

© 2019 г. В. Ю. Бородулин¹, В. Н. Летушко¹, М. И. Низовцев¹, А. Н. Стерлягов¹. *

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
ул. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: sterlyagov@itp.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.11.2018 г.

После доработки 10.12.2018 г.

Принята к публикации 19.12.2018 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований испарения капель водно-спиртовых растворов различной концентрации, подвешенных на нити и лежащих на плоской поверхности. С использованием скоростной микрофотосъемки исследована динамика изменения геометрических параметров испаряющихся капель водно-спиртовых растворов. С помощью метода инфракрасной термографии экспериментально подтверждено наличие трех стадий изменения температуры поверхности испаряющихся капель: начальное резкое падение температуры, стадия постоянной температуры и плавное ее повышение до температуры окружающего воздуха. В результате экспериментов установлено, что концентрация раствора оказывала существенное влияние на процесс испарения капель. Чем выше была концентрация этанола, тем больше характер изменения температуры поверхности и геометрических параметров капли был подобен изменению аналогичных параметров капли спирта.

DOI: 10.1134/S0023291219030042

ВВЕДЕНИЕ

Испарение капель водно-спиртовых растворов представляет научный интерес и имеет широкое практическое применение. При этом большинство экспериментальных работ в этой области посвящено испарению капель, лежащих на подложках. В настоящее время тщательно исследовано влияние концентрации раствора [1–7], внешних условий [8–10], а также теплопроводности подложки [11–14] на изменение объема, краевого угла и диаметра контактного пятна испаряющихся капель. В [11, 12] в экспериментах измеряли температуру капель с помощью термопары и регистрировали понижение температуры испаряющихся капель по сравнению с температурой окружающего воздуха. Однако точно определить температуру капли термопарой сложно, так как при контактных измерениях на испарение капли существенное влияние оказывает подвод тепла через термопару [15].

В ряде работ [16–20] с помощью бесконтактного метода инфракрасной термографии показана неравномерность температуры поверхности испаряющихся капель водно-спиртовых растворов. При использовании инфракрасной термографии необходимо учитывать особенности радиационных свойств различных жидкостей [21, 22].

В работе [23] теоретически и экспериментально показано наличие трех стадий изменения температуры свободных испаряющихся капель воды. В [24] расчетно-экспериментальным методом на основе анализа изменения геометрических параметров испаряющейся лежащей капли воды определена разница между температурами капли и подложки в предположении диффузионного механизма испарения.

Проведенный анализ исследований испарения капель водно-спиртовых растворов показал, что основное внимание в экспериментах уделялось изменению геометрических параметров. При этом недостаточно изученной оставалась динамика изменения температуры испаряющихся капель с течением времени.

Цель данной работы заключалась в комплексном экспериментальном исследовании изменения геометрических параметров и температуры поверхности испаряющихся капель водно-спиртовых растворов с использованием современных бесконтактных методов измерения.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В экспериментах исследовалось испарение капель водно-спиртовых растворов с массовой концентрацией этанола (%) 0 (вода), 25, 50, 75, 92 при

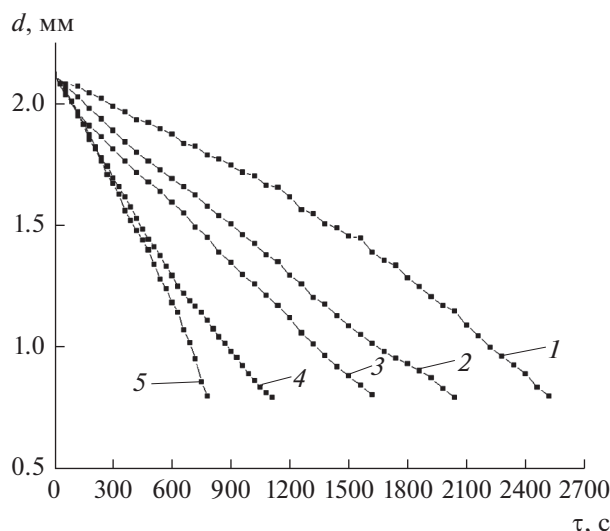


Рис. 1. Изменение со временем диаметра подвешенных капель водно-спиртовых растворов с разной концентрацией этанола: 1 – 0 (вода), 2 – 25, 3 – 50, 4 – 75, 5 – 92 мас. %.

постоянной температуре, $T = 24^\circ\text{C}$, и относительной влажности воздуха $\varphi = 24\%$. Капли объемом 5 мкл формировались одноканальным дозатором. Для уменьшения и оценки случайных ошибок каждый эксперимент выполнялся несколько раз.

В работе рассматривались два характерных случая испарения капель. В первой серии экспериментов изучалось испарение капель, подвешенных на нити из полипропилена диаметром 200 мкм. Полипропилен имеет сравнительно низкий коэффициент теплопроводности $\lambda = 0.19 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. В результате такая постановка эксперимента позволила минимизировать влияние нити и получить хорошее приближение к условиям испарения свободных капель. Во второй серии экспериментов анализировалось испарение капель водно-спиртовых растворов, лежащих на поверхности твердой подложки; условия проведения этих экспериментов приведены в работе [25]. В качестве подложки использовалась пластина из тефлона ($\lambda = 0.25 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$) толщиной 3 мм.

Исследования испарения капель проводились на специальном экспериментальном стенде [23]. В вертикальном положении над испаряющейся каплей располагалась тепловизионная камера. Сбоку в горизонтальном положении находился цифровой микроскоп. Скоростная фотосъемка профиля капли с помощью цифрового микроскопа позволила регистрировать изменения ее формы в процессе испарения. Использование тепловизионной камеры NEC TH 7102WV с микрообъективом TH 71-377 сделало возможной бесконтактную регистрацию распределения температуры на

поверхности капли с точностью 0.1°C и высоким пространственным разрешением.

При определении температуры поверхности капли с помощью инфракрасной термографии коэффициент излучения воды был принят $\epsilon = 0.96$ [26]. Для определения коэффициента излучения этанола была выполнена серия опытов по калибровке измерений с помощью хромель-алюмелевой микротермопары с диаметром королька 50 мкм, что обеспечивало относительно малый подвод тепла к капле. На основании выполненных измерений значение коэффициента излучения для спирта получено равным 0.92, что соответствует данным других авторов [27] для капель спирта исследуемого размера.

2. ИСПАРЕНИЕ ПОДВЕШЕННЫХ КАПЕЛЬ

2.1. Изменение геометрических параметров подвешенных капель

Микрофотографии процесса испарения капель водно-спиртовых растворов, подвешенных на нити из полипропилена, показывают, что в течение основного времени испарения капли имели сферическую форму. На рис. 1 представлены полученные после обработки микрофотографий данные по изменению диаметра подвешенных капель водно-спиртовых растворов. Они свидетельствуют о том, что диаметр капли спирта в процессе испарения уменьшался существенно быстрее, чем диаметр капли воды. Для капель с различной концентрацией этанола наблюдалась промежуточная ситуация. Чем больше была концентрация этанола в капле раствора, тем быстрее уменьшался ее диаметр.

Размер капли, при котором сила поверхностного натяжения соизмерима с силой тяжести, характеризуется капиллярной постоянной жидкости, а число Бонда $Bo \sim 1$ [28]. Если диаметр исследуемых капель не превышает значение капиллярной постоянной, или $Bo \ll 1$, их форму можно считать сферической.

Данные, представленные на рис. 2, показывают, что квадрат относительного (безразмерного) диаметра капель, $(d/d_0)^2$, где d_0 – начальный диаметр капли, для капель воды и этилового спирта линейно уменьшается со временем испарения τ . Для капель водно-спиртовых растворов наблюдалась промежуточная ситуация между каплями спирта и воды. Чем больше была концентрация этанола в капле, тем характер изменения параметра $(d/d_0)^2$ во времени был ближе к его изменению для капли спирта, особенно, на начальном этапе испарения. При этом зависимость квадрата безразмерного диаметра от времени испарения для водно-спиртовых капель была нелинейной. Таким образом, можно сделать вывод, что закон о линейной зависимости площади поверхности

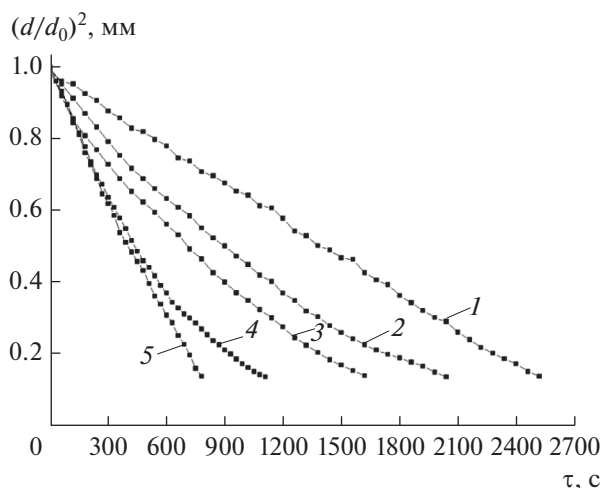


Рис. 2. Изменение со временем квадрата относительного диаметра подвешенных капель водно-спиртовых растворов с разной концентрацией этанола: 1 – 0 (вода), 2 – 25, 3 – 50, 4 – 75, 5 – 92 мас. %.

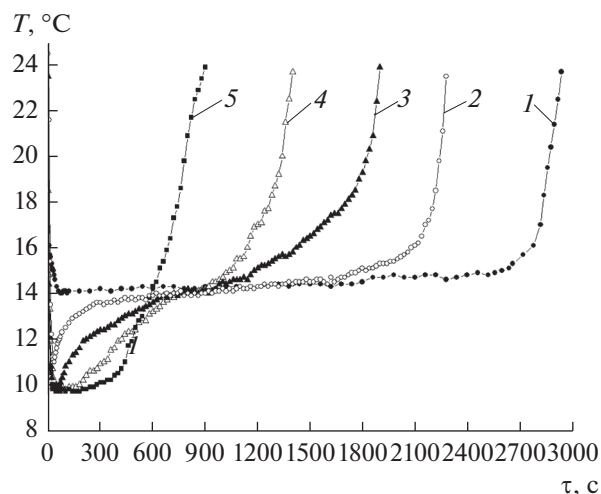


Рис. 3. Изменение со временем температуры поверхности подвешенных капель водно-спиртовых растворов с разной концентрацией этанола: 1 – 0 (вода), 2 – 25, 3 – 50, 4 – 75, 5 – 92 мас. %.

свободных капель от времени испарения [29] выполняется только для индивидуальных жидкостей – воды и спирта.

2.2. Изменение температуры поверхности подвешенных капель

Для определения температуры поверхности капель был использован метод инфракрасной термографии. Во время проведения экспериментов с помощью тепловизионной камеры каждые 5 с регистрировали термограмму распределения температуры на поверхности капли. На основании обработки полученных последовательностей термограмм были определены временные зависимости температуры поверхности капель водно-спиртовых растворов, подвешенных на нити из полипропилена (рис. 3).

Для капель воды на начальном этапе испарения имело место резкое понижение температуры поверхности до 14.0°C. В дальнейшем температура капли практически не изменялась в течение 2700 с, а затем наблюдалось резкое ее повышение до температуры окружающего воздуха. Для капель спирта в начальный период также наблюдалось резкое понижение температуры поверхности до 9.5°C, затем наблюдалась стадия неизменной температуры длительностью около 460 с, после которой следовал резкий ее рост до температуры окружающего воздуха на завершающем этапе испарения. Видно, что в одинаковых условиях испарения минимальная температура поверхности капли воды составляла 14°C, а капли спирта – 9.5°C. Разница между минимальными значениями температуры поверхности испаряющихся капель воды и спирта объясняется более высокой

скоростью испарения этанола по сравнению с водой [6].

Для условий проведения экспериментов температура адиабатного испарения воды составляла 13.4°C, а спирта – 8.2°C. Таким образом, полученные в экспериментах данные показывают, что при испарении капель воды и спирта, подвешенных на нити из полипропилена, наименьшие значения температуры капель обеих жидкостей превышали соответствующие температуры адиабатного испарения. Очевидно, это было обусловлено двумя основными факторами, из которых подвод тепла от нити к каплям, являлся менее существенным вследствие малых значений диаметра и теплопроводности нити полипропилена. В данном случае наибольшее влияние оказывал радиационный теплообмен капли с окружающей средой [21, 22].

Из анализа полученных результатов следует, что динамика изменения температуры подвешенных капель водно-спиртовых растворов существенно зависела от концентрации этанола. В характере изменения температуры поверхности для капель с различной концентрацией этанола после резкого падения наблюдались стадии плавного повышения температуры до температуры адиабатного испарения воды и последующего повышения до температуры окружающего воздуха. Чем выше была концентрация этанола в капле, тем больше изменение температуры поверхности капли было подобно изменению температуры поверхности капли спирта. На начальном этапе испарения температура капли изменялась аналогично температуре капли спирта, а затем характер изменения температуры капли раствора был подобен изменению температуры капли воды. Оче-

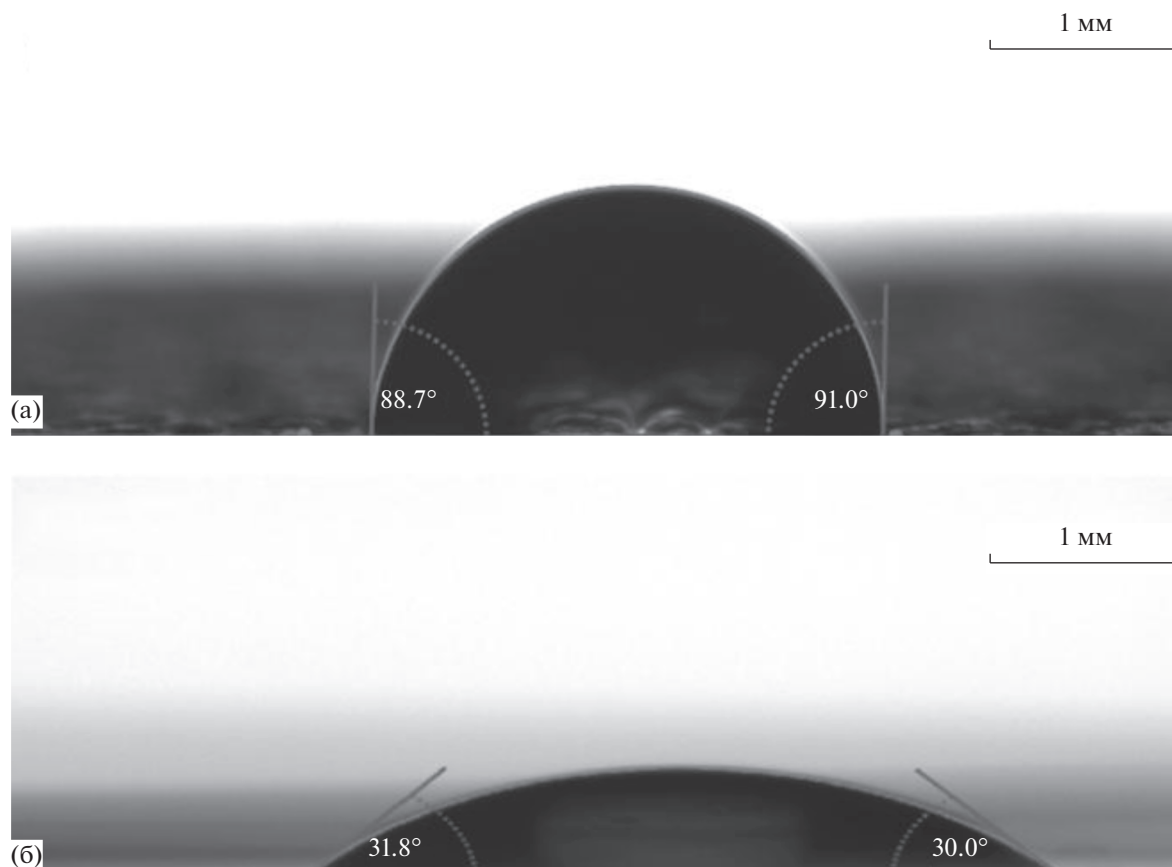


Рис. 4. Микрофотографии каплей воды (а) и спирта (б), лежащих на пластине из тефлона, в начальный момент испарения.

видно, это объясняется тем, что на начальном этапе преимущественно испарялся этанол, как более летучий компонент [6, 9, 10].

3. ИСПАРЕНИЕ ЛЕЖАЩИХ КАПЕЛЬ

3.1. Изменение геометрических параметров лежащих каплей

На рис. 4 представлены микрофотографии каплей воды и спирта, лежащих на поверхности пластины из тефлона, в начальный момент испарения. Краевой угол и диаметр контактного пятна были получены после обработки фотографий с помощью программного обеспечения Drop Shape Analysis. Начальные значения краевого угла и диаметра контактного пятна соответствуют моменту начала контакта капли заданного объема с подложкой. Для каплей спирта краевой угол составлял 30° – 31.8° , для воды – 88.7° – 91° . Представленные микрофотографии показывают, что форма каплей воды и спирта, лежащих на пластине из тефлона, существенно различалась. Вследствие лучшей смачиваемости капля спирта растекалась на тефлоновой пластине сильнее, чем капля воды. В результате при одинаковом объеме

капель площадь контакта и площадь поверхности испарения у капли спирта была больше, чем у капли воды.

На рис. 5 представлены результаты экспериментального определения с использованием цифрового микроскопа изменений во времени диаметра пятна контакта d_1 испаряющихся водно-спиртовых каплей, лежащих на тефлоновой пластине.

Полученные результаты показывают, что для капли воды диаметр контактного пятна на начальном этапе испарения практически не изменялся, реализовался режим “пиннинга”. При испарении капли спирта диаметр контактного пятна непрерывно изменялся, т.е. реализовался режим испарения, при котором происходило движение контактной линии к центру капли до ее полного испарения. Для каплей с различной концентрацией этанола наблюдалась ситуация, промежуточная между описанными выше. Чем больше была концентрация этанола в капле, тем меньше было время ее испарения, и тем больше характер изменения диаметра контактного пятна был подобен его изменению для капли спирта. Полученные результаты по изменению геометри-

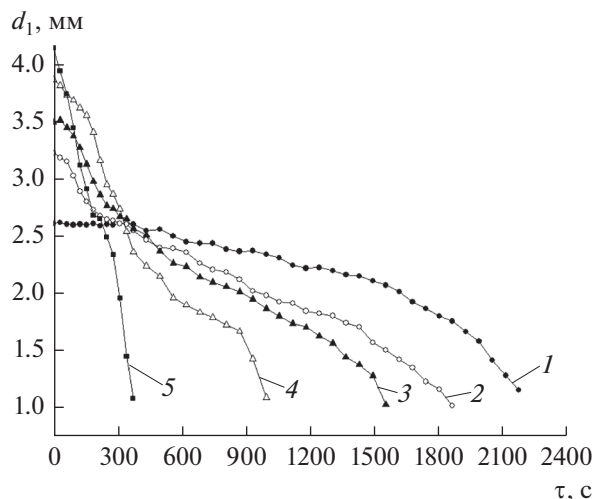


Рис. 5. Изменение со временем диаметра пятна контакта лежащих капель водно-спиртовых растворов с концентрацией этанола: 1 – 0 (вода), 2 – 25, 3 – 50, 4 – 75, 5 – 92 мас. %.

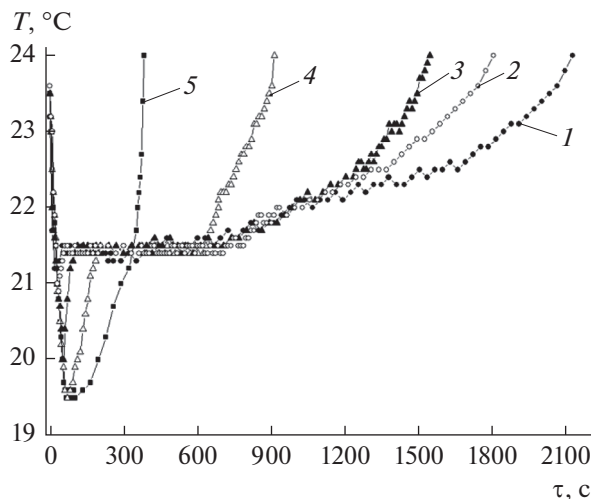


Рис. 6. Изменение со временем температуры поверхности лежащих капель водно-спиртовых растворов с разной концентрацией этанола: 1 – 0 (вода), 2 – 25, 3 – 50, 4 – 75, 5 – 92 мас. %.

ческих параметров капель согласуются с данными других исследователей для испарения лежащих капель водно-спиртовых растворов [2, 3].

3.2. Изменение температуры поверхности лежащих капель

На основании обработки полученных в экспериментах последовательностей термограмм были определены зависимости температуры поверхности водно-спиртовых капель, лежащих на поверхности тефлоновой пластины, от времени испарения (рис. 6).

Для капли воды на начальном этапе испарения наблюдалось резкое понижение температуры поверхности до 21.5°C. В дальнейшем температура капли практически не изменялась в течение 700 с, а затем плавно повышалась до температуры окружающего воздуха. Для капли спирта наблюдалось резкое понижение температуры в начальный период испарения до 19.5°C, т.е. до более низкой температуры по сравнению с температурой испаряющейся капли воды. Затем наблюдались стадии неизменной температуры длительностью около 60 с и последующего резкого ее роста до температуры окружающего воздуха на завершающем этапе испарения.

Из анализа полученных данных следует, что динамика изменения температуры испаряющихся лежащих капель водно-спиртового раствора существенно зависела от концентрации этанола. По аналогии с испарением подвешенных капель в характере изменения температуры поверхности для всех испаряющихся капель можно условно выделить три стадии: начальный участок резкого

уменьшения температуры, стадию постоянной температуры, и стадию ее плавного повышения до температуры окружающего воздуха. Однако в данном случае значения температуры для капель водно-спиртовых растворов были выше, чем для подвешенных капель соответствующей концентрации. Очевидно, это было обусловлено подводом тепла от поверхности пластины, которое, как отмечено в ряде работ, оказывает существенное влияние на испарение капель [11–14].

4. СРАВНЕНИЕ ИСПАРЕНИЯ ПОДВЕШЕННЫХ И ЛЕЖАЩИХ КАПЕЛЬ

Проведем сопоставление температуры поверхности и времени испарения подвешенных и лежащих капель.

На рис. 7 для сравнения приведены изменения с течением времени температуры поверхностей испаряющихся при одинаковых значениях температуры и влажности окружающего воздуха ($T = 24^\circ\text{C}$, $\phi = 24\%$) 5-мкл капель воды (рис. 7а) и спирта (рис. 7б), как подвешенных, так и лежащих на поверхности тефлоновой пластины. Температура поверхности подвешенных капель воды и спирта при испарении понижалась почти до температуры адиабатного испарения. Для капель, лежащих на тефлоновой пластине, снижение температуры поверхности было значительно меньше. При этом лежащие капли испарялись быстрее, чем подвешенные. Отношение времени испарения подвешенных и лежащих капель для воды составило 1.5, а для спирта – 2.4. Таким образом, контакт капель с поверхностью интенсифицировал процесс их испарения.

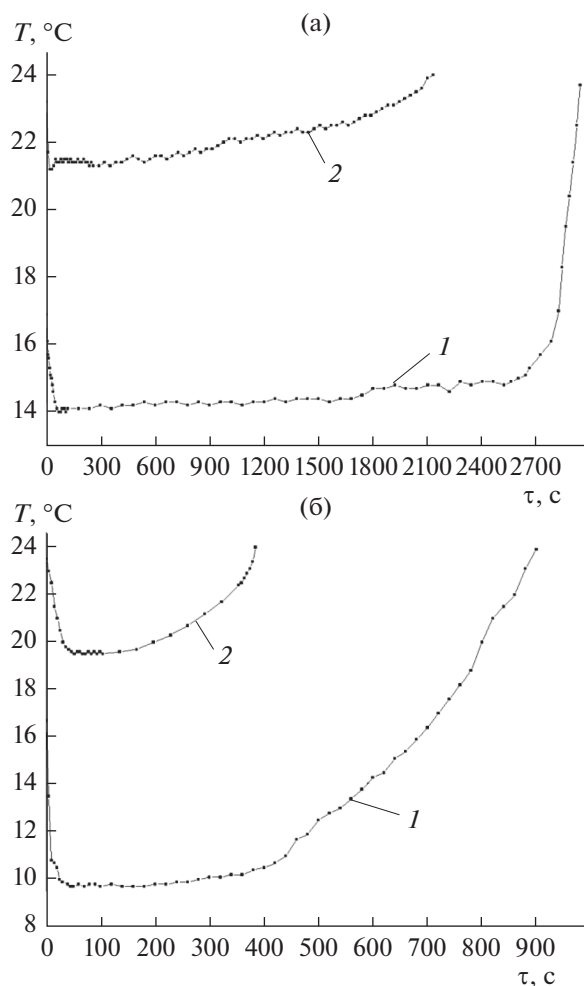


Рис. 7. Изменение со временем температуры поверхности испаряющихся капель воды (а) и спирта (б): 1 – подвешенные капли, 2 – лежащие капли.

На основании экспериментальных данных построены зависимости минимальной температуры поверхности водно-спиртовых капель от концентрации этанола (рис. 8). Данные, представленные на рис. 8, показывают, что чем больше концентрация водно-спиртового раствора, тем ниже минимальная температура поверхности капли в процессе испарения как лежащих, так и подвешенных капель. При этом у подвешенных капель минимальные значения температуры поверхности были ниже, чем у лежащих капель при одинаковых концентрациях этанола.

Экспериментальные результаты процесса испарения капель водно-спиртовых растворов (рис. 9) наглядно показывают, что чем больше концентрация этанола, тем меньше время испарения как лежащих, так и подвешенных капель. При этом подвешенные капли испаряются за более длительное время, чем лежащие, при равной концентрации этанола.

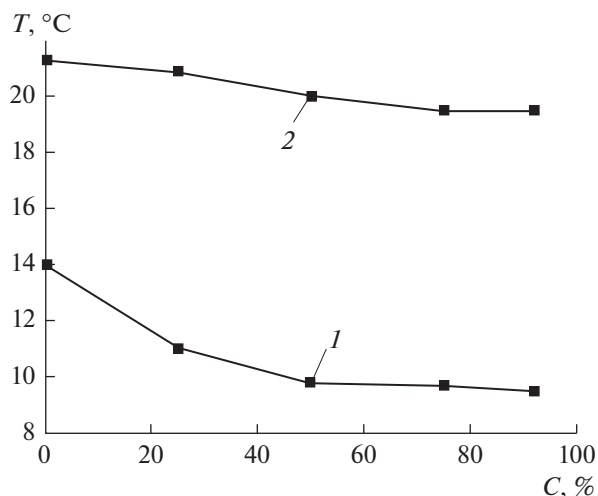


Рис. 8. Минимальная температура испаряющихся капель водно-спиртового раствора в зависимости от концентрации этанола: 1 – подвешенные капли, 2 – лежащие капли.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований получены экспериментальные данные по изменению геометрических параметров и температуры поверхности испаряющихся водно-спиртовых капель с различной концентрацией этанола. Микрофотосъемка показала, что форма испаряющихся капель, подвешенных на нити из полипропилена, в течение основного времени испарения оставалась близкой к сферической. Для капель воды и спирта наблюдались линейные зависимости квадрата безразмерного диаметра от времени испарения. Для водно-спиртовых капель с различной концентрацией этанола эти зависимости были нелинейными.

Полученные с применением инфракрасной термографии результаты позволяют сделать вывод, что динамика изменения средней температуры поверхности подвешенных водно-спиртовых капель зависела от концентрации этанола. При испарении капля воды и спирта после резкого падения температуры их поверхности наблюдалась стадия постоянной температуры, близкой к температуре адиабатного испарения соответствующей жидкости. Для капель с различной концентрацией этанола после резкого падения температуры поверхности наблюдались стадии плавного повышения температуры до температуры адиабатного испарения воды и последующего ее повышения до температуры окружающего воздуха. Чем выше была концентрация этанола в капле, тем больше изменение температуры поверхности капли раствора было похоже на ее изменение для капли спирта.

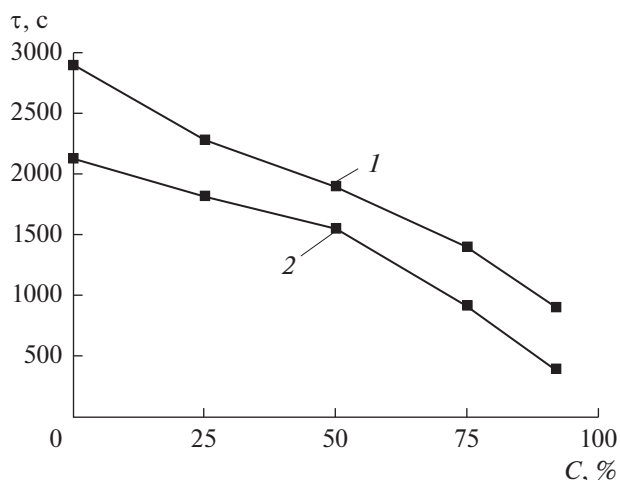


Рис. 9. Время испарения водно-спиртовых капель в зависимости от концентрации этанола: 1 – подвешенные капли, 2 – лежащие капли.

Экспериментальные данные для водно-спиртовых лежащих капель показали, что форма испаряющихся капель существенно зависела от концентрации этанола. Чем выше была концентрация этанола в капле, тем больше была площадь контакта капли с поверхностью тефлоновой пластины и тем быстрее испарялась капля. В характере изменения температуры поверхности лежащих водно-спиртовых капель с различной концентрацией этанола, как и для подвешенных капель, тоже наблюдались три аналогичных стадии в ходе испарения. Однако минимальная температура поверхности лежащих капель водно-спиртовых растворов была выше, чем в случае подвешенных капель растворов соответствующей концентрации. Очевидно, это обусловлено подводом тепла от поверхности пластины к каплям.

Полученные данные также свидетельствуют, что испарение подвешенных водно-спиртовых капель происходило медленнее, чем лежащих, при одинаковых тепловлажностных условиях. С увеличением концентрации этанола время испарения капель уменьшалось как для лежащих, так и для подвешенных капель. При этом время испарения подвешенных капель было больше, чем лежащих, при одинаковой концентрации этанола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chandra S., Di Marzo M., Qiao Y.M., Tartarini P.* // Fire Saf. J. 1996. V. 27. P. 141.
2. *Sefiane K., Tadrist L., Douglas M.* // Int. J. Heat Mass Transf. 2003. V. 46. P. 4527.
3. *Cheng A.K.H., Soolaman D.M., Yu H.Z.* // J. Phys. Chem. B. 2006. V. 110. P. 11267.

4. *Sefiane K., David S., Shanahan M.E.R.* // J. Phys. Chem. B. 2008. V. 112. P. 11317.
5. *Shi L., Shen P., Zhang D., Lin Q., Jiang Q.* // Surf. Interface Anal. 2009. V. 41. P. 951.
6. *Саверченко В.И., Фисенко С.П., Ходыко Ю.А.* // Коллоид. журн. 2015. Т. 77. С. 79.
7. *Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г.* // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. С. 17.
8. *Кучма А.Е., Есипова Н.Е., Михеев А.А., Щёкин А.К., Ицков С.В.* // Коллоид. журн. 2017. Т. 79. С. 747.
9. *Liu C., Bonaccorso E., Butt H.J.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2008. V. 10. P. 7150.
10. *Oztürk T., Erbil H.Y.* // Colloids Surf. A. 2018. V. 553. P. 327.
11. *David S., Sefiane K., Tadrist L.* // Colloids Surf. A. 2007. V. 298. P. 108.
12. *Dunn G.J., Wilson S.K., Duffy B.R., David S., Sefiane K.* // J. Fluid Mechanics. 2009. V. 623. P. 329.
13. *Bazargan V., Stoeber B.* // Phys. Rev. E. 2016. V. 94. 033103.
14. *Borodulin V.Y., Letushko V.N., Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N.* // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 115. 08005.
15. *Han K., Song G., Ma X., Yang B.* // Appl. Thermal Eng. 2016. V. 101. P. 568.
16. *Терехов В.И., Шишкин Н.Е.* // Ползуновский вестник. 2010. № 1. С. 55.
17. *Sefiane K., Moffat J.R., Matar O.K., Craster R.V.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. 074103.
18. *Hamamoto Y., Christy J.R.E., Sefiane K.* // J. Thermal Sci. Technol. 2012. V. 7. P. 425.
19. *Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L.* // J. Eng. Thermophys. 2013. V. 22. P. 1.
20. *Bochkareva, E.M., Terekhov, V.V., Nazarov A.D., Miskiv N.B.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 891. 012010.
21. *Brutin D., Sobac B., Rigollet F., Le Niliot C.* // Exp. Therm. Fluid Sci. 2011. V. 35. P. 521.
22. *Федорец А.А., Домбровский Л.А., Медведев Д.Н.* // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. С. 507.
23. *Borodulin V.Y., Letushko V.N., Nizovtsev M.I., Sterlyagov A.N.* // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. V. 109. P. 609.
24. *Кучма А.Е., Щёкин А.К., Есипова Н.Е., Татьянаенко Д.В., Ицков С.В., Савин А.В.* // Коллоид. журн. 2017. Т. 79. С. 297.
25. *Sterlyagov A.N., Letushko V.N., Nizovtsev M.I., Borodulin V.Yu.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1105. 012068.
26. *Золотарев В.И., Демин В.А.* // Оптика и спектроскопия. 1977. Т. 43. С. 271.
27. *Brutin D., Zhu Z.Q., Rahli O., Xie J.C., Liu Q.S., Tadrist L.* // Microgravity Sci. Technol. 2010. V. 22. P. 387.
28. *Лебедев-Степанов П.В.* Введение в самосборку ансамблей наночастиц. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2012.
29. *Фукс Н.А.* Рост и испарение капель в газообразной среде. М.: Изд-во АН СССР, 1958.