

УДК 544.77:541.18

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ И НАНОЖИДКОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С РАЗНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ

© 2023 г. А. Н. Стерлягов¹, *, М. И. Низовцев¹

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

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

Поступила в редакцию 06.09.2022 г.

После доработки 17.10.2022 г.

Принята к публикации 17.10.2022 г.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований испарения капель воды и наножидкости, лежащих на поверхности различных материалов. В качестве подложки использовались пластины из материалов с существенно отличающимися коэффициентами теплопроводности: меди ($\lambda = 401$ Вт/м °С), тефлона ($\lambda = 0.25$ Вт/м °С) и экструзионного пенополистирола ($\lambda = 0.03$ Вт/м °С). В экспериментах рассматривалось испарение капель воды и наножидкости объемом 5 мкл при постоянной температуре и влажности окружающего воздуха. Приготовление наножидкости (смеси воды с наночастицами золота) выполнялось методом лазерной абляции. В наножидкости массовая концентрация наночастиц составляла около 0.1%. В экспериментах с применением метода инфракрасной термографии были определены средние температуры поверхностей капель в процессе их испарения. Полученные результаты показали, что для всех исследованных материалов температура поверхности испаряющихся капель воды была выше температуры адиабатного испарения. При этом, чем меньше был коэффициент теплопроводности материала, тем ниже была температура поверхности капли и тем больше было время ее испарения. В результате выполненных экспериментов установлено, что минимальное значение температуры капель наножидкости было ниже, чем у капель воды, а время испарения у капель наножидкости было больше, чем у капель воды на соответствующих поверхностях.

DOI: 10.31857/S0023291222600511, EDN: KFCLGY

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процесса испарения капель жидкости, лежащих на поверхности, является классической фундаментальной задачей, которой посвящено большое количество публикаций [1–6]. В большинстве экспериментальных и численных исследований испарения лежащих капель жидкостей, как правило, рассматривается изменение геометрических параметров капель (угол смачивания, диаметр контактного пятна) [7, 8] в зависимости от внешних условий (температуры и давления паров жидкости в окружающей среде) [9, 10]. При исследованиях испарения лежащих капель большое внимание следует уделять особенностям смачивания поверхности, поскольку они в значительной степени определяют параметры испаряющихся капель [11]. В работе [12] рассмотрено влияние концентрации спирта на процесс испарения лежащих и подвешенных капель водно-спиртовых растворов. В работе [13] выполнен анализ влияния относительной влажности окружающего воздуха на изменение геометрических

параметров и температуры капель водно-спиртовых растворов в процессе испарения. В работе [14] показано существенное отличие скорости испарения капель чистой воды и капель с содержанием поверхностно-активного вещества. На процесс испарения лежащих капель помимо внешних условий большое влияние оказывает поверхность подложки. Шероховатость и смачиваемость поверхности подложки определяет форму капли и режим испарения [15] и существенно влияет на скорость испарения капли при разных значениях контактного угла [16]. Кроме того, процесс испарения лежащих капель существенно зависит от теплопроводности материала подложки. В ряде работ [17–21] показано сильное влияние теплопроводности подложки на время испарения лежащей капли. В отдельных работах [17, 18] выполнен численный анализ изменения температур капель в процессе испарения и проведены измерения температуры капель с применением термопар. В работе [21] показано, что на поверхностях с одинаковой смачиваемостью испарение капель, ле-

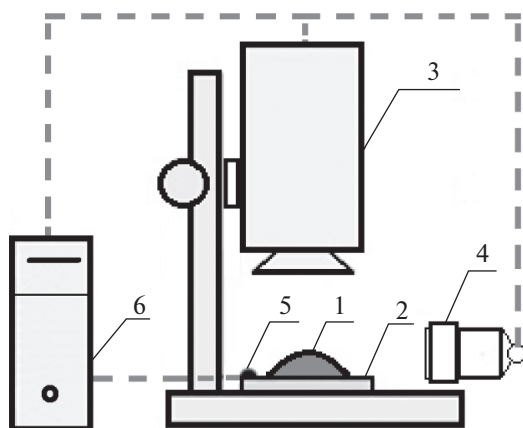


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – капля исследуемой жидкости; 2 – подложка; 3 – тепловизионная камера; 4 – скоростная цифровая видеокамера; 5 – датчик термогигрометра; 6 – персональный компьютер.

жащих на подложках с низкой теплопроводностью, происходило за более длительное время, чем на подложках с высокой теплопроводностью. Однако при использовании контактных методов измерения температуры нарушается целостность капли и происходит подвод тепла через термопару, что может приводить к существенным ошибкам при измерении [22]. Поэтому при исследовании испарения капель для получения информации о температуре испаряющихся капель эффективно использовать бесконтактный метод инфракрасной термографии [23–25].

В последние годы в связи с широким распространением нанотехнологий появились исследования, посвященные испарению капель наножидкостей. Значительное число экспериментальных и теоретических работ посвящено изучению закономерностей формирования осадков из наночастиц на подложках при испарении капель наножидкостей. В работах [26–28] исследуется процесс формирования кольцевых осадков при испарении капель водных дисперсий наночастиц серебра размером порядка 10 нм и массовой концентрацией 0.05–0.2% на подложках из различных материалов. В исследованиях показано значительное влияние материала подложки на скорость испарения капель и соответственно на процессы формирования кольцевых осадков, образующихся при испарении капель. В работе [29] исследуется зависимость характеристик осадков и кинетики испарения капель водных дисперсий со сферическими наночастицами золота размером 40–60 нм, лежащих на кремниевых подложках. В исследованиях экспериментально и численно показано, что с увеличением концентрации наночастиц увеличивается время испарения капель и изменяется динамика испарения. Увеличение времени испаре-

ния капель различных наножидкостей по сравнению с чистыми жидкостями, также получено в ряде работ [30–32] для подвешенных капель. В то же время в работе [33] установлено, что капли наножидкости с наночастицами Fe_3O_4 , лежащие на структурированной поверхности, имеют более высокую температуру испарения и более высокую скорость испарения по сравнению с каплями чистой воды. Таким образом, в ряде работ получено противоположное влияние наночастиц на скорость испарения капель, лежащих на поверхностях, поэтому этот вопрос требует дальнейшего изучения. Следует отметить, что в большинстве численных и экспериментальных исследований, как правило, в основном рассматривается изменение геометрических параметров капель и осадков, образующихся при испарении капель наножидкостей. При этом в экспериментальных исследованиях малое внимание уделяется изменению температуры капель, характеризующему процесс испарения, и существенно зависящему от характеристик подложки.

В рамках данной работы было выполнено экспериментальное исследование испарения капель воды и наножидкости, лежащих на поверхностях разных материалов, существенно отличающихся коэффициентом теплопроводности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для исследования испарения капель жидкости на горизонтальных поверхностях различных материалов была использована экспериментальная установка Института теплофизики СО РАН, приведенная на рис. 1.

В вертикальном положении над рабочим участком располагалась тепловизионная камера (3), сбоку от рабочего участка устанавливалась скоростная цифровая видеокамера (4). Температура и влажность окружающего воздуха фиксировались термогигрометром (5). Все данные с измерительной аппаратуры поступали на персональный компьютер (6). Эксперимент по исследованию испарения капли проводился следующим образом: на поверхность подложки (2) помещалась капля (1), которая формировалась с помощью капельного дозатора “Thermo Scientific” с точностью 0.1 мкл. Капля имела начальную температуру равную температуре окружающей среды, $T = 24^\circ C$.

В процессе испарения капли методом инфракрасной термографии в различные моменты времени определялось распределение температуры на поверхности капли. В экспериментах использовалась тепловизионная камера NEC TH 7102WV, позволяющая регистрировать распределение температуры на поверхности капли с точностью $0.1^\circ C$. В целях калибровки и для определения коэффициента излучения поверхности дополнительно

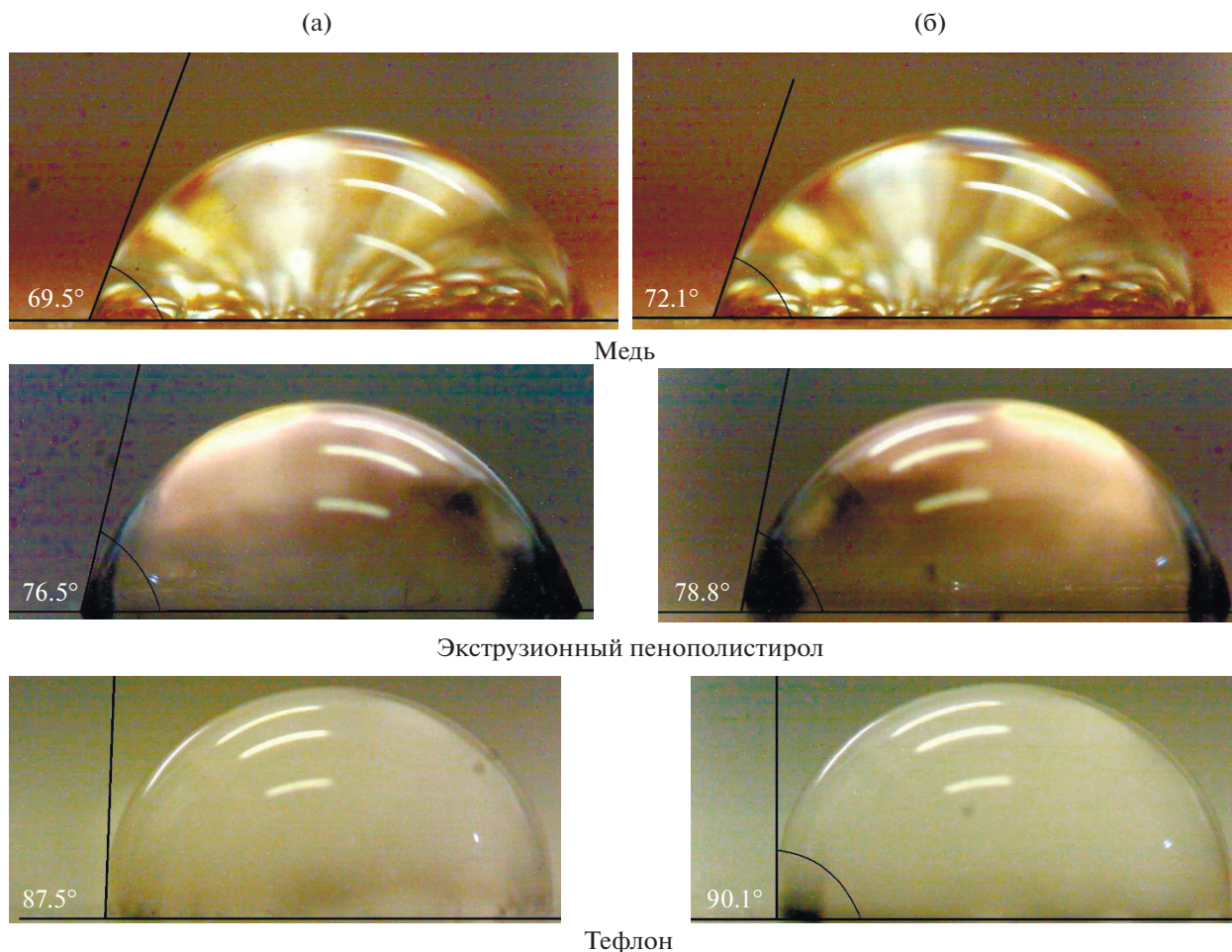


Рис. 2. Фотографии капель воды (а) и наножидкости (б), лежащих на поверхностях материалов с разной теплопроводностью.

выполнялись контактные измерения температуры подложки.

В качестве подложки в экспериментах использовались пластины толщиной 3 мм из различных материалов: меди с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 401 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, тефлона (политетрафторэтилена Ф-4) с $\lambda = 0.25 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$ и экструзионного пенополистирола с $\lambda = 0.03 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$.

В экспериментах изучалось испарение капель объемом 5 мкл при постоянной температуре, $T = 24 \text{°C}$, и относительной влажности воздуха, $\varphi = 24\%$. Температура адиабатного испарения определена по I-d диаграмме [34] и для условий эксперимента составляла $T_m = 12.7 \text{°C}$.

В экспериментах рассматривалось испарение капель двух различных жидкостей: дистиллированной воды и наножидкости. В качестве наножидкости использовалась смесь воды с наночастицами золота. Приготовление наножидкости выполнялось методом импульсной лазерной абляции [35]. В результате воздействия наносекунд-

ными лазерными импульсами на золотую пластину под тонким слоем воды был получен коллоидный раствор – наножидкость на основе воды с наночастицами золота. С помощью просвечивающего электронного микроскопа было определено, что в полученной наножидкости преобладают наночастицы сферической формы с характерным размером $\approx 10 \text{ нм}$ [36]. Согласно выполненным оценкам, массовая концентрация наночастиц золота в наножидкости составляла порядка 0.1%.

ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В экспериментах с применением скоростной микрофотосъемки исследовалось изменение геометрических параметров испаряющихся капель. На рис. 2 представлены фотографии капель воды и наножидкости, лежащие на различных подложках в начальный момент.

Полученные данные показали, что для всех рассмотренных поверхностей капли наножидко-

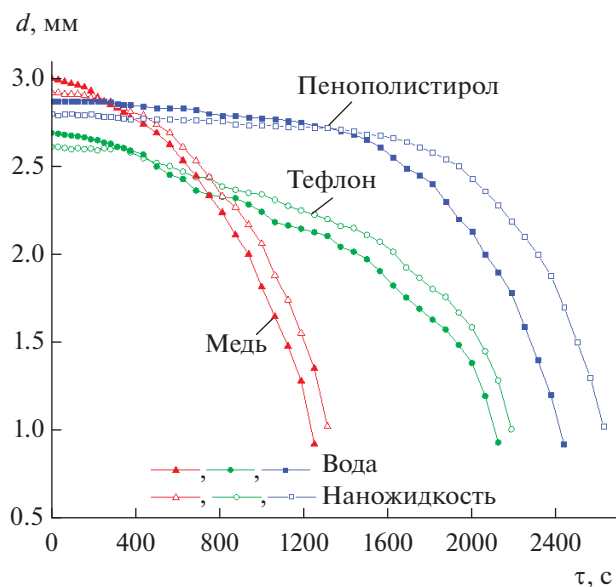


Рис. 3. Изменение диаметра контактного пятна капль воды и наножидкости, на поверхностях материалов с различной теплопроводностью.

сти имели угол смачивания на $\approx 2.5^\circ$ больше, чем капли воды на соответствующей поверхности. Относительная погрешность измерения угла смачивания, обусловленная разбросом результатов серии экспериментов, не превышала 2.0%. Отличие в угле смачивания воды и наножидкости вероятно объясняется особенностями взаимодействия и самоорганизации наночастиц, расположенных на межфазной границе жидкости и подложки. Очевидно, что малые отличия смачиваемости и соответственно углов смачивания для капль воды и наножидкости объясняются малой концентрацией наночастиц.

На основании полученных данных скоростной микрофотосъемки были определены временные зависимости диаметра контактного пятна испаряющихся капль воды и наножидкости, лежащих на поверхностях разных материалов (рис. 3).

Полученные результаты показали, что для всех рассмотренных поверхностей капли наножидкости имели меньший диаметр начального контактного пятна и большее время испарения, чем капли воды на соответствующей поверхности. Следует отметить, что для капль воды и наножидкости на поверхности экструзионного пенополистирола наблюдался режим “пиннинга” — диаметр контактного пятна на начальном этапе испарения практически не изменялся. При испарении капль на поверхности меди и тефлона диаметр контактного пятна для капль воды и наножидкости уменьшался с самого начала процесса испарения.

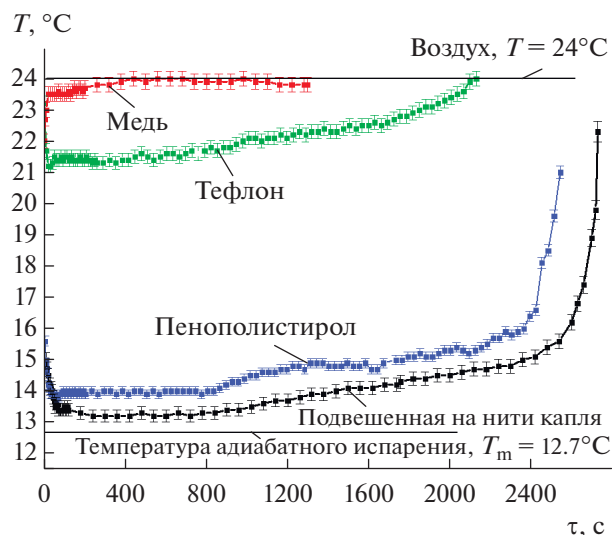


Рис. 4. Изменение средней температуры капль воды, испаряющихся на поверхностях материалов с различной теплопроводностью.

ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В процессе испарения капль с использованием метода инфракрасной термографии определялось распределение температуры на поверхностях капль в различные моменты времени. Из полученных данных следует, что распределение температуры на поверхности капль было неравномерное и изменялось с течением времени, что существенно усложняло анализ. Поэтому в качестве количественного критерия была выбрана средняя температура поверхности капль. Далее под “температурой капль” подразумевается “средняя температура поверхности капль”. Согласно выполненным оценкам, погрешность определенной температуры составляла порядка 2%.

На основании полученных данных были определены временные зависимости средних температур испаряющихся капль воды, лежащих на поверхностях разных материалов (рис. 4).

Из полученных данных следует, что изменение температуры испаряющейся капль существенно зависело от теплопроводности материала поверхности. Для капль воды, лежащей на медной пластине, наблюдалось резкое повышение температуры до температуры пластины, соответствующей температуре окружающего воздуха. В дальнейшем температура капль практически не изменялась до ее полного испарения. Для капль на поверхности пластины из тефлона после резкого уменьшения температуры капль на 2.5°C по сравнению с начальным значением наблюдалось плавное повышение температуры до температуры окружающего воздуха. Для капль на поверхности пластины из пенополистирола сначала наблюдалось резкое понижение температуры капль на

10.3°C, затем была стадия с ее продолжительным плавным повышением и резкий рост до температуры окружающего воздуха на завершающем этапе испарения. Более существенное понижение температуры почти до температуры адиабатного испарения $T_m = 12.7^\circ\text{C}$ в аналогичных условиях наблюдается для свободной подвешенной на нити капли [12]. Полученные данные показывают, что температура капель воды, испаряющихся на поверхности материала, не достигала температуры адиабатного испарения. Очевидно, это было связано с подводом тепла к каплям от поверхности материала. Наблюдалась следующая закономерность: чем меньше была теплопроводность материала, тем меньше был тепловой поток от поверхности пластины и, соответственно, тем сильнее понижалась температура капли и тем больше она приближалась к температуре адиабатного испарения. Соответственно, чем меньше была теплопроводность материала, тем ниже была температура капли в процессе испарения, и больше было время испарения капли. Наименьшее время испарения наблюдалось для капли на медной пластине. Вследствие большой теплопроводности меди подвод тепла к капле осуществлялся настолько интенсивно, что понижения температуры практически не наблюдалось.

Полученные данные по изменению температуры поверхностей испаряющихся капель на качественном уровне хорошо согласуются с экспериментальными и расчетными данными других исследователей [17, 18]. В отличие от указанных работ, применение метода инфракрасной термографии позволило определить температуру капель без контакта с ними и получить данные по динамике изменения температуры на поверхностях испаряющихся капель с более высокой точностью.

С применением метода инфракрасной термографии было также получено изменение средней температуры поверхностей капель наножидкости, лежащих на поверхностях разных материалов. Для наглядности на рисунке также показаны данные для капель воды при аналогичных условиях (рис. 5).

Полученные в экспериментах данные показали, что характер изменения температуры испаряющихся капель наножидкости практически не отличался от температуры капель воды. Очевидно, это объясняется незначительной концентрацией наночастиц в наножидкости. Следует отметить, что минимальное значение температуры капель наножидкости было меньше, чем у капель воды на соответствующих поверхностях. При этом время испарения у капель наножидкости было незначительно больше, чем у капель воды. Вероятно, это объясняется большей вязкостью наножидкости, которая затрудняет конвекцию в капле и тем самым замедляет теплообмен, а больший угол

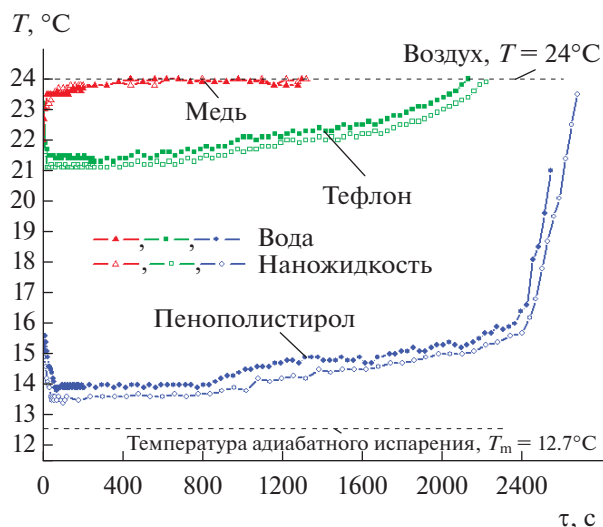


Рис. 5. Изменение средней температуры поверхностей капель воды и наножидкости, на поверхностях материалов с различной теплопроводностью.

смачивания приводит к меньшей площади контакта жидкости с поверхностью при фиксированном объеме капли и соответственно меньшим подводом тепла от поверхности к капле наножидкости.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

На основании полученных экспериментальных данных построена зависимость разности температуры окружающего воздуха и минимальной температуры капель воды и наножидкости в процессе испарения от коэффициента теплопроводности материала подложки (рис. 6).

Полученные данные показывают, что чем больше теплопроводность материала подложки, тем меньше разность температуры капли и окружающей среды, как для воды, так и для капли наножидкости. На поверхности пенополистирола и тефлона разность температур для капель наножидкости была незначительно больше, чем для капель воды. Для капель, испаряющихся на поверхности меди отличий нет, очевидно вследствие большой теплопроводности меди и соответственно интенсивного подвода тепла.

На основании полученных экспериментальных данных построена зависимость времени испарения капель от коэффициента теплопроводности материала подложки (рис. 7).

Полученные данные показывают, что чем больше теплопроводность материала подложки, тем меньше время испарения капель воды и наножидкости. При этом, как уже отмечалось выше, для всех рассмотренных поверхностей время испарения капель наножидкости было несколько больше, чем капель воды.

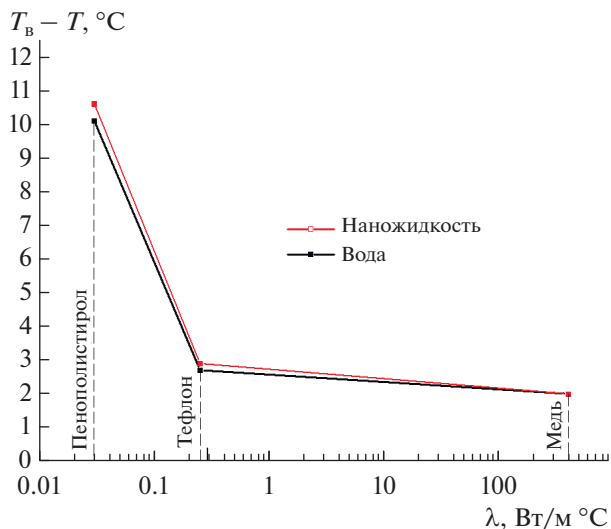


Рис. 6. Зависимость разности температуры окружающего воздуха и минимальной температуры капли воды и наножидкости от коэффициента теплопроводности материала подложки.

Поток пара при испарении капли определялся его диффузией в окружающий воздух. Интенсивность испарения капли зависит от разности давлений пара вблизи поверхности капли и вдали от нее [3]. Вблизи поверхности капля водяной пар можно считать насыщенным при температуре поверхности капли. По измеренным минимальным температурам поверхностей капля была построена зависимость времени испарения каплей от перепада давления водяного пара вблизи капли и вдали от нее для каплей, лежащих на поверхностях материалов с разной теплопроводностью (рис. 8).

Полученные данные показывают, что более высокий коэффициент теплопроводности материала подложки приводил к большему перепаду давления водяного пара и, соответственно, более интенсивному испарению капли на такой подложке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных экспериментальных исследований испарения каплей воды и наножидкости (вода с наночастицами золота с массовой концентрацией 0.1%) на поверхности материалов, имеющих разные коэффициенты теплопроводности, были получены данные по изменению диаметра контактного пятна и средней температуры поверхностей каплей в процессе испарения.

В экспериментах установлено, что капли наножидкости на начальном этапе имели больший угол смачивания и соответственно меньший диаметр контактного пятна, чем капли воды на соответствующей поверхности. Полученные в экспериментах данные показали, что для каплей, испаряю-

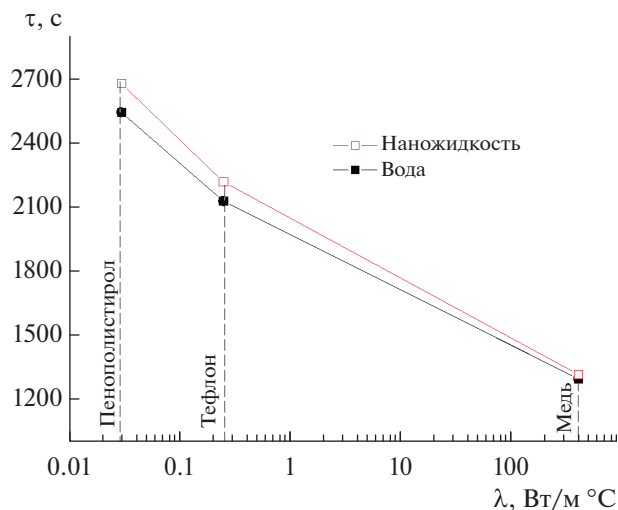


Рис. 7. Зависимость времени испарения капли воды и наножидкости от коэффициента теплопроводности материала подложки.

щихся на поверхностях различных материалов, наименьшие значения температуры превышали температуру адиабатного испарения, что было обусловлено подводом тепла от подложки к каплям. Чем меньше коэффициент теплопроводности материала подложки, тем меньше был тепловой поток от поверхности, соответственно, тем сильнее понижалась температура капли и приближалась к температуре адиабатного испарения.

В работе получено, что минимальное значение температуры каплей наножидкости в процессе испарения было ниже, чем у каплей воды, а время испарения у каплей наножидкости больше, чем у

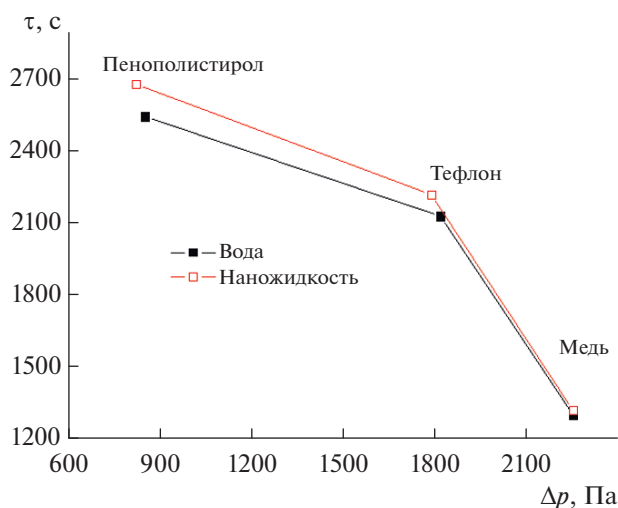


Рис. 8. Зависимость времени испарения капли воды, лежащей на подложке из разных материалов от перепада давления водяного пара вблизи капли и вдали от нее.

капель воды на соответствующих поверхностях. Вероятно, это объясняется тем, что большая вязкость наножидкости затрудняет конвекцию в капле и тем самым замедляет теплообмен, а больший угол смачивания приводит к меньшей площади контакта жидкости с поверхностью при фиксированном объеме капли и соответственно меньшим подводом тепла от поверхности к капле наножидкости.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке мегагранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 2020-220-08-1436 (номер договора № 075-15-2021-575).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы статьи выражают благодарность старшему научному сотруднику Института теплофизики СО РАН Старинскому С.В. за подготовку наножидкости для выполнения экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ranz W.E., Marshall W.R.* Evaporation from drops // *Chem. Eng. Prog.* 1952. Т. 48. № 3. P. 141–146.
2. *Fuchs N.A.* Evaporation and Droplet Growth in Gaseous Media. Pergamon Press, 1959.
3. *Picknett R.G., Bexon R.* The evaporation of sessile or pendant drops in still air // *Journal of Colloid and Interface Science.* 1977. Т. 61. № 2. P. 336–350.
4. *Law C.K.* Recent advances in droplet vaporization and combustion // *Progress in energy and combustion science.* 1982. Т. 8. № 3. P. 171–201.
5. *Cazabat A.M., Guena G.* Evaporation of macroscopic sessile droplets // *Soft Matter.* 2010. Т. 6. № 12. P. 2591–2612.
6. *Erbil H.Y.* Evaporation of pure liquid sessile and spherical suspended drops: a review // *Advances in Colloid and Interface Science.* 2012. Т. 170. № 1–2. P. 67–86.
7. *Hu H., Larson R.G.* Evaporation of a sessile droplet on a substrate // *The Journal of Physical Chemistry B.* 2002. Т. 106. № 6. P. 1334–1344.
8. *Brutin D., Sobac B., Nicloux C.* Influence of substrate nature on the evaporation of a sessile drop of blood // *Journal of Heat Transfer.* 2012. Т. 134. № 6. P. 061101-1–061101-7.
9. *Кучма А.Е. и др.* Динамика испарения бинарной сидячей капли: теория и сравнение с экспериментом для капли раствора серной кислоты // *Коллоидный журнал.* 2017. Т. 79. № 6. С. 747–755.
10. *Ozturk T., Erbil H.Y.* Evaporation of water-ethanol binary sessile drop on fluoropolymer surfaces: influence of relative humidity // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2018. Т. 553. P. 327–336.
11. *Chulkova E. V. et al.* Elimination of wetting study flaws in unsaturated vapors based on Laplace fit parameters // *Surface Innovations.* 2020. V. 1. № 10. P. 21–24.
12. *Бородулин В.Ю. и др.* Экспериментальное исследование испарения капель водно-спиртовых растворов // *Коллоидный журнал.* 2019. Т. 81. № 3. С. 289–295.
13. *Бородулин В.Ю. и др.* Влияние относительной влажности воздуха на испарение капель водного раствора этанола // *Коллоидный журнал.* 2021. Т. 83. № 3. С. 251–257.
14. *Терехов В.И., Шишкин Н.Е.* Влияние поверхностно-активного вещества на интенсивность испарения подвешенных капель воды // *Коллоидный журнал.* 2021. Т. 83. № 1. С. 107–113.
15. *Gatapova E.Y., Semenov A.A., Zaitsev D.V., Kabov O.A.* Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2014. 41. P. 776–785.
16. *Савенко О.А., Лебедев-Степанов П.В.* Квазистационарное испарение малой капли жидкости на плоской подложке: аналитическое решение в биполярных координатах // *Коллоидный журнал.* 2022. Т. 84. № 3. С. 328–337.
17. *David S., Sefiane K., Tadrist L.* Experimental investigation of the effect of thermal properties of the substrate in the wetting and evaporation of sessile drops // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2007. Т. 298. № 1–2. P. 108–114.
18. *Dunn G.J. et al.* The strong influence of substrate conductivity on droplet evaporation // *Journal of Fluid Mechanics.* 2009. Т. 623. P. 329–351.
19. *Sobac B., Brutin D.* Thermal effects of the substrate on water droplet evaporation // *Physical Review E.* 2012. Т. 86. № 2. P. 021602.
20. *Bazargan V., Stoeber B.* Effect of substrate conductivity on the evaporation of small sessile droplets // *Physical Review E.* 2016. Т. 94. № 3. P. 033103.
21. *Lopes M.C. et al.* Influence of the substrate thermal properties on sessile droplet evaporation: Effect of transient heat transport // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2013. Т. 432. P. 64–70.
22. *Han K. et al.* An experimental and theoretical study of the effect of suspended thermocouple on the single droplet evaporation // *Applied thermal engineering.* 2016. Т. 101. P. 568–575.
23. *Терехов В.И., Шишкин Н.Е.* Температура поверхности испаряющихся капель бинарных растворов // *Ползуновский вестник.* 2010. № 1. С. 55–59.
24. *Nakoryakov V.E., Misyura S.Y., Elistratov S.L.* Boiling crisis in droplets of ethanol water solution on the heating surface // *Journal of Engineering Thermophysics.* 2013. Т. 22. № 1. P. 1–6.
25. *Vochkareva E.M. et al.* Integrated experimental and theoretical study of evaporation process of nonideal solutions // *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing. 2017. Т. 891. № 1. P. 012010.
26. *Высоцкий В.В. и др.* Перколяционные переходы в композитных структурах, формирующихся при ис-

- парении капель дисперсий наночастиц серебра // Коллоидный журнал. 2011. Т. 73. № 2. С. 173–181.
27. *Высоцкий В.В. и др.* Испарение капель дисперсий наночастиц серебра на металлических поверхностях // Коллоидный журнал. 2014. Т. 76. № 5. С. 578–586.
28. *Высоцкий В.В. и др.* Влияние температуры на процесс формирования кольцевого осадка при испарении капель дисперсий наночастиц серебра // Коллоидный журнал. 2017. Т. 79. № 2. С. 134–141.
29. *Zaibudeen A.W., Bandyopadhyay R.* Correlating the drying kinetics and dried morphologies of aqueous colloidal gold droplets of different particle concentrations // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. Т. 646. Р. 128982.
30. *Gan Y., Qiao L.* Evaporation characteristics of fuel droplets with the addition of nanoparticles under natural and forced convections // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011. Т. 54. № 23–24. Р. 4913–4922.
31. *Дмитриев А.С., Макаров П.Г.* Об испарении жидкости из капель коллоидных растворов наночастиц SiO_2 и Fe_2O_3 // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. № 2. С. 144–151.
32. *Starinskaya E.M. et al.* Effect of SiO_2 nanoparticle addition on the evaporation of a suspended water droplet // *Heat Transfer Research*. 2022. Т. 53. № 9. Р. 43–56.
33. *Starinskaya E.M. et al.* Investigation of heat transfer during evaporation of droplets of Fe_3O_4 nanofluids from biphilic surfaces // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2021. Т. 2119. № 1. Р. 012083.
34. *Нестеренко А.В.* Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. Учебное пособие, изд. 3, доп. М.: “Высшая школа”, 1971. 460 с.
35. *Starinskiy S.V. et al.* Comparison of structures of gold nanoparticles synthesized by pulsed laser ablation and magnetron sputtering // *Journal of Structural Chemistry*. 2017. Т. 58. № 8. Р. 1581–1587.
36. *Старинский С.В., Шухов Ю.Г., Булгаков А.В.* Влияние размеров наночастиц на спектр экстинкции коллоидных растворов, полученных при лазерной абляции золота в воде // *Квантовая электроника*. 2017. Т. 47. № 4. С. 343–346.