

ТЕППОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕППОТЕХНИКА

Ксения Артуровна БАТИЩЕВА¹

Атлант Едилулы НУРПЕЙИС²

УДК 536.242

ИСПАРЕНИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ИЗОЛИРОВАННОЙ ОТ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ КАМЕРЕ*

¹ аспирант, Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
инженер, Лаборатория интенсификации процессов теплообмена,
Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск)
bka1801@mail.ru; ORCID: 0000-0002-2810-6769

² кандидат технических наук, ассистент,
Научно-образовательный центр И. Н. Бутакова,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет
nurpeiis_atlant@mail.ru

Аннотация

С увеличением производительности энергетического оборудования и миниатюризации его компонентов применение традиционных систем обеспечения теплового режима недостаточно. Возникает необходимость разработки систем капельного теплоотведения, в основе которых лежат эффекты фазового перехода. Капельное охлаждение является перспективной технологией, которая может использоваться в изолированных от внеш-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-38-50098).

Цитирование: Батищева К. А. Испарение капель воды в изолированной от внешней среды камере / К. А. Батищева, А. Е. Нурпейис // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Том 6. № 3 (23). С. 8-22.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-3-8-22

ней среды устройствах (например, в испарительных камерах). Но теплоотведение при испарении капель в ограниченный объем является сложной задачей из-за концентрации водяных паров в охлаждающем устройстве, которая зависит от массы испарившейся жидкости и нестационарна во времени. Увеличение концентрации приводит к снижению скорости испарения и ухудшению теплоотведения. Необходимо регулировать концентрацию водяных паров при испарении капель жидкостей.

Целью настоящей работы являлось определение скоростей испарения, времен «жизни» и геометрических размеров капель воды на поверхности алюминиевого сплава АМгб при температурах 298-353 К в изолированной от внешней среды камере в условиях подвода тепла к ее нижней части и регулирования массовой концентрации водяных паров насыщенным раствором хлорида натрия. Визуализация процесса испарения капель воды осуществлялась по теневой методике с помощью источника света и видеокамеры. Геометрические размеры испаряющихся капель получены при обработке теневых изображений методом Юнга — Лапласа. По результатам их анализа установлены последовательность изменений геометрических размеров испаряющихся капель с поверхности алюминиевого сплава и влияние температур и объемов на скорости и времена испарения.

В настоящей работе предложено использовать резервуары с насыщенными растворами солей для регулирования концентрации водяных паров при охлаждении поверхности каплями жидкостей в изолированных камерах. По результатам анализа скоростей испарения и показаний гигрометра установлено, что наличие в камере насыщенного раствора соли позволяет регулировать концентрацию образовавшегося при испарении водяного пара. Поступивший водяной пар поглощался солью и конденсировался на внутренних поверхностях камеры.

Ключевые слова

Испарение, тепломассообмен, капля, подложка, изолированная камера, массовая концентрация водяного пара, пиннинг.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-3-8-22

Введение

Современные исследования в области электроники направлены на поиск способов уменьшения размеров деталей оборудования с увеличением их энергоэффективности [3]. Последнее инициирует интенсивные локальные тепловыделения и возникновение термических напряжений, характеризующихся нестационарным пространственным распределением. При создании нового энергоемкого оборудования появляется необходимость разработки методов отвода тепла от локально теплонагруженных участков. Одним из перспективных способов их охлаждения является использование микрофлюидных устройств [1] и испарительных камер [18]. В микрофлюидных устройствах микро- или нанообъем охлаждающей жидкости циркулирует по каналам. Принцип работы испарительных камер заключается в отводе теплоты от теплонагруженного участка в атмосферу

в результате испарения и последующей конденсации рабочей жидкости в закрытой плоской трубе прямоугольного сечения. В отличие от термосифонов, конструкция которых исключает возможность охлаждения изделий электроники с изменяющимся пространственным положением относительно вектора массовых сил (например, при маневре самолета), и тепловых труб, применяемых для отвода тепловых потоков с заранее известной локализацией [7], испарительные камеры более универсальны. Это объясняется тем, что сконденсировавшаяся рабочая жидкость может возвращаться на испаритель с помощью эффекта «подпрыгивания» [20], возникающего в результате выделения избыточной энергии при слиянии двух капель на супергидрофобном конденсаторе [5]. Стоит отметить, что вектор движения капли направлен перпендикулярно поверхности, с которой она испаряется, и он не зависит от ориентации испарительной камеры в пространстве [6, 16].

В связи с перспективностью применения результатов исследований процессов, протекающих при смачивании, растекании и испарении капель с твердой поверхности в охлаждающих устройствах, опубликовано большое количество работ (в частности, статьи О. А. Кабова [2] и Е. Я. Гатаповой и др. [10, 11]). При конструировании изолированных систем охлаждения перспективны работы М. Д. Доганси и др. [8] и Н. А. Ивановой и др. [13], в которых представлены результаты исследований по испарению капель в закрытом объеме. Исследование И. Кипера с соавторами [14] зарегистрировало линейное увеличение относительной влажности на 10-75% в зависимости от давления в изолированной камере. Помимо этого, Н. С. Кубочкиным и Н. А. Ивановой [15] установлено, что с ростом времени испарения воды из влажной ткани от 0 до 1 000 секунд относительная влажность в камере увеличивается от 20 до 85%.

Трудность прогностического моделирования процесса испарения капель воды в изолированных охлаждающих устройствах заключается в том, что во время их работы тепловыделение от нагретых деталей охлаждаемого оборудования инициирует возникновение градиентов температур и концентраций водяных паров. Благодаря Ю. Фукатани и др. известно [9], что при испарении воды концентрация паров в пространстве может изменяться существенно, что оказывает влияние на характеристики процесса тепломассопереноса. Последнее подтверждается результатами численного моделирования распределения водяных паров над испаряющейся каплей воды, приведенными в работах Д. Ху [12] и Дж. Пракаша и Б. С. Сикарвара [19].

На основании рассмотренных выше результатов работ можно сделать вывод, что для интенсификации процесса испарения капель необходимо регулировать массовую концентрацию водяных паров в изолированной камере. В связи с этим целью настоящей работы являлось определение скоростей испарения, времен «жизни» и геометрических размеров капель воды в условиях их испарения в изолированной от внешней среды камере с контролем концентрации водяных паров.

Методология исследования

Исследования проведены на установке, схема которой представлена на рис. 1.

В качестве источника тепла использован силиконовый нагревательный элемент, зажатый между двух пластин из нержавеющей стали. На пластину приклеивалась сменная полированная подложка из алюминиевого сплава АМг6 с помощью теплопроводящей кремнийорганической пасты. Пластина накрывалась боксом из прозрачного оргстекла. Стыки герметизировались термостойкой клейкой лентой. Соединенные вместе пластина и бокс представляли собой изолированную камеру размерами $70 \times 70 \times 30 \text{ мм}^3$.

Капли объемом 5, 10, 15, 20 и 25 мкл помещались аналогично [4] в центр поверхности подложки, нагретой до температур 298, 313, 323, 343 и 353 К электронным дозатором через отверстие в верхней части бокса. Отверстие закрывалось клейкой лентой, целостность которой нарушалась наконечником дозатора диаметром, равным диаметру отверстия в боксе, для исключения попадания воздуха из помещения лаборатории. Температура контролировалась малоинерционными термопарами (OMEGA, США) точностью $\pm 0,1 \text{ К}$. Последние устанавливались под подложкой и на расстоянии 5 мм от ее поверхности.

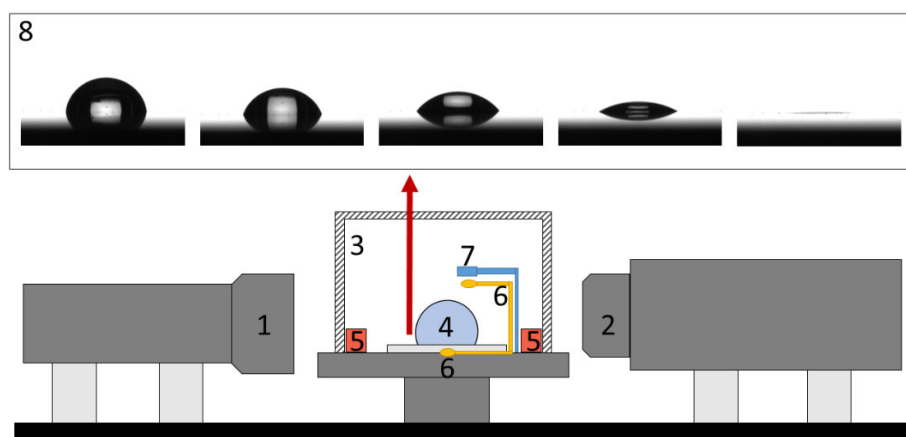


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — источник направленного света;
- 2 — видеокамера;
- 3 — изолированная камера;
- 4 — капля на подложке;
- 5 — резервуары с раствором хлорида натрия;
- 6 — термопары;
- 7 — чувствительный элемент гигрометра;
- 8 — типичные фотокадры испаряющейся капли

Fig. 1. The scheme of the experimental setup:

- 1 — source of plane-parallel light;
- 2 — video camera;
- 3 — insulated chamber;
- 4 — droplet on the substrate;
- 5 — cuvette with a solution of sodium chloride;
- 6 — thermocouples;
- 7 — hygrometer;
- 8 — typical photos of an evaporating droplet

Температуры, до которых нагревалась подложка, выбраны на основании регламента температурного режима электронного оборудования, оснащенного системой непрямого жидкостного охлаждения.

Относительная влажность в помещении лаборатории варьировалась от 18 до 45% в зависимости от времени года, поэтому в камере она регулировалась резервуарами с насыщенным водным раствором хлорида натрия (NaCl). Этот способ основан на том, что с помощью насыщенного раствора соли устанавливается постоянное значение относительной влажности в закрытом объеме [17]. После изолирования камеры с насыщенным раствором соли от внешней среды водяные пары насыщали внутренний объем камеры до равновесного значения (для насыщенного раствора NaCl равновесная относительная влажность составляет 75%). При этом соль не оказывала влияние на характеристики процесса испарения, т. к. в изолированной камере отсутствовала вынужденная конвекция. Относительная влажность регистрировалась малоинерционным емкостным гигрометром «НИН-4000-004» (Honeywell, Россия) точностью $\pm 3,5\%$, чувствительный элемент которого был размещен на расстоянии 5 мм от центра подложки.

Геометрические размеры капель на поверхности подложки определялись по их теневым изображениям (рис. 2), полученным по теневой методике (рис. 1): направленный свет, сгенерированный системой, освещал лежащую на поверхности подложки каплю через боковую стенку бокса. Теневые изображения фиксировались видеокамерой «FastVideo 500M» (FastVideo, Россия).

По полученным теневым изображениям определялись контактные углы, объемы и радиусы капель с помощью программного комплекса «Drop Shape Analysis» методом Юнга — Лапласа (LB-ADSA).

Используемый для производства теплоэнергетического оборудования алюминиевый сплав АМгб выбран в качестве материала подложки из-за его высокой теплопроводности и стойкости к коррозии.

Для уменьшения влияния шероховатости подложки на движение контактной линии испаряющейся капли воды перед проведением экспериментальных исследований поверхность подложки выравнивалась на шлифовально-полировальном станке. По результатам анализа полированной поверхности на профилометрическом комплексе «Micro Measure 3D station» (STIL, France) установлено, что среднее арифметическое отклонение профиля поверхности (S_a), характеризующее шероховатость, не превышало 60 нм.

В качестве жидкости использована дистиллированная вода. Она применяется при непрямом жидкостном охлаждении изделий электроники из-за ее высокой теплопроводности и низкой стоимости в сравнении с диэлектрическими жидкостями, используемыми при прямом охлаждении: фторуглероды (FC), гидрофторэфиры (HFE) и др.

Температура в помещении варьировалась от 298 до 299 К. Эксперименты проведены при атмосферном давлении. Для определения случайных погрешностей эксперименты повторялись 3-5 раз. Относительные погрешности определения геометрических размеров капель (контактные углы, контактные диаметры, объемы) не превышали 3-7%.

Результаты и обсуждение

По результатам анализа показателей гигрометра получена типичная зависимость относительной влажности в камере от времени (рис. 2).

На рис. 2 временные интервалы разделены на 3 участка. Первый (i на рис. 2) соответствует квазистационарной относительной влажности перед дозированием капли на подложку. В изолированной от внешней среды камере с резервуарами насыщенного водного раствора хлорида натрия устанавливалась соответствующая его гигроскопической точке (равновесная влажность в закрытом объеме, при которой насыщенный раствор соли не испаряется и не поглощает водяные пары из воздуха) относительная влажность — 75%. Массовая концентрация пара составила $0,017 \text{ кг/м}^3$.

После дозирования капли на подложку (участок ii на рис. 2) показания гигрометра увеличились на 7% из-за диффузии молекул воды со свободной поверхности капли в воздух, вызванной градиентом концентраций (концентрация молекул воды на границе «жидкость — газ» составила 100%, в воздухе камеры — 75%). Уменьшение регистрируемой гигрометром относительной влажности связано с уменьшением геометрических размеров капли из-за ее испарения (увеличение расстояния от капли до сенсора гигрометра).

После испарения капли с поверхности подложки (участок iii на рис. 2) влажность регулировалась раствором соли и уменьшилась до 75%, что соответствует относительной влажности до помещения капли на подложку. Образовавшийся при испарении капли водяной пар поглощался раствором соли.

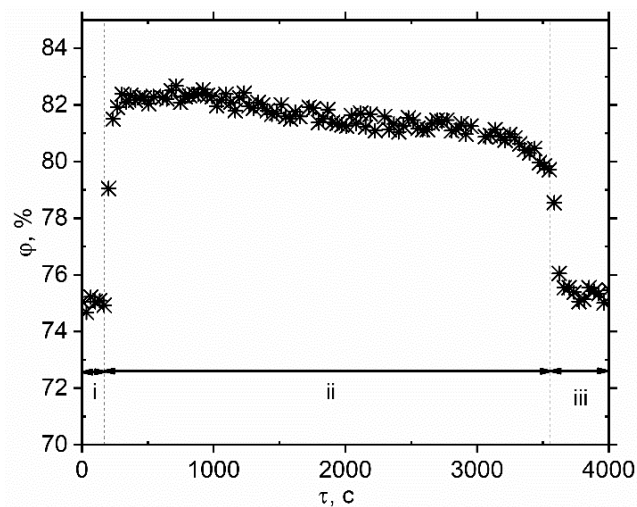


Рис. 2. Типичная временная зависимость относительной влажности воздуха в изолированной от внешней среды камере при температурах 298-299 К

Fig. 2. The typical time dependence of relative humidity in the isolated chamber at the temperatures of 298-299 K

Во время работы силиконового нагревательного элемента температуры подложки и металлической пластины увеличивались до 323-353 К в зависимости от требуемого температурного режима. Подведенное тепло рассеивалось через стенки камеры. Температурный перепад между подложкой и верхней стенкой камеры составил 15-30 К при температурах 323-353 К. При прогреве воздуха в камере начинался процесс конденсации водяных паров на ее верхней стенке. Последнее объясняется тем, что из-за наличия температурного перепада и высокой начальной влажности (75%) температура верхней стенки была ниже точки росы. Можно сделать вывод, что резервуары с насыщенным раствором солей могут быть использованы для поглощения водяных паров во время испарения капли. В то же время концентрация пара в объеме камеры остается постоянной во времени и не замедляет процесс испарения.

По результатам анализа теневых изображений испаряющейся капли (на рис. 1 представлены типичные) установлено, что после дозирования капли воды на поверхность алюминиевого сплава АМг6 она принимала форму шарового сегмента из-за работы сил поверхностного натяжения жидкости. Сила гравитации не оказывала существенного влияния на форму капли. Последнее подтверждается числами Бонда (Bo) (1), характеризующими отношение сил гравитации и поверхностного натяжения жидкости ($\sigma_{жг}$, Н/м):

$$Bo = \left(\frac{\rho r^2 g}{\sigma_{жг}} \right), \quad (1)$$

где ρ — плотность жидкости, м³/кг; r — контактный радиус капли, м; g — ускорение свободного падения, м/с².

В условиях проведенных экспериментов числа Бонда для капель объемами 5-25 мкл были меньше единицы и варьировались от 0,31 до 0,97 при температурах подложки от 323 до 353 К, соответственно. Следовательно, силы поверхностного натяжения жидкости преобладали над силами гравитации.

После того как капля садилась на поверхность полированной до $Sa = 60$ нм подложки, она растекалась в течении 1-2 секунд из-за сил инерции, возникших в результате отрыва капли от наконечника дозатора. Последнее сопровождалось увеличением контактного диаметра до максимального значения D_{max} и уменьшением контактного угла (рис. 3).

Затем растекание капли прекращалось из-за уравнивания сил инерции силами вязкого трения. После прекращения движения капли происходило зацепление (пиннинг) ее контактной линии (линия на границе «твердое тело — жидкость — газ»). Несмотря на полировку подложки, текстура ее поверхности состояла из хаотично направленных царапин ($Sa = 60$ нм) и микровключений металлов, входящих в сплав АМг6, которые являлись физическими и энергетическими барьерами, препятствующими отступанию контактной линии. Во время испарения в режиме пиннинга контактный угол уменьшался при неизменном значении контактного диаметра. Через 90-95% от общего времени испарения при накоплении достаточного количества энергии (энергии Гиббса) для прео-

доления потенциальных барьеров контактная линия начинала отступать (происходил депиннинг). Испарение капли сопровождалось одновременным уменьшением ее контактного диаметра и контактного угла. При достижении критической толщины капли контактная линия разрывалась. На месте капли формировалась несимметричная лужица.

По результатам анализа теневых изображений не зарегистрировано влияние температуры подложки и массовой концентрации водяных паров на контактный диаметр, высоту, начальный контактный угол и отношение времени пиннинга к общему времени испарения.

Установлено, что при контакте с нагретой до указанных температур подложкой капли объемом 5-25 мкл нагревались в течении 11-27 секунд. Время прогрева было оценено с помощью уравнения (2):

$$\tau = \left(\frac{\rho h^2 c_p}{k} \right), \quad (2)$$

где h — высота капли; ρ — плотность жидкости; c_p — теплоемкость; k — теплопроводность жидкости.

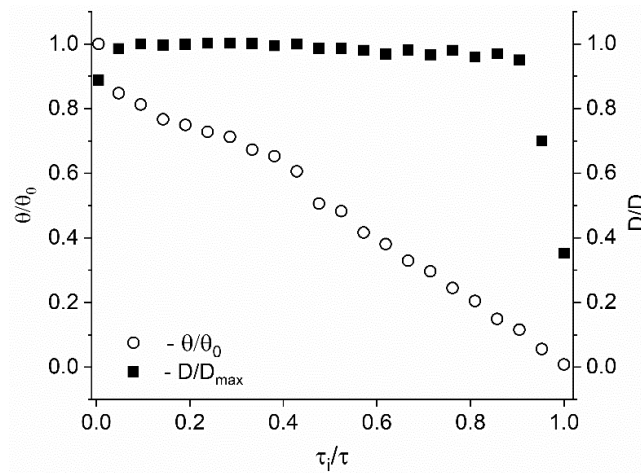


Рис. 3. Зависимости безразмерного контактного угла (отношение контактного угла в момент времени τ_i к начальному контактному углу) и безразмерного контактного диаметра (отношение диаметра в момент времени τ_i к максимальному контактному диаметру) от безразмерного времени (отношение времени τ_i к полному времени испарения капли)

Fig. 3. The dependences of the dimensionless contact angle (the ratio of contact angle in time τ_i to the initial contact angle) and the dimensionless contact diameter (the ratio of the diameter at time τ_i to the max contact diameter) as functions of the dimensionless time (the ratio of time τ_i to the total evaporation time of a droplet)

Указанный выше период, необходимый для нагрева капли от температуры окружающей среды (равной 298-299 К) до температуры подложки, подтверждается результатами экспериментального исследования определения температуры с помощью малоинерционной термопары, размещенной в капле.

По полученным в результате экспериментальных исследований зависимостям времен испарения капель воды от температур подложки (рис. 4) установлено, что с увеличением температуры в указанном диапазоне время «жизни» капель сокращается на 70-80% из-за интенсификации процесса испарения капель в результате увеличения температуры жидкости и перепада температур между подложкой и верхней стенкой камеры.

При отсутствии нагрева жидкость в закрытой камере испарялась из-за диффузии молекул воды в воздух. Испарившаяся влага поглощалась раствором соли. Наличие перепада температур между подложкой и верхней стенкой камеры являлось причиной возникновения естественной конвекции. Конвективные потоки, формировавшиеся в окрестностях капли, увлекали за собой испарившуюся жидкость, что привело к росту скорости испарения и сокращению времени «жизни» капли, т. к. известно, что последняя зависит от разницы концентраций пара в приповерхностном слое капли (на границе «жидкость — газ») и на бесконечно далеком расстоянии от нее. Увеличение температуры подложки усилило влияние естественной конвекции на процесс испарения жидкости.

Рост времени испарения при увеличении объема капель подтверждается временными зависимостями их удельных скоростей испарения (рис. 5).

Увеличение удельной скорости испарения ($We = \Delta V \cdot (\Delta t \cdot S_{\text{сред}})^{-1}$) капель объемами 5-25 мкл с течением времени объясняется сокращением площади их поверхности ($S_{\text{сред}}$) на границе «жидкость — воздух». Уменьшение толщины

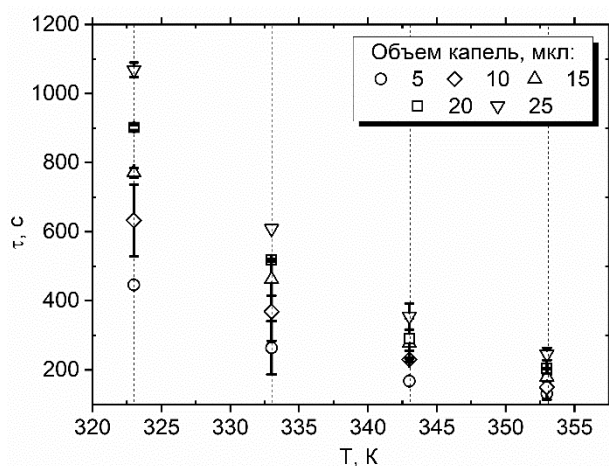


Рис. 4. Зависимости времен испарения капель воды объемами 5-25 мкл от температур поверхности подложки

Fig. 4. The water droplets (5-25 μl) evaporation time as a function of the substrate temperature

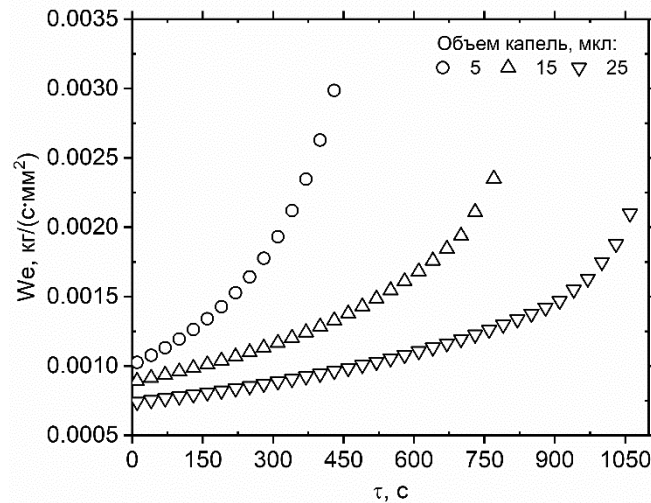


Рис. 5. Типичные временные зависимости скоростей испарения капель воды при температуре поверхности подложки 323 К

Fig. 5. The typical time dependences of water droplet evaporation rates at the substrate temperature of 323 K

капли не оказывало существенного влияния на We , т. к. максимальная скорость испарения соответствовала линии контакта «жидкость — твердое тело» (при начальном контактном угле капли на подложке менее 90 градусов). Испарившаяся жидкость компенсировалась из объема капли вследствие внутренних течений. Интегральная масса испарившейся из капель воды объемами 5, 15 и 25 мкл составила $0,11 \cdot 10^{-6}$, $0,4 \cdot 10^{-6}$ и $0,46 \cdot 10^{-6}$ кг, соответственно.

Удельные скорости испарения с течением времени монотонно увеличивались при всех исследуемых объемах капель (рис. 5). Отсутствие экстремумов при испарении дистиллированной воды свидетельствует о том, что воздух в камере не насыщался водяными парами и объем капель уменьшался линейно. При наличии температурного градиента между нижней и верхней частями камеры испарившаяся жидкость поглощалась раствором соли и конденсировалась на верхней стенке, нагретой ниже точки росы.

Заключение

Исследован процесс испарения капель воды (числа Бонда менее 1) с полированной подложки из алюминиевого сплава в изолированной от внешней среды камере. Установлено, что, несмотря на полировку поверхности подложки до $Sa = 60$ нм, капли испаряются в режиме пиннинга контактной линии 90-95% от полного времени испарения. Температура поверхности и объем капель не оказывают влияние на последовательность изменения их геометрических размеров.

Анализируя скорости испарения и показания гигрометра, установлено, что во время испарения капель воздух в изолированной от внешней среды камере

в условиях настоящего эксперимента не насыщался водяными парами. Резервуары с насыщенными растворами солей могут быть использованы для регулирования концентрации пара в камере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Занавескин М. Л. Микрофлюидика и ее перспективы в медицине / М. Л. Занавескин, А. А. Миронова, А. М. Попов // Молекулярная медицина. 2012. № 5. С. 1-8.
2. Кабов О. А. Влияние гистерезиса смачивания на растекание капли под действием гравитации / О. А. Кабов, Д. В. Зайцев // Доклады Академии Наук, Механика. 2013. № 451. С. 37-40.
3. Колпаков А. Охлаждение в системах высокой мощности / А. Колпаков // Силовая электроника. 2010. № 3. С. 62-66.
4. Кузнецов Г. В. Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия / Г. В. Кузнецов, Д. В. Феоктистов, Е. Г. Орлова // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Том 23. № 1. С. 17-22.
5. Boreyko J. B. Planar jumping-drop thermal diodes / J. B. Boreyko, Y. Zhao, C. H. Chen // Applied Physics Letters. 2011. Vol. 99. Pp. 1-4.
6. Boreyko J. B. Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces / J. B. Boreyko, C. H. Chen // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103. Pp. 2-5.
7. Boreyko J. B. Vapor chambers with jumping-drop liquid return from superhydrophobic condensers / J. B. Boreyko, C. H. Chen // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 61. Pp. 409-418.
8. Doganci M. D. Diffusion-controlled evaporation of sodium dodecyl sulfate solution drops placed on a hydrophobic substrate / M. D. Doganci, B. U. Sesli, H. Y. Erbil // Journal of Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 362. Pp. 524-531.
9. Fukatani Y. Effect of ambient temperature and relative humidity on interfacial temperature during early stages of drop evaporation / Y. Fukatani, D. Orejon, Y. Kita, Y. Takata, J. Kim, K. Sefiane // Physical Review E. 2016. Vol. 93. Pp. 1-16.
10. Gatapova E. Y. Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: focusing on the final stage of thin droplet evaporation / E. Y. Gatapova, A. M. Shonina, A. I. Safonov, V. S. Sulyaeva, O. A. Kabov // Soft Matter. 2018. Vol. 14. Pp. 1811-1821.
11. Gatapova E. Y. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability / E. Y. Gatapova, A. A. Semenov, D. V. Zaitsev, O. A. Kabov // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2014. Vol. 441. Pp. 776-785.
12. Hu D. Effect of liquid-vapor interface area on the evaporation rate of small sessile droplets / D. Hu, H. Wu, Z. Liu // International Journal of Thermal Sciences. 2014. Vol. 84. Pp. 300-308.
13. Ivanova N. A. Wetting of hydrophobic substrates by pure surfactants at continuously increasing humidity / N. A. Ivanova, N. S. Kubochkin, V. M. Starov // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2017. Vol. 519. Pp. 71-77.
14. Kiper I. Sessile drop evaporation on (super)hydrophobic surfaces: effect of low pressure on the contact line dynamics / I. Kiper, R. Fulcrand, C. Pirat, G. Simon, B. Stutz, S. M. M. Ramos // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2015. Vol. 482. Pp. 617-623.

15. Kubochkin N. S. Droplet shape and wetting behavior under the influence of cyclically changing humidity / N. S. Kubochkin, N. A. Ivanova // *Langmuir*. 2019. Vol. 35. Pp. 5054-5059.
16. Miljkovic N. Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces / N. Miljkovic, R. Enright, Y. Nam, K. Lopez, N. Dou, J. Sack, E. N. Wang // *Nano Letters*. 2013. Vol. 13. Pp. 179-187.
17. Ozturk T. Evaporation of water-ethanol binary sessile drop on fluoropolymer surfaces: Influence of relative humidity / T. Ozturk, H. Y. Erbil // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2018. Vol. 553. Pp. 327-336.
18. Patankar G. Patterning the condenser-side wick in ultra-thin vapor chamber heat spreaders to improve skin temperature uniformity of mobile devices / G. Patankar, J. A. Weibel, S. V. Garimella // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 101. Pp. 927-936.
19. Prakash J. Modeling of sessile droplet evaporation on engineered surfaces / J. Prakash, B. S. Sikarwar // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2019. Vol. 11. Pp. 1350-1353.
20. Rykaczewski K. Multimode multidrop serial coalescence effects during condensation on hierarchical superhydrophobic surfaces / K. Rykaczewski, A. T. Paxson, S. Anand, X. Chen, Z. Wang, K. K. Varanasi // *Langmuir*. 2013. Vol. 29. Pp. 881-891.

Ksenia A. BATISHCHEVA¹
Atlant E. NURPEIIS²

UDC 536.242

WATER DROPLET EVAPORATION IN A CHAMBER ISOLATED FROM THE EXTERNAL ENVIRONMENT*

¹ Postgraduate Student, Butakov Research Center,
National Research Tomsk Polytechnic University;
Engineer, Laboratory for the Intensification of Heat Transfer Processes,
Kutateladze Institute of Thermophysics Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk)
bka1801@mail.ru; ORCID: 0000-0002-2810-6769

² Cand. Sci. (Tech.), Assistant,
Butakov Research Center, National Research Tomsk Polytechnic University
nurpeiis_atlant@mail.ru

Abstract

With an increase in the productivity of power equipment and the miniaturization of its components, the use of traditional thermal management systems becomes insufficient. There is a need to develop drip heat removal systems, based on phase transition effects. Cooling with small volumes of liquids is a promising technology for microfluidic devices or evaporation chambers, which are self-regulating systems isolated from the external environment. However, the heat removal during evaporation of droplets into a limited volume is a difficult task due to the temperature difference in the cooling device and the concentration of water vapor that is unsteady in time depending on the mass of the evaporated liquid.

This paper presents the results of an experimental study of the distilled water microdrops' (5-25 μl) evaporation on an aluminum alloy AMg6 with the temperatures of 298-353 K in an isolated chamber ($70 \times 70 \times 30 \text{ mm}^3$) in the presence of heat supply to its lower part. Based

* This research was supported by RFBR (grant no 19-38-50098).

Citation: Batishcheva K. A., Nurpeiis A. E. 2020. "Water droplet evaporation in a chamber isolated from the external environment". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 6, no, 3 (23), pp. 8-22.
DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-3-8-22

on the analysis of shadow images, the changes in the geometric dimensions of evaporating drops were established. They included the increase in the contact diameter, engagement of the contact line due to nano roughening and chemical composition inhomogeneous on the surface (90-95% of the total evaporation time) of the alloy and a decrease in the contact diameter. The surface temperature and droplet volume did not affect the sequence of changes in the geometric dimensions of the droplets. It was found that the droplet volume has a significant effect on the evaporation time at relatively low substrate temperatures.

The results of the analysis of droplet evaporation rates and hygrometer readings have shown that reservoirs with salt solutions can be used in isolated chambers to control the concentration of water vapor. The water droplets evaporation time was determined. The analysis of the time dependences of the evaporation rate has revealed that upon the evaporation of droplets in an isolated chamber under the conditions of the present experiment, the air was not saturated with water vapor. The latter did not affect the evaporation rate.

Keywords

Evaporation, heat and mass transfer, droplet, substrate, isolated chamber, mass concentration of water vapor, pinning.

DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-3-8-22

REFERENCES

1. Zanaveskin M. L., Mironova A. A., Popov A. M. 2012. "Microfluidics and its prospects in medicine". *Molekulyarnaya meditsina*, no. 5, pp. 1-8. [In Russian]
2. Kabov O. A., Zaytsev D. V. 2013. "The effect of wetting hysteresis on the droplet spreading by gravity". *Doklady Akademii Nauk, Mekhanika*, no. 451, pp. 37-40. [In Russian]
3. Kolpakov A. 2010. "Cooling in high power systems". *Silovaya elektronika*, no. 3, pp. 62-66. [In Russian]
4. Kuznetsov G. V., Feoktistov D. V., Orlova Ye. G. 2016. "Evaporation of liquid droplets from a surface of anodized aluminum". *Thermophysics and Aeromechanics*, vol. 23 (1), no. 1, pp. 17-22. [In Russian]
5. Boreyko J. B., Zhao Y., Chen C. H. 2011. "Planar jumping-drop thermal diodes". *Applied Physics Letters*, vol. 99, pp. 1-4.
6. Boreyko J. B., Chen C. H. 2009. "Self-propelled dropwise condensate on superhydrophobic surfaces". *Physical Review Letters*, vol. 103, pp. 2-5.
7. Boreyko J. B., Chen C. H. 2013. "Vapor chambers with jumping-drop liquid return from superhydrophobic condensers". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 61, pp. 409-418.
8. Doganci M. D., Sesli B. U., Erbil H. Y. 2011. "Diffusion-controlled evaporation of sodium dodecyl sulfate solution drops placed on a hydrophobic substrate". *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 362, pp. 524-531.
9. Fukatani Y., Orejon D., Kita Y., Takata Y., Kim J., Sefiane K. 2016. "Effect of ambient temperature and relative humidity on interfacial temperature during early stages of drop evaporation". *Physical Review E*, vol. 93, pp. 1-16.

10. Gatapova E. Y., Shonina A. M., Safonov A. I., Sulyaeva V. S., Kabov O. A. 2018. "Evaporation dynamics of a sessile droplet on glass surfaces with fluoropolymer coatings: Focusing on the final stage of thin droplet evaporation". *Soft Matter*, vol. 14, pp. 1811-1821.
11. Gatapova E. Y., Semenov A. A., Zaitsev D. V., Kabov O. A. 2014. "Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 441, pp. 776-785.
12. Hu D., Wu H., Liu Z. 2014. "Effect of liquid-vapor interface area on the evaporation rate of small sessile droplets". *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 84, pp. 300-308.
13. Ivanova N. A., Kubochkin N. S., Starov V. M. 2017. "Wetting of hydrophobic substrates by pure surfactants at continuously increasing humidity". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 519, pp. 71-77.
14. Kiper I., Fulcrand R., Pirat C., Simon G., Stutz B., Ramos S. M. M. 2015. "Sessile drop evaporation on (super)hydrophobic surfaces: effect of low pressure on the contact line dynamics". *Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 482, pp. 617-623.
15. Kubochkin N. S., Ivanova N. A. 2019. "Droplet shape and wetting behavior under the influence of cyclically changing humidity". *Langmuir*, vol. 35, pp. 5054-5059.
16. Miljkovic N., Enright R., Nam Y., Lopez K., Dou N., Sack J., Wang E. N. 2013. "Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces". *Nano Letters*, vol. 13, pp. 179-187.
17. Ozturk T., Erbil H. Y. 2018. "Evaporation of water-ethanol binary sessile drop on fluoropolymer surfaces: influence of relative humidity". *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 553, pp. 327-336.
18. Patankar G., Weibel J. A., Garimella S. V. 2016. "Patterning the condenser-side wick in ultra-thin vapor chamber heat spreaders to improve skin temperature uniformity of mobile devices". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 101, pp. 927-936.
19. Prakash J., Sikarwar B. S. 2019. "Modeling of sessile droplet evaporation on engineered surfaces". *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 11, pp. 1350-1353.
20. Rykaczewski K., Paxson A. T., Anand S., Chen X., Wang Z., Varanasi K. 2013. "Multimode multidrop serial coalescence effects during condensation on hierarchical superhydrophobic surfaces". *Langmuir*, vol. 29, pp. 881-891.