

УДК 620.92:62-67

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ НАНОЖИДКОСТЕЙ НА ПОДЛОЖКЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. К. Т. Чан<sup>1</sup>, \*, А. С. Дмитриев<sup>1</sup>, П. Г. Макаров<sup>1</sup>, И. А. Михайлова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: tranqth.96@gmail.com

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.

После доработки 05.10.2023 г.

Принята к публикации 05.10.2023 г.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию процесса испарения капель нано-жидкостей диоксида титана, диоксида кремния и алмаза на подложке при взаимодействии с солнечным излучением. Было изучено влияние различных факторов на процесс испарения капель, включая тип материала и концентрацию нанокомпонентов, направление облучения, объем капли и материал подложки. В результате были определены критические концентрации наночастиц для капель исследуемых нано-жидкостей, при которых скорость испарения капель достигает стабильного уровня. Также проанализированы режимы и стадии процесса испарения капель в случае докритической и критической концентраций наночастиц. Показано, что эффективность испарения капель под действием солнечного излучения сильно зависит от направления облучения. Влияние объема капли и материала подложки на ее скорость испарения также исследовано. Помимо эффективности испарения, проведен анализ морфологии осадочных структур капель, показана их зависимость как от концентрации и типа материала наночастиц, так и от режима испарения капель. Результаты данного исследования позволяют более детально понять, как ведут себя капли в процессе испарения под действием излучения, особенно в инфракрасной области, и подтверждают перспективность применения нано-жидкостей в солнечной теплоэнергетике.

*Ключевые слова:* нано-жидкость, испарение капель, солнечное излучение, режимы испарения, критическая концентрация, морфология осадочной структуры

**DOI:** 10.31857/S0023291223600761, **EDN:** HDXZUG

### ВВЕДЕНИЕ

Испарение капель представляет собой замечательный процесс, который является неотъемлемой частью нашей повседневной жизни и играет важную роль во многих областях, включая энергетику. На первый взгляд, физическая суть процесса испарения капель легко понятна и многократно объяснена. Данный процесс происходит, когда молекулы жидкости получают достаточно энергии, чтобы оторваться от поверхности и выйти в окружающую атмосферу. При этом энергия для реализации процесса испарения обычно поставляется в виде тепла. Однако в реальности испарение капель является очень сложным процессом, поскольку скорость испарения зависит от многих факторов, включая геометрию межфазной поверхности жидкости — окружающая среда, свойства и температуру жидкости, площадь поверхности жидкости, влажность окружающего воздуха и наличие других газов в атмосфере, свойства твердой по-

верхности, с которой жидкость контактирует, и также другие факторы [1]. Помимо изучения процесса испарения капель однокомпонентных (чистых) жидкостей, в последнее время исследование динамики испарения капель нано-жидкостей на подложках привлекает внимание многих исследователей. Данное направление играет ключевую роль во многих областях инженерии, таких как покрытия, печатные технологии, микрофлюидные устройства и теплоэнергетика [2–5].

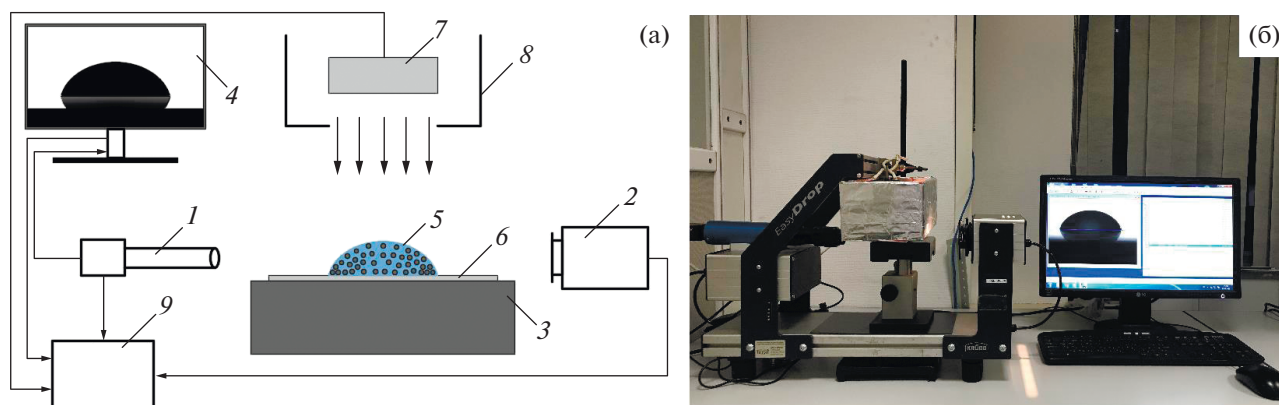
Процесс испарения приводит к изменению таких параметров капель, как контактный диаметр, контактные углы и высота купола. В зависимости от поведения контактных углов и контактного диаметра во время испарения, капли могут находиться в следующих режимах [6]: режим постоянной контактной линии (constant contact line — CCL), при котором контактная линия закреплена, т.е. контактный диаметр и площадь смачиваемого контакта между каплей и подложкой остаются постоянными, а контактный угол уменьшается со

временем; режим постоянного контактного угла (constant contact angle – CCA) – контактный угол не меняется, а контактный диаметр постепенно уменьшается; смешанный режим, когда имеет место перехода между режимами CCL и CCA; режим “прилипания-скольжения (stick-slip)”, при котором капля находится в режиме CCL (фазе “прилипания”), но контактная линия внезапно соскальзывает в новое положение, ведущее к меньшему контактному диаметру, когда угол контакта достигает порога, значение которого соответствует фазе “скольжения”. Затем капля снова находится в режиме CCL (фаза прилипания) до тех пор, пока не произойдет следующее скольжение. Следует отметить, что до конца сформулированной теории фазы “скольжения” не существует, поскольку во многих экспериментах наблюдается аномальное поведение контактных углов и контактных линий в зависимости от температуры.

Помимо перечисленных выше факторов, на процесс испарения и формирования осадочной структуры капель наножидкостей влияют многие явления и факторы [6–11]: теплопроводность и конвекция, естественная конвекция, вязкие и инерционные течения, течения с поверхностным натяжением (эффект Марангони), термогидродинамические неустойчивости, эффекты плавучести, броуновское движение наночастиц внутри базовой жидкости, растекание жидкости, закрепление и открепление контактной линии, адгезия и другие. Результаты работы [8] показали, что скорость испарения также зависит от размера наночастиц и типа поверхностных активных веществ. Авторы работы [9] показали, что с увеличением концентрации наночастиц скорость испарения жидкости монотонно возрастает. В работе [10] представлены результаты экспериментальных исследований испарения капель воды и наножидкости, лежащих на поверхности различных материалов, в частности, 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). Использована наножидкость – смесь воды с наночастицами золота, полученными методом лазерной абляции. В наножидкости массовая концентрация наночастиц составляла около 0.1%. 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. В исследовании [11] показано, что при воздействии внешнего давления на линию трехфазного контакта эффект гистерезиса краевых углов наблюдается для поверхностей, на которых капли сидят в режиме постоянной контактной линии.

На сегодняшний день большинство работ посвящено исследованию процесса испарения капли наножидкостей на подложках с ее резистивным нагревом снизу или без нагрева [4, 12–36]. Авторами работы [12] при описании квазистационарно медленного процесса испарения малых осесимметричных капель, лежащих на плоской подложке, были предложены для произвольных значений контактных углов новые аналитические выражения для плотности пара, плотности потока испарения и полного потока испарения в единицу времени. Выражения справедливы в приближении малых температурных градиентов во всех частях рассматриваемой системы. В работе [13] было замечено аномальное поведение времени испарения капель наножидкости диоксида титана ( $\text{TiO}_2$ ) на основе деионизированной воды в зависимости от концентрации наночастиц при температуре поверхности подложки 50°С. При такой температуре и массовой концентрации наночастиц 0.5% капля наножидкости  $\text{TiO}_2$  испарилась медленнее, чем капля воды. Но приемлемого объяснения для такого явления пока нет. Экспериментально установлено, что скорость испарения жидкости возрастает с увеличением концентрации наночастиц [21, 22]. При этом, как только вся базовая жидкость полностью испаряется, на поверхности подложки образуется осадок с различной морфологией [7, 18, 27–36]. В работе [18] были получены разные морфологии осадочной структуры при разных температурах подложки: относительно равномерное распределение наночастиц в осадке в случае без нагрева подложки и многокольцевые структуры при более высокой температуре (~99°С). Результаты исследований в работе [28] показали, что морфология осадочной структуры зависит как от материала, размера и концентрации наночастиц, так и от свойства поверхности подложки. Для наножидкости  $\text{Al}_2\text{O}_3$  было обнаружено, что кольцеобразная форма осадка формировалась при низких концентрациях и малых размерах частиц (ниже 2 об. % и менее 13 нм), в то время как однородная структура получалась при высоких концентрациях и больших размерах наночастиц (выше 3 об. % и более 20 нм). Для наножидкости  $\text{TiO}_2$  размером 21 нм кольцеобразные осадки наблюдались при всех концентрациях 0.01–4 об. %.

Количество работ по изучению свойств наножидкостей как нового перспективного класса теплоносителей в солнечной теплоэнергетике растет очень быстро [2, 3]. При этом число исследований процесса испарения капель под действием теплового излучения (не резистивный нагрев), наоборот, очень ограничено [37, 38]. В работе [38] исследован процесс испарения капли золотосодержащей наножидкости при разных концентрациях наночастиц под действием солнечного имитатора CEL-S500. Полученные в данной работе резуль-



**Рис. 1.** Упрощенная схема (а) и фотография (б) экспериментальной установки: 1 – видеокамера (monochrome interline CCD camera); 2 – источник света; 3 – столик для образца; 4 – компьютер; 5 – капля наножидкости; 6 – подложка; 7 – солнечный имитатор; 8 – защитный корпус с окном для выхода излучения, 9 – блок питания.

таты показали, что скорость испарения капель Au-наножидкости достигает стабильного уровня при концентрации 10 ppm, которая является критической. До критического значения скорость испарения резко повышается по мере увеличения концентрации наночастиц Au. Такое поведение скорости испарения капель авторы объясняют тем, что эти режимы испарения капель отвечают недостаточному и избыточному осаждению наночастиц в кофе-кольце для выделения тепла соответственно. Более того, в работе [38] под действием излучения солнечного имитатора со спектром 300–2500 нм наблюдался только режим испарения с постоянным контактным диаметром.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию процесса испарения и морфологии осадочной структуры капель наножидкостей на основе наночастиц диэлектрических материалов (диоксида титана (TiO<sub>2</sub>), диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) и алмаза (ND)) под действием солнечного имитатора в инфракрасной области. Исследование выполнено при вариации множества параметров, таких как материал и концентрация наночастиц, угол между поверхностями солнечного имитатора и подложки, объем капель и материалы подложек, которые отличаются между собой по теплофизическим, оптическим свойствам и характеристиками смачивания водой. В результате для случая взаимодействия капель указанных наножидкостей с излучением солнечного имитатора в инфракрасной области были впервые показаны основные режимы испарения, определены критические концентрации дисперсной фазы. Получены зависимости морфологии осадочной структуры и скорости испарения капель исследуемых наножидкостей от ряда факторов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Динамика испарения капель была исследована с помощью оптического теневого метода на установке Krüss EasyDrop FM40Mk2, принципиальная схема и фотография которой представлены на рис. 1. Основные элементы установки: видеокамера для захвата бокового вида капель с пространственным разрешением 780 × 580 пикселей и 61 кадров в секунду, источник света с программно-управляемой галогенной лампой, платформа для размещения образца и компьютер с программным обеспечением Drop Shape Analysis (DSA) для обработки сигнала из камеры. В рамках данного эксперимента в качестве солнечного имитатора использовался так называемый “половинный кварцевый инфракрасный нагревательный элемент ICH-402”, удельная энергия поверхностного излучения которого составляет 1.91 Вт/м<sup>2</sup>, эффективная поверхность равна 78.4 см<sup>2</sup>. Данный имитатор генерирует излучение в диапазоне от 1.85 до 8.9 мкм и требует 5 мин для выхода на рабочую температуру, которая может достигать 520°C.

Исследование влияния материала и концентрации наночастиц на скорость испарения капель проводилось на алюминиевой подложке с шероховатостью 2000 GP (Gaussian Peaks) при облучении капель сверху, т.е. при угле между поверхностями подложки и имитатора 0°. При этом расстояние между каплей и поверхностью имитатора установлено равным 100 мм. Подготовка наножидкостей была осуществлена по двухэтапному методу [37] на основе наночастиц диэлектрических материалов со следующими характеристиками: TiO<sub>2</sub> (~17 нм), SiO<sub>2</sub> (18–35 нм), ND (20–80 нм). Наночастицы TiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub> были синтезированы компанией Nanografi, а алмазные наночастицы – компанией Jiangsu Xfnano Materials Tech Co. Перед экспериментом наножидкость была перемешана

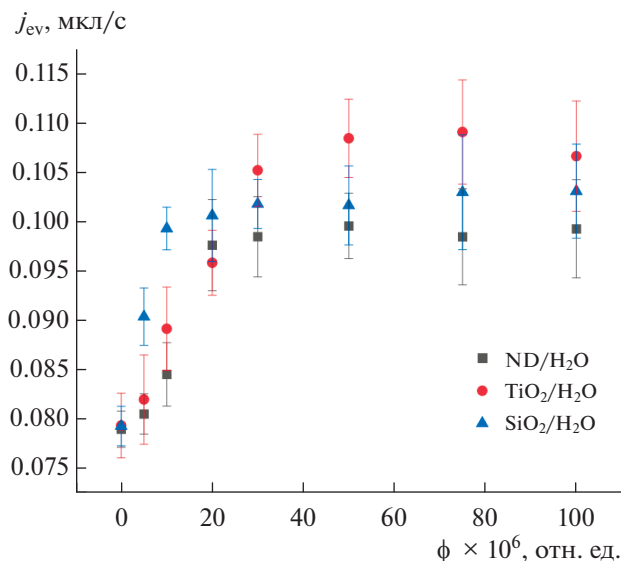


Рис. 2. Влияние материала и концентрации наночастиц на скорость испарения капель.

на в ультразвуковой ванне в течение 20 мин, а затем охлаждена до комнатной температуры. Исследование проводилось для капель объемом 50 мкл. Поскольку для размещения солнечного имитатора на установке автоматическая система дозирования была демонтирована, дозировка капель была сделана при помощи ручного дозатора с точностью до 0.1 мкл. Для минимизации влияния окружающей среды (ветер, изменение температуры и влажности) на результат исследования эксперименты проводились в герметичном помещении при следующих условиях: температура воздуха в помещении ( $25 \pm 0.4^\circ\text{C}$ ), начальная температура подложки ( $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ), начальная температура капли ( $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ), относительная влажность ( $39 \pm 3\%$ ), концентрация наночастиц (0–100 ppm). С целью получения достоверных результатов, эксперимент с каждой концентрацией наночастиц повторяется минимально от 7 до 10 раз. Динамика процесса испарения капель была снята с помощью видеокамеры установки и затем обработана на компьютере в программном обеспечении DSA для определения их характеристик по времени. При этом контактный угол капель определялся по методу касательных с точностью  $\pm 0.1^\circ$ . Морфологии осадочной структуры после высыхания капель также были сфотографированы и проанализированы под оптическим микроскопом.

Помимо материала и концентрации наночастиц, в рамках данного исследования также рассмотрено влияние следующих факторов на скорость испарения капель: угла между поверхностями подложки и имитатора ( $\phi$ ), объема капель ( $V$ ) и типа материала подложки. Эксперимент для выявления влияния названных факторов был вы-

полнен для капель дистиллированной воды и наножидкости TiO<sub>2</sub> с объемной концентрацией 30 ppm, которая является критической величиной в эксперименте с облучением под углом  $0^\circ$ . Исследование влияния угла  $\phi$  на скорость испарения капель проводилось при вращении солнечного имитатора по окружности радиусом 100 мм с центром, совпадающим с центром поверхности подложки, где находится исследуемая капля. Были рассмотрены следующие углы  $\phi$ :  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . Исследование по влиянию объема капель проводилось под углом  $\phi$  ( $90^\circ$ ) для трех значений объема: 5, 25 и 50 мкл. Наконец, было рассмотрено влияние на процесс испарения капель (5 мкл) материала подложек (алюминиевой, стеклянной, кремниевой), которые обладают разными теплофизическими, оптическими свойствами и свойствами смачивания поверхности водой.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### *Влияние материала и концентрации наночастиц на динамику испарения капель*

Результаты по средней скорости испарения капель наножидкостей (TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, ND/H<sub>2</sub>O) при их облучении под углом  $\phi$ , равном  $0^\circ$ , представлены на рис. 2. Из графика зависимости видно, что по мере повышения объемной концентрации наночастиц ( $\phi$ ) скорость испарения ( $j_{ev}$ ) резко увеличивается и затем выходит на стабильный уровень. Подобная тенденция изменения скорости испарения также наблюдалась в исследовании [38] для капель на основе наночастиц Au. Значение концентрации, при котором скорость испарения начинает стабилизироваться, будем называть критическим. Получено, что для исследуемых наножидкостей TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, ND/H<sub>2</sub>O и SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O критическая концентрация равна 30, 20 и 10 ppm соответственно. Здесь можно заметить, что капли TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O с наименьшим размером наночастиц ( $\sim 17$  нм) при критической и более высокой концентрациях обладают наибольшей скоростью испарения (на 32.5% превышает скорость испарения у капель дистиллированной воды при  $\phi$ , равной 30 ppm). Второе место по величине  $j_{ev}$  занимают капли SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O (приращение  $j_{ev}$  по сравнению с водой составляет 25.2% при  $\phi$ , равной 10 ppm), а третье место — капли ND/H<sub>2</sub>O (приращение  $j_{ev}$  по сравнению с водой составляет 23.6% при  $\phi$ , равной 20 ppm), которые состоят из наиболее крупных наночастиц порядка 20–80 нм.

Получено, что режим испарения капель сильно зависит от концентрации наночастиц. По результатам исследования все капли можно разделить на две группы. К первой группе относятся капли с объемной концентрацией наночастиц ниже критического значения, включая капли дистиллированной воды. Ко второй группе относятся капли

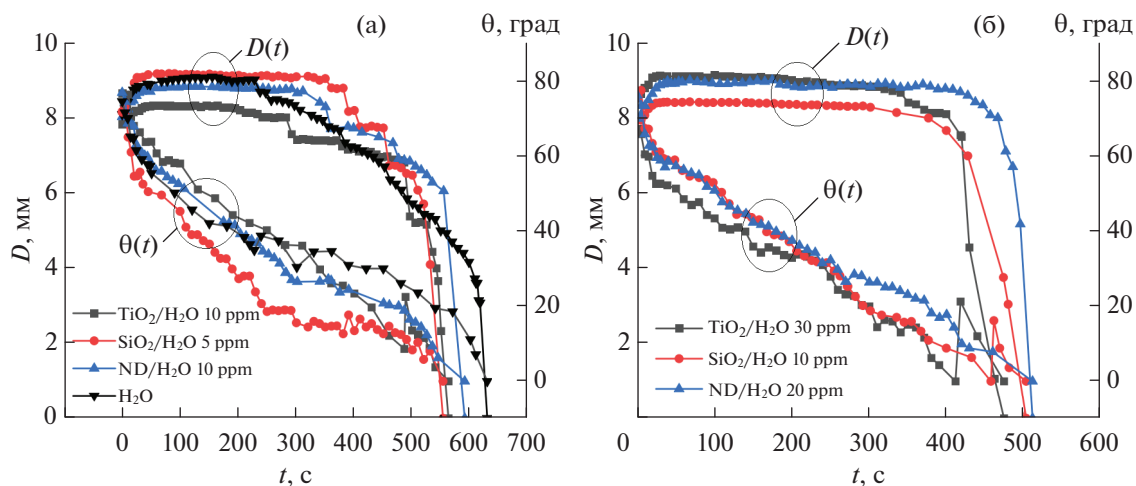


Рис. 3. Режимы испарения капель наножидкостей в случае до (а) и при критической (б) концентрации наночастиц.

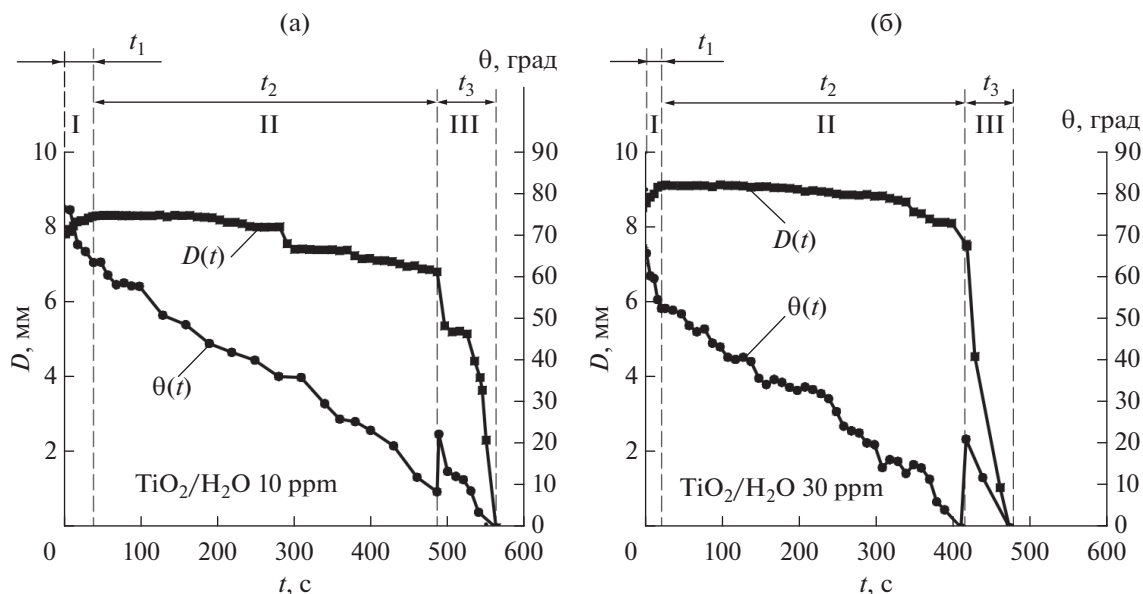
с критической и более высокой концентрациями наночастиц. При этом каждая группа обладает своим характером изменения контактных угла ( $\theta$ ) и диаметра ( $D$ ) капль со временем. Это хорошо видно на рис. 3, где рис. 3а показывает зависимость величин  $D$  и  $\theta$  от времени для капль первой группы, а рис. 3б – для капль при критической концентрации. Важно отметить, что все капль одной группы имеют абсолютно идентичные зависимости  $D(t)$  и  $\theta(t)$ . Поэтому на рис. 3 для каждой группы и каждого материала наночастиц была выбрана одна концентрация для представления зависимости  $D(t)$  и  $\theta(t)$ . По результатам, представленным на рис. 3, видно, что в течение большей части своей жизни капль первой группы испаряются по режиму “прилипания–скольжения”, а капль второй группы – по режиму ССЛ. При этом замечено, что в начале процесса под действием излучения капль быстро растекаются и затем переходят на режим ССЛ. В течение периода растекания контактный диаметр капль существенно увеличивается, а контактный угол резко уменьшается. Также важно, что конечная стадия процесса испарения капль второй группы зависит от вида материала наночастиц (рис. 3б). После того как капль  $\text{ND}/\text{H}_2\text{O}$  достигают минимального значения  $\theta$  в режиме ССЛ, контактные угол и диаметр резко уменьшаются и монотонно обращаются в нуль. В то время как конечная стадия испарения капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  происходит с одной фазой “скольжения”, сопровождающейся скачкообразным изменением контактного угла.

Далее подробно проанализируем стадии процесса испарения капль первой и второй групп на примере капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  10 и 30 ppm, зависимости  $D(t)$  и  $\theta(t)$  для которых представлены на рис. 4. Процесс испарения капль можно условно разделить на начальную (I), основную (II) и конечную

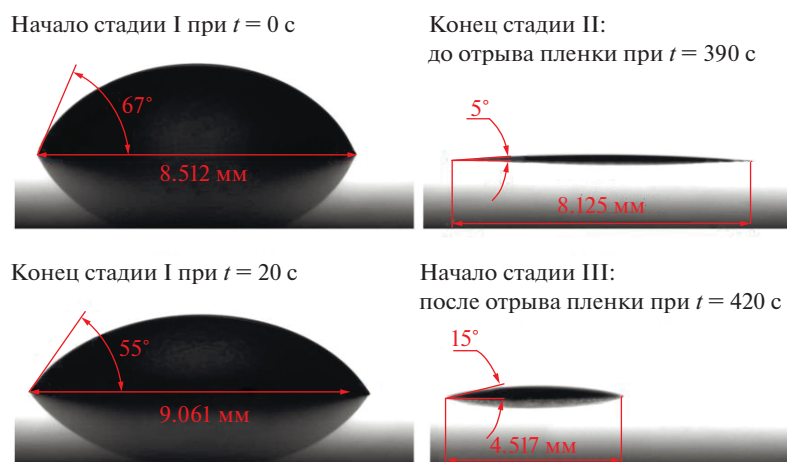
(III) стадии. Длительность каждой стадии обозначена соответственно  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ . Видно, что на начальной стадии происходит растекание капль с ростом контактного диаметра  $D$  и резким падением контактного угла  $\theta$ . Длительность данной стадии ( $t_1$ ) по сравнению с общей длительностью процесса испарения капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  10 ppm составляет 7.2%, а для капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm  $t_1$  составляет 4.2%. Основная стадия занимает большую часть времени процесса испарения капль (79.2% для капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  10 ppm и 82.5% для капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm). Отмечено, что режим испарения капль первой и второй групп отличаются именно в основной стадии, где капль первой группы ( $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  10 ppm) демонстрируют режим “прилипания–скольжения”, а капль второй группы ( $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm) – режим ССЛ. Конечная стадия процесса происходит аналогично с одной фазой “скольжения”. Длительность данной стадии ( $t_3$ ) составляет 13.6% для капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  10 ppm и 13.3% для  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm. На рис. 5 представлены боковые виды капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm в основные моменты стадий процесса ее испарения.

#### Влияние направления облучения капль на скорость испарения

Результаты данного исследования для капль дистиллированной воды и  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm объемом 50 мкл показывают, что скорость испарения  $j_{\text{ev}}$  сильно зависит от угла  $\varphi$ , который образуется между поверхностями солнечного имитатора и подложки. При этом по мере повышения угла  $\varphi$  время испарения капль увеличивается (рис. 6а), что приводит к снижению скорости испарения (рис. 6б). Помимо этого, следует отметить, что приращение скорости испарения капль  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm по



**Рис. 4.** Стадии процесса испарения каплей наножидкости  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  при концентрации 10 ppm (а) и при критической концентрации 30 ppm (б): I – начальная стадия с растеканием капли и длительностью  $t_1$ ; II – основная стадия испарения со длительностью  $t_2$ ; III – конечная стадия длительностью  $t_3$ .



**Рис. 5.** Боковой вид каплей  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm в основные моменты процесса испарения.

сравнению с каплями дистиллированной воды также падает с ростом угла  $\phi$ . При повышении  $\phi$  от 0 до 90° данное приращение уменьшается с 32.5 до 8.9% соответственно. Такую тенденцию изменения скорости испарения можно объяснить тем, что по мере повышения угла  $\phi$  средняя плотность подведенного потока тепла за счет излучения ( $q_{\text{под}}$ ) через поверхность капли также уменьшается. Действительно, на основе экспериментальных данных по времени испарения каплей  $t_{\text{ев}}$  можно оценить величины  $q_{\text{под}}$  по следующим уравнениям (здесь для упрощения представляем каплю в форме диска и пренебрегаем потерями за счет испарения)

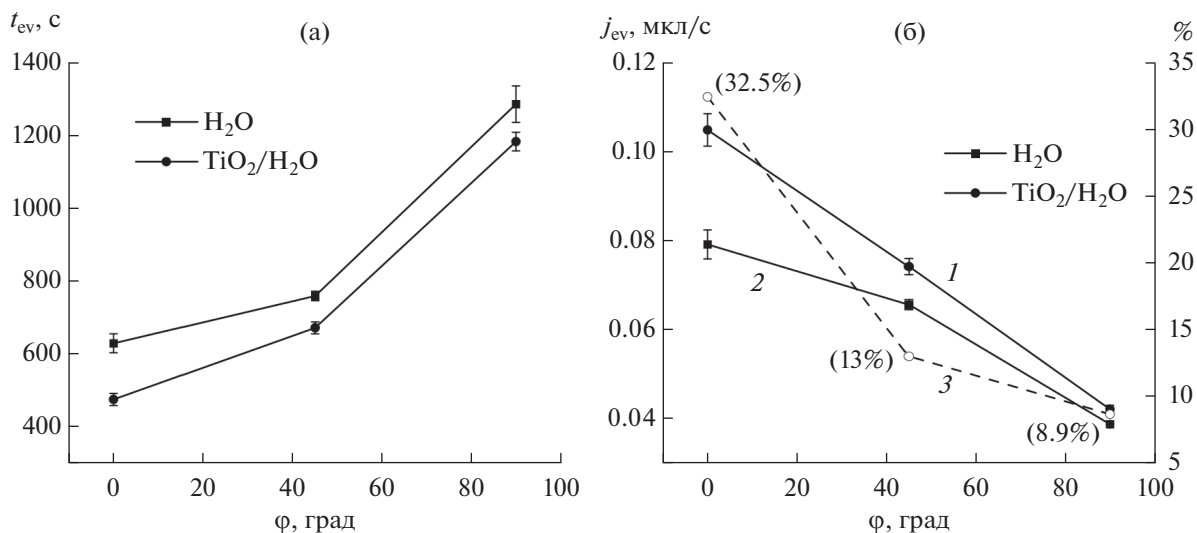
$$Q_{\text{под}} = t_{\text{ев}} q_{\text{под}} F, \quad (1)$$

$$Q_{\text{под}} = rm, \quad (2)$$

где  $Q_{\text{под}}$  – количество тепла, подведенного к капле за время процесса испарения  $t_{\text{ев}}$ ;  $F$  – площадь поверхности капли;  $r$  – теплота парообразования воды;  $m$  – масса капли.

Из уравнений (1) и (2) следует, что

$$q_{\text{под}} = \frac{rm}{t_{\text{ев}} F} = \frac{r\rho V}{t_{\text{ев}} \frac{\pi D^2}{4}}, \quad (3)$$



**Рис. 6.** Влияние угла  $\phi$  на время высыхания (а) и скорость испарения капель (б): 1 – скорость испарения капель  $TiO_2/H_2O$  (30 ppm), 2 – скорость испарения капель дистиллированной воды, 3 – относительное приращение скорости испарения капель  $TiO_2/H_2O$  (30 ppm) над каплями дистиллированной воды.

где  $\rho$ ,  $V$  – плотность и объем капли, соответственно;  $D$  – контактный диаметр капли. Здесь для простой оценки величины  $q_{под}$  площадь поверхности капли условно принимаем равной площади ее основания.

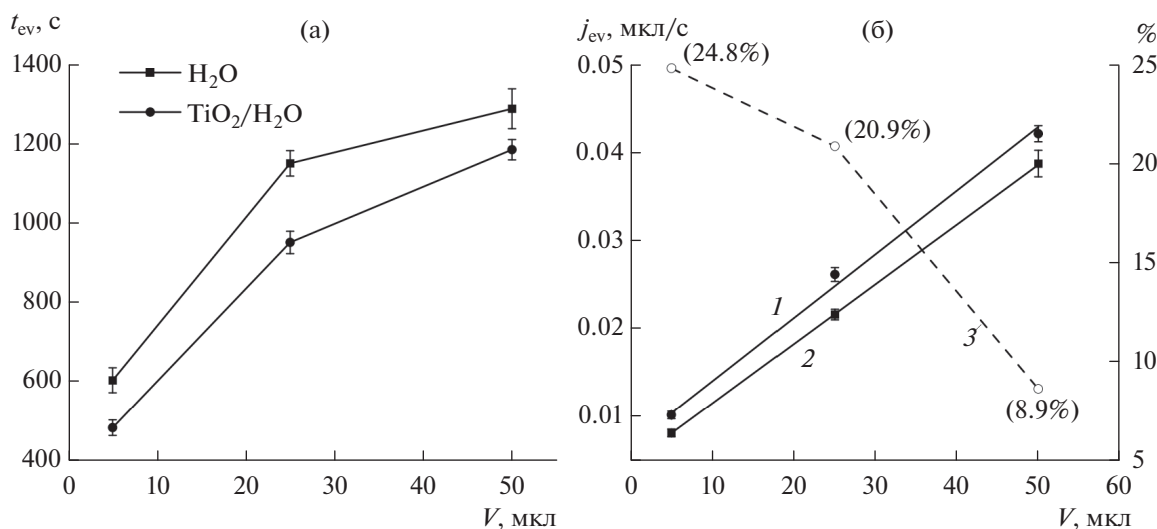
Из соотношения (3) видно, что по мере повышения угла  $\phi$  процесс испарения длительнее из-за уменьшения средней плотности подведенного потока тепла  $q_{под}$ . Оценим  $q_{под}$  по формуле (3) для капель дистиллированной воды при следующих параметрах:  $\rho(25^\circ\text{C}) = 997.05 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $V = 50 \text{ мкл} = 50 \times 10^{-9} \text{ м}^3$ ;  $D \approx 8 \times 10^{-3} \text{ м}$ ;  $r = 2256.4 \text{ кДж}/\text{кг}$ . Получено, что при угле  $\phi$ , равном  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ , средняя плотность подведенного потока тепла  $q_{под}$  равна 3.6, 2.9 и 1.7  $\text{кВт}/\text{м}^2$ . Отсюда получено, что при облучении капель сверху к капле подводится наибольшее количество тепла, что приводит к максимальной скорости испарения. Здесь необходимо отметить, что динамика процесса испарения капель наножидкостей (гистерезис контактных углов, форма капель, характер движения и распределения наночастиц внутри капель) существенно зависит от направления облучения. Поэтому эффекты, наблюдающиеся при изменении направления облучения, представляют собой интересные явления и заслуживают отдельного исследования.

#### Влияние объема капель и материала подложек

Исследование влияния объема капель на их скорость испарения было выполнено на алюминиевой подложке при угле  $\phi$ , равном  $90^\circ$ . Определено, что скорость испарения капель линейно за-

висит от их объема (рис. 7). Такая зависимость была предсказана Пикнеттом и Бексоном более 40 лет назад [19] и также получена в других работах [20]. Здесь скорость испарения капель увеличивается по мере повышения объема капли (рис. 7б), поскольку рост объема приводит к увеличению поверхности капли и к увеличению плотности подведенного к капле потока тепла  $q_{под}$  за счет падающего излучения, что также следует из соотношения (3). При этом при росте объема приращение скорости испарения капель  $TiO_2/H_2O$  30 ppm над каплями дистиллированной воды падает (рис. 7б), что связано с увеличением времени испарения капель  $t_{ev}$  (рис. 7а).

В рамках данного исследования также рассмотрено влияние типа подложки на скорость испарения капель дистиллированной воды и  $TiO_2/H_2O$  30 ppm с объемом 5 мкл (рис. 8). Определено, что капли на кремниевой подложке испаряются с наибольшей скоростью по сравнению со скоростями испарения капель на стеклянной и алюминиевой подложках (рис. 8а). Но приращение скорости испарения капель  $TiO_2/H_2O$  30 ppm по сравнению с каплями дистиллированной воды на кремниевой подложке является наименьшим (15.7%). В то же время капля  $TiO_2/H_2O$  30 ppm на алюминиевой подложке демонстрирует наиболее высокую эффективность (приращение составляет 24.8%) (рис. 8а). Важно отметить, что стеклянная и алюминиевая подложки, помимо различий свойств материалов, отличаются между собой характеристиками поверхности. Во-первых, отличие в материале и шероховатости приводит к разнице в углах смачивания (рис. 8б). Среди исследуемых подложек стеклянная подложка обладает наилучшей смачи-



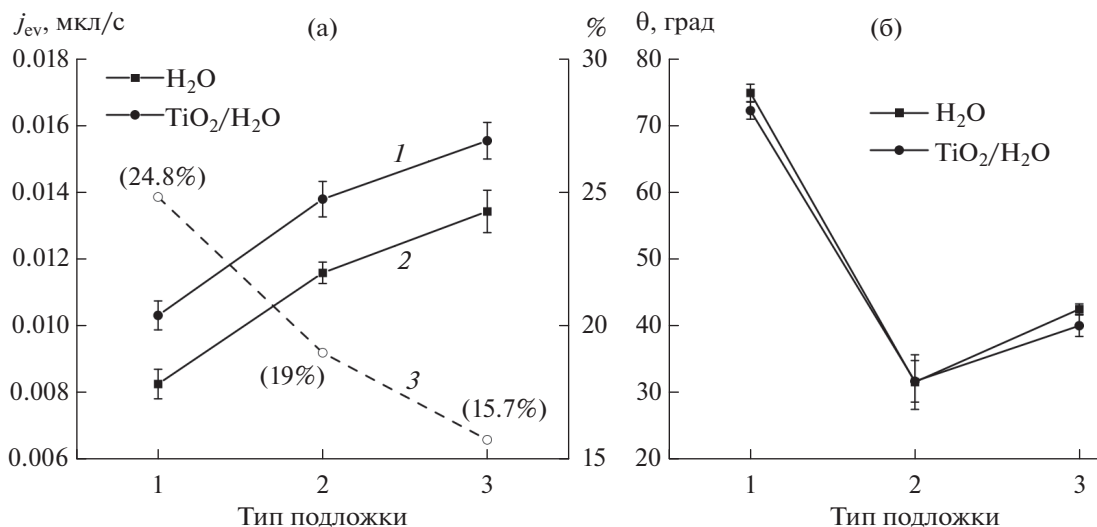
**Рис. 7.** Влияние объема капли на время высыхания (а) и скорость испарения при облучении под углом  $90^\circ$  (б): 1 – скорость испарения капель  $TiO_2/H_2O$  (30 ppm), 2 – скорость испарения капель дистиллированной воды, 3 – относительное приращение скорости испарения капель  $TiO_2/H_2O$  (30 ppm) относительно капель дистиллированной воды.

ваемостью водой ( $\theta \sim 32^\circ$ ), а алюминиевая подложка обладает наихудшей смачиваемостью ( $\theta \sim 75^\circ$ ). Во-вторых, теплофизические и оптические свойства этих подложек также отличаются между собой, что сильно влияет на процесс теплообмена между каплей и поверхностью подложки. С одной стороны, теплофизические свойства материала определяют значение термического сопротивления процессу передачи тепла от капли через ее основание к поверхности подложки. Известно, что при температуре  $25^\circ C$  коэффициент теплопроводности алюминия, стекла и кремния приблизительно равен: 237, 1 и 150 Вт/(м К). В рассматриваемом случае, поскольку геометрия капель и физические процессы внутри капли для разных подложек почти одинаковые, можно предложить, что термическое сопротивление теплоотдачи для трех подложек сравнительно одинаково. Более того, алюминиевая подложка имеет наименьшее термическое сопротивление теплопроводности, так как она обладает наибольшим коэффициентом теплопроводности. Таким образом, алюминиевая подложка имеет наименьшее суммарное термическое сопротивление, что, по-видимому, приводит к более интенсивным потерям теплоты каплей через подложку. Приведенное рассуждение помогает разъяснить возможную причину того, почему капля на алюминиевой пластине испаряется медленнее. С другой стороны, оптические свойства (степень черноты) определяют, насколько хорошо подложки поглощают падающее излучение, что будет замедлять процесс потерь теплоты от капли к подложке или даже приведет к дополнительному подводу теплоты от подложки к капле.

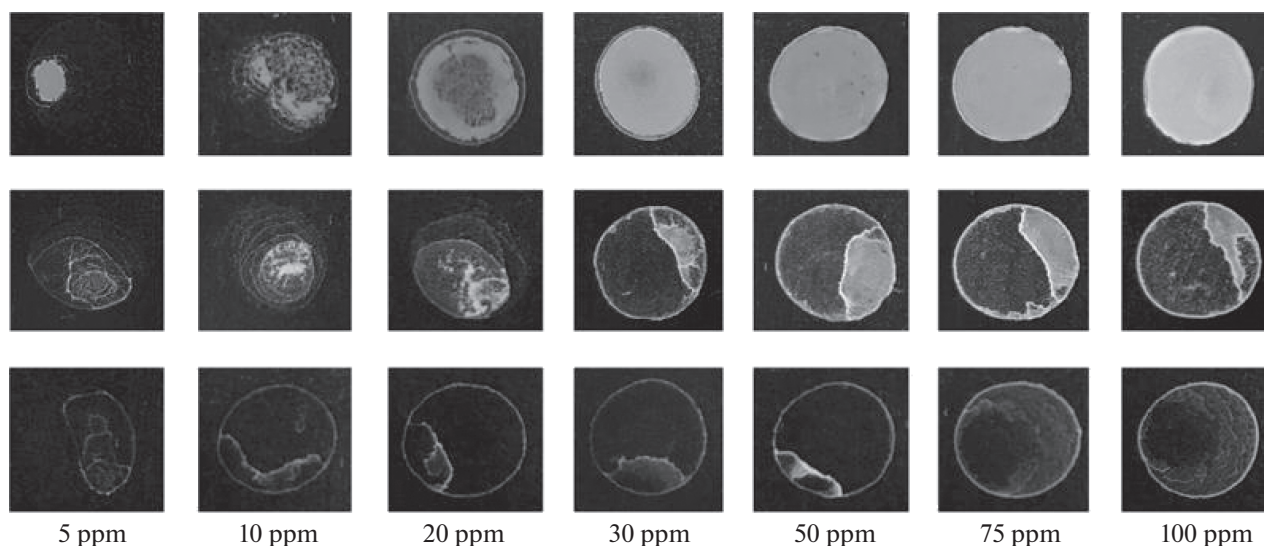
#### Морфологии осадочной структуры капель

Полученные морфологии осадочной структуры капель объемом 50 мкл при исследовании процесса испарения с облучением под углом  $0^\circ$  на алюминиевой подложке представлены на рис. 9 и 10. Получено, что морфологии осадочной структуры капель меняются как в зависимости от объемной концентрации, так и от вида материала наночастиц (рис. 9). Для капель  $TiO_2/H_2O$ ,  $ND/H_2O$  и  $SiO_2/H_2O$  можно заметить, что морфологии осадочной структуры преобразуются в единообразную структуру при достижении критической концентрации наночастиц. Поскольку капли с концентрацией менее критического значения испаряются по режиму “прилипания–скольжения”, то в результате образуется осадок со многокольцевой структурой. Капли  $ND/H_2O$  с критической и более высокой концентрациями испаряются по режиму SCL без фазы “скольжения”, поэтому в итоге процесса испарения получается осадок с одним кольцом. При этом по мере повышения концентрации внутри кольца образуется однородная пленка из наночастиц алмаза. Более того, расстояние между пленкой и кольцом уменьшается при повышении концентрации наночастиц. Для капель  $TiO_2/H_2O$  и  $SiO_2/H_2O$  при критической и более высокой концентрациях, помимо режима SCL, в конечной стадии процесса испарения реализуется одна короткая и резкая фаза “скольжения”, что приводит к образованию единственного кольца с “островом” наночастиц. Для капель  $TiO_2/H_2O$  данная структура наблюдалась при всех концентрациях выше критического значения (от 30 до 100 ppm), в то время как для капель  $TiO_2/H_2O$  структура един-





**Рис. 8.** Влияние материала подложек на скорость испарения (а) и начальный угол смачивания каплями (б), где на горизонтальной оси координат обозначены: 1 – алюминиевая; 2 – стеклянная; 3 – кремниевая подложки. На рисунке (а) обозначены следующие линии: 1 – скорость испарения капель  $TiO_2/H_2O$  (30 ppm), 2 – скорость испарения капель дистиллированной воды, 3 – относительное приращение скорости испарения капель  $TiO_2/H_2O$  (30 ppm) над каплями дистиллированной воды.



**Рис. 9.** Морфологии осадочной структуры капель наножидкостей ND/ $H_2O$  (1-й ряд),  $TiO_2/H_2O$  (2-ой ряд),  $SiO_2/H_2O$  (3-й ряд).

ственного кольца с “островом” наночастиц определялась только в диапазоне от 10 до 50 ppm. Дальнейшее повышение объемной концентрации наночастиц  $SiO_2$  приводит к образованию структуры с пленкой (рис. 9). Относительно толщины кольца (рис. 9) можно заметить, что она увеличивается по мере повышения объемной концентрации наночастиц. Более того, среди исследуемых наножидкостей осадок капель ND/ $H_2O$  имеет наименьшую толщину кольца (~23 мкм), в то время как толщина

кольца капель  $TiO_2/H_2O$  и  $SiO_2/H_2O$  приблизительно одинакова (~150 мкм) и почти в 6.5 раз больше, чем толщина кольца капель ND/ $H_2O$  (рис. 10).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного исследования был изучен процесс испарения капель наножидкостей при воздействии внешнего радиационного потока в зависимости от ряда факторов, включая объем

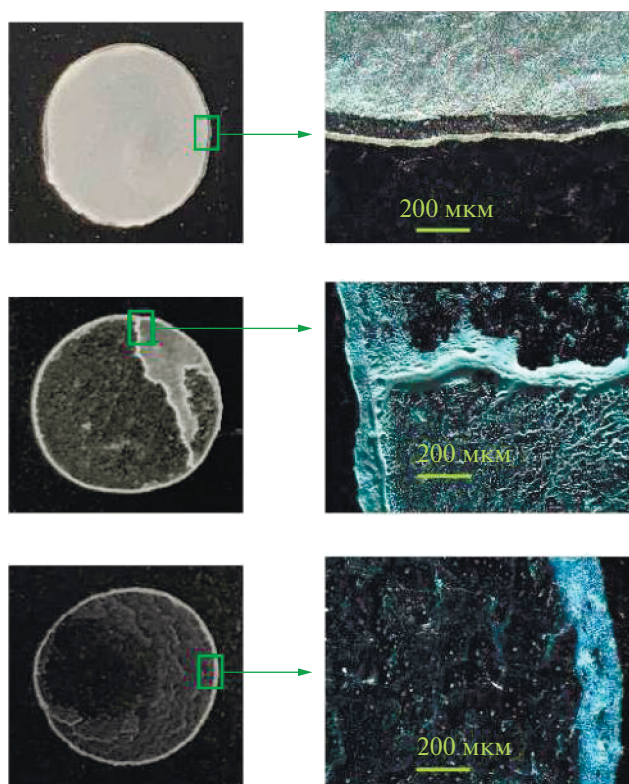


Рис. 10. Местный вид осадочной структуры капель наножидкостей при объемной концентрации 100 ppm.

капель, материал наночастиц, их концентрацию, направление облучения и материалы подложек. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. По мере повышения объемной концентрации наночастиц обнаружено, что скорость испарения сначала резко увеличивается и затем выходит на стабильный уровень при достижении критической концентрации. Подобная тенденция изменения скорости испарения также наблюдалась в исследовании [38] для капель на основе наночастиц Au. Впервые определены критические концентрации для исследуемых наножидкостей на основе воды с добавлением частиц  $\text{TiO}_2$ , ND и  $\text{SiO}_2$ , которые составили 30, 20 и 10 ppm соответственно.

2. Показано, что под действием внешнего излучения капли испаряются в основном в двух режимах: режим “прилипания–скольжения” и режим постоянного контактного диаметра. Первый режим характерен для капель первой группы, где капли содержат наночастицы меньше критического значения. Второй режим реализуется у капель с критической или более высокой концентрациями наночастиц. Кроме того, весь процесс испарения всех капель можно разделить на три стадии: начальная стадия с растеканием капель, основная и конечная стадии. Требуется дополнительное исследование указанных режимов.

3. Получено, что скорость испарения капель существенно зависит от направления их облучения. При повышении угла между поверхностями солнечного имитатора и подложки от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , приращение скорости капель  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm над каплями дистиллированной воды уменьшается с 32.5 до 8.9% соответственно. Отсюда следует, что наиболее эффективно капли испаряются при их облучении сверху, т.е. при угле  $\varphi$ , равном  $0^\circ$ .

4. Получено, что скорость испарения капель наножидкостей линейно зависит от их объема. При этом по мере повышения объема капель их скорость испарения увеличивается. Более того, приращение скорости испарения капель наножидкостей по сравнению с каплями воды уменьшается при увеличении их объема.

5. Показано, что тип материала подложек также влияет на эффективность испарения капель. В данном исследовании получено, что капли на алюминиевой подложке испаряются медленнее по сравнению с испарением на стеклянной и кремниевой подложках. Тем не менее капли на алюминиевой подложке демонстрировали наиболее высокую эффективность испарения. Данное обстоятельство обусловлено тем, что абсолютное приращение скорости испарения капель  $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}$  30 ppm над каплями дистиллированной воды почти одинаково для всех рассматриваемых подложек.

6. Результаты исследования показали, что морфологии осадочной структуры капель меняются как в зависимости от объемной концентрации, так и от вида материала наночастиц. При этом показано, что морфологии преобразуются в единообразную структуру при достижении критической концентрации наночастиц.

7. Представляется необходимым разработку новых моделей для испарения капель наножидкостей при внешнем радиационном нагреве.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 23-19-00840).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brutin D., Starov V.* Recent advances in droplet wetting and evaporation // *Chem. Soc. Rev.* 2018. V. 47. № 2. P. 558–585. <https://doi.org/10.1039/c6cs00902f>
2. *Дмитриев А.С., Клименко А.В.* Преобразование солнечного излучения в пар – новые возможности на основе наноматериалов (обзор) // *Теплоэнергетика.* 2020. № 2. С. 1–16. <https://doi.org/10.1134/S0040363620020010>

3. *Дмитриев А.С., Клименко А.В.* Перспективы использования двумерных наноматериалов в энергетических технологиях (обзор) // Теплоэнергетика. 2023. № 8. С. 3–26.  
<https://doi.org/10.56304/S0040363623080015>
4. *Дмитриев А.С., Макаров П.Г.* Об испарении жидкости из капель коллоидных растворов наночастиц SiO<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Коллоид. журн. 2015. Т. 77. № 2. С. 144–151.  
<https://doi.org/10.7868/S0023291215020068>
5. *Хлебцов Б.Н.* Функциональные наночастицы: синтез и практические применения // Коллоид. журн. 2023. Т. 85. № 4. С. 399–402.  
<https://doi.org/10.31857/S0023291223600426>
6. *Parsa M., Harmand S., Sefiane K.* Mechanisms of pattern formation from dried sessile drops // Adv. Colloid Interface Sci. 2018. V. 254. P. 22–47.  
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2018.03.007>
7. *Larson R.G.* Transport and deposition patterns in drying sessile droplets // AIChE J. 2014. V. 60. № 5. P. 1538–1571.  
<https://doi.org/10.1002/aic.14338>
8. *Zaaroura I., Harmand S., Carlier J. et al.* Experimental studies on evaporation kinetics of gold nanofluid droplets: Influence of nanoparticle sizes and coating on thermal performance // Appl. Therm. Eng. 2020. V. 183. P. 116180.  
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116180>
9. *Минаков А.В., Лобасов А.С., Пряжников М.И. и др.* Экспериментальное исследование влияния наночастиц на процессы испарения жидкостей // Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 1. С. 33–41.  
<https://doi.org/10.21883/JTF.2020.01.48657.61-19>
10. *Стерлягов А.Н., Низовцев М.И.* Экспериментальное исследование испарения капель воды и наножидкости на поверхности материалов с разной теплопроводностью // Коллоид. журн. 2023. Т. 84. № 1. С. 85–92.  
<https://doi.org/10.31857/S0023291222600511>
11. *Есипова Н.Е., Ицков С.В., Соболев В.Д.* Гистерезис краевого угла на твердых кристаллических поверхностях // Коллоид. журн. 2023. Т. 85. № 2. С. 158–166.  
<https://doi.org/10.31857/S0023291222600602>
12. *Савенко О.А., Лебедев-Степанов П.В.* Квазистационарное испарение малой капли жидкости на плоской подложке: аналитическое решение в биполярных координатах // Коллоид. журн. 2022. Т. 84. № 3. С. 328–337.  
<https://doi.org/10.31857/S0023291222030119>
13. *Wcislik S., Mukherjee S.* Evaluation of three methods of static contact angle measurements for TiO<sub>2</sub> nanofluid droplets during evaporation // Phys. Fluids. 2022. V. 34. № 6. P. 062006.  
<https://doi.org/10.1063/5.0096644>
14. *Siddiqui F.R., Tso C.Y., Fu S.C. et al.* Droplet evaporation and boiling for different mixing ratios of the silver-graphene hybrid nanofluid over heated surfaces // Int. J. Heat Mass Transf. 2021. V. 180. P. 121786.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121786>
15. *Katre P., Balusamy S., Banerjee S. et al.* Evaporation dynamics of a sessile droplet of binary mixture laden with nanoparticles // Langmuir. 2021. V. 37. № 20. P. 6311–6321.  
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c00806>
16. *Chen P., Harmand S., Szunerits S. et al.* Evaporation behavior of PEGylated graphene oxide nanofluid droplets on heated substrate // Int. J. Therm. Sci. 2019. V. 135. P. 445–458.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.030>
17. *Кузнецов Г.В., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г., Батушцева К.А.* Режимы испарения капли воды на медных подложках // Коллоид. журн. 2016. Т. 78. № 3. С. 319–324.  
<https://doi.org/10.7868/S0023291216030083>
18. *Parsa M., Boubaker R., Harmand S. et al.* Patterns from dried water-butanol binary-based nanofluid drops // J. Nanoparticle Res. 2017. V. 19. № 8. P. 268.  
<https://doi.org/10.1007/s11051-017-3951-2>
19. *Picknett R.G., Bexon R.* The evaporation of sessile or pendant drops in still air // J. Colloid Interface Sci. 1977. V. 61. № 2. P. 336–350.  
[https://doi.org/10.1016/0021-9797\(77\)90396-4](https://doi.org/10.1016/0021-9797(77)90396-4)
20. *Oregon D., Shanahan M.E., Takata Y., Sefiane K.* Kinetics of evaporation of pinned nanofluid volatile droplets at subatmospheric pressures // Langmuir. 2016. V. 32. № 23. P. 5812–5820.  
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b00753>
21. *Minakov A.V., Lobasov A.S., Pryazhnikov M.I. et al.* Experimental study of the influence of nanoparticles on evaporation of fluids // Tech. Phys. 2020. V. 65. № 1. P. 29–36.  
<https://doi.org/10.1134/S1063784220010181>
22. *Siddiqui F.R., Tso C.Y., Fu S.C., Qiu H.H., Chao C.Y.* Evaporation and wetting behavior of silver-graphene hybrid nanofluid droplet on its porous residue surface for various mixing ratios // Int. J. Heat Mass Transf. 2020. V. 153. P. 119618.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119618>
23. *Zaaroura I., Toubal M., Carlier J., Harmand S., Non-gaillard B.* Nanofluids dynamic viscosity evolution using high-frequency acoustic waves: Application applied for droplet evaporation // J. Mol. Liq. 2021. V. 341. P. 117385.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117385>
24. *Chen P.* Enhancement of drops evaporation using nanoparticles and alcohols. Mechanics [physics.med-ph]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2018. English.
25. *Shin D.H., Choi C.K., Kang Y.T., Lee S.H.* Local aggregation characteristics of a nanofluid droplet during evaporation // Int. J. Heat Mass Transf. 2014. V. 72. P. 336–344.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.023>
26. *Brutin D.* Influence of relative humidity and nanoparticle concentration on pattern formation and evaporation rate of pinned drying drops of nanofluids // Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp. 2013. V. 429. P. 112–120.  
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.03.012>
27. *Osman A., Shahidzadeh N., Stitt H., Shokri N.* Morphological transformations during drying of surfactant-nanofluid droplets // J. Ind. Eng. Chem. 2018. V. 67.

- P. 92–98.  
<https://doi.org/10.1016/j.jieec.2018.06.019>
28. Lee H.H., Fu S.C., Tso C.Y., Chao C.Y. Study of residue patterns of aqueous nanofluid droplets with different particle sizes and concentrations on different substrates // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. V. 105. P. 230–236.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.093>
29. Wu H., Briscoe W.H. Morphogenesis of polycrystalline dendritic patterns from evaporation of a reactive nanofluid sessile drop // *Phys. Rev. Mater.* 2018. V. 2. № 4. P. 045601.
30. Wasik P., Redeker C., Dane T.G. Hierarchical surface patterns upon evaporation of a ZnO nanofluid droplet: Effect of particle morphology // *Langmuir.* 2018. V. 34. № 4. P. 1645–1654.  
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b03854>
31. Gultekinoglu M., Jiang X., Bayram C. et al. Self-assembled micro-stripe patterning of sessile polymeric nanofluid droplets // *J. Colloid Interface Sci.* 2020. V. 561. P. 470–480.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.11.021>
32. Askounis A., Sefiane K., Koutsos V., Shanahan M.E. Effect of particle geometry on triple line motion of nanofluid drops and deposit nano-structuring // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. V. 222. P. 44–57.  
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.05.003>
33. Amjad M., Yang Y., Raza G. et al. Deposition pattern and tracer particle motion of evaporating multi-component sessile droplets // *J. Colloid Interface Sci.* 2017. V. 506. P. 83–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.025>
34. Wąsik P., Seddon A.M., Wu H., Briscoe W.H. Bénard–Marangoni dendrites upon evaporation of a reactive ZnO nanofluid droplet: Effect of substrate chemistry // *Langmuir.* 2019. V. 35. № 17. P. 5830–5840.  
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b00109>
35. Bigdeli M.B., Tsai P.A. Making photonic crystals via evaporation of nanoparticle-laden droplets on superhydrophobic microstructures // *Langmuir.* 2020. V. 36. № 17. P. 4835–4841.  
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00193>
36. Wąsik P., Seddon A.M., Wu H., Briscoe W.H. Dendritic surface patterns from Bénard–Marangoni instabilities upon evaporation of a reactive ZnO nanofluid droplet: A fractal dimension analysis // *J. Colloid Interface Sci.* 2019. V. 536. P. 493–498.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.10.077>
37. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторёв Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Особенности испарения капли при лучистом и конвективном нагреве // *Письма в журнал технической физики.* 2020. V. 46. № 8. P. 25–28.  
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.08.49304.18209>
38. Xu J., Yan X., Liu G., Xie J. The critical nanofluid concentration as the crossover between changed and unchanged solar-driven droplet evaporation rates // *Nano Energy.* 2019. V. 57. P. 791–803.  
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.01.013>
39. Awais M., Bhuiyan A.A., Salehin S. et al. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview // *International Journal of Thermofluids.* 2021. V. 10. P. 100086.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100086>