

УДК 536.246

Экспериментальное исследование скорости капиллярного подъема водо-спиртовых смесей на модифицированных поверхностях*

М.В. Горбачев¹, М.С. Макаров^{1,2}, А.И. Сюзаев¹, В.И. Терехов^{1,2}

¹Новосибирский государственный технический университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: m.gorbachev@corp.nstu.ru

Проведено экспериментальное исследование динамики смачивания модифицированных капиллярно-пористых поверхностей, изготовленных из алюминия и титана, при условии свободно-конвективного теплообмена с окружающей средой. Установлено влияние концентрации этилового спирта и начальной его температуры на скорость движения фронта смачивания. Объемная концентрация спирта в смеси варьировалась в пределах $0 \div 95,5$ %. Выявлены характерные режимы изменения высоты подъема жидкости по капиллярно-пористым поверхностям во времени в виде степенных зависимостей.

Ключевые слова: тепломассообмен, пограничный слой, модифицированная поверхность, капиллярно-пористая поверхность, водо-спиртовая смесь, испарение.

В последнее время одной из активно изучаемых проблем в области охлаждения высокодиссипативных приборов является возможность практического применения супергидрофильных поверхностей, позволяющих за достаточно короткие промежутки времени подводить рабочую жидкость к охлаждаемому элементу за счет высокого капиллярного давления и рассеивать большие тепловые потоки благодаря фазовому переходу жидкость – пар и низкому термическому сопротивлению. Исследователям известно множество подобных структур поверхностей: пористая структура [1, 2], вертикальные микростолбики [3, 4], открытые микроканавки [5 – 15], спеченные покрытия [16], вертикальные микростолбики, совмещенные с микровпадинами [17].

На сегодняшний день в литературе приведено довольно много экспериментальных работ, направленных на изучение динамики движения жидкости по капиллярной поверхности. Так, авторы [12] при исследовании динамики капиллярного потока жидкости в массиве открытых наноструктурированных микроканавок, полученных фемтосекундной лазерной обработкой кремния, установили, что капиллярные характеристики материала улучшаются при повышении температуры от 23 до 60 °С в инерционном, вязкоинерционном режимах и частично в режиме вязкого течения (режим Уошберна [13]).

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (код проекта 20-08-00717 А).

Позже этим же коллективом авторов в работе [14] исследовалась поверхность, подобная поверхности, представленной в работе [12], при температурах пластины от 23 до 120 °С, и было установлено наличие во временной области перед вязко-инерциальным режимом максимальной скорости распространения деионизированной воды, составляющей около 450 мм/с при температуре образца 23 °С, а также отсутствие динамики, описанной в работе [13], при температуре свыше 80 °С ввиду преобладания влияния испарения и кипения. Помимо перечисленных выше результатов высокую скорость распространения жидкости по капиллярной поверхности, основанной на массиве открытых микроканалов, также отмечали другие исследователи [5, 6, 9–11, 15, 17].

Важным фактором в динамике распространения жидкости по модифицированной поверхности является наличие нано-микровключений. В работе [18] удалось установить, что микроструктуры, полученные на массиве открытых V-образных микроканалов в результате коррозионной обработки образца, позволяют увеличить высоту капиллярного подъема примерно на 96 %. Исследователи [9] пришли к выводу, что титановое нанопокрывание, нанесенное на микронаногибридные прямоугольные канавки, комплексно улучшает гидрофильные свойства материала и положительно влияет на динамику распространения рабочей жидкости. В работе [6] было установлено, что наличие наноструктуры на поверхности микроканалов приводит к заметному увеличению общей длины смачивания поверхности рабочей жидкостью, а максимальный прирост коэффициента теплоотдачи может приближаться к 100 %. В большей части указанных работ основной упор был сделан на выявлении оптимальных геометрических параметров, структуре и оценке впитывающей способности супергидрофильных поверхностей.

В представленной работе приведены результаты экспериментального исследования процесса испарения водно-этаноловой смеси с модифицированной капиллярно-пористой поверхности при условии свободно-конвективного теплообмена. Настоящее исследование позволяет получить данные об эффективности использования бинарных смесей в качестве рабочей жидкости для охлаждения капиллярно-пористых поверхностей в совокупности с контролируемыми параметрами окружающей среды и самой жидкостью. Возможность практического применения этих данных для капиллярно-пористых структур в системах охлаждения и теплообменных устройствах является важным результатом исследования.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Рабочий участок представляет собой модифицированную поверхность, которая посредством координатного узла может перемещаться в вертикальной плоскости. Методика проведения эксперимента была следующая.

1. В кювету блока термостабилизации заливается смесь, представляющая собой жидкость с известным составом. Далее эта жидкость подвергается охлаждению или нагреву до требуемой температуры t_V с помощью управляемых элементов Пельтье, расположенных на дне кюветы.
2. После достижения стационарного режима охлаждения нижняя часть пластины с модифицированным участком помещается в жидкость.
3. За счет действия капиллярных сил жидкость поднимается по модифицированному участку. Динамика изменения высоты подъема жидкости фиксируется с помощью видеокамеры.

Объект исследований — пластины, изготовленные из алюминия и титана, с модифицированными за счет фемтосекундного лазерного излучения поверхностями. Изображения модифицированной пластины, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000 ЦКП ИНХ СО РАН, представлены на рис. 2 с увеличением

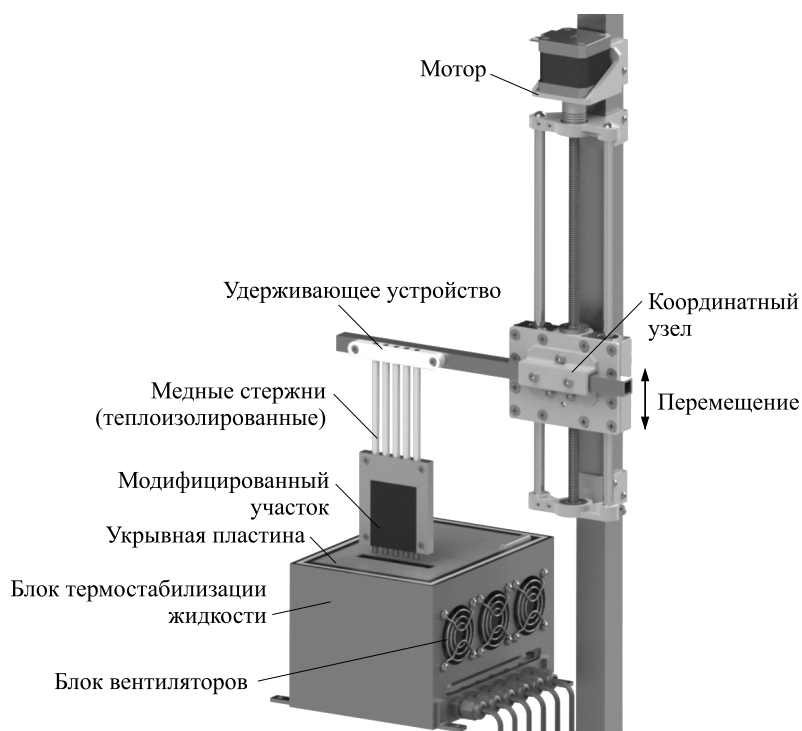


Рис. 1. Принципиальная схема рабочего участка установки.

в 40, 100 и 500 раз. Видно, что регулярные вертикальные канавки на алюминиевой пластине имеют неровные стенки с крупными элементами шероховатости, кроме того, часто встречаются крупные поперечные перегородки. Характерный размер канавок составляет 80 мкм, они обладают развитой микроструктурой на стенках размером 10–20 мкм. Выступы имеют удлиненную форму и ориентированы под углом к канавке преимущественно в одну сторону.

Авторами была проведена серия экспериментов по исследованию динамики изменения высоты подъема жидкости известного состава на модифицированной поверхности при различных температурах окружающей среды. Рабочая жидкость представляла собой смесь дистиллированной воды и этилового спирта. В таблице приведены характеристики состава смеси жидкости.

На рис. 3 показаны результаты обработки экспериментальных данных, полученных на модифицированной поверхности, изготовленной из титана (эксперименты проводились при температуре жидкости в кювете $t_f = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$). В подписной подпункте используются следующие обозначения: t_0 — температура окружающей среды, φ_0 — относительная влажность среды, K — объемная концентрация этилового спирта в смеси.

Таблица

Состав смеси

Объем компонента, мл		Объемная концентрация спирта смеси (K), % об.
Этиловый спирт (ректификат)	Дистиллированная вода	
100	0	95,5
80	20	76,4
60	40	57,3
40	60	38,2
20	80	19,1
0	100	0

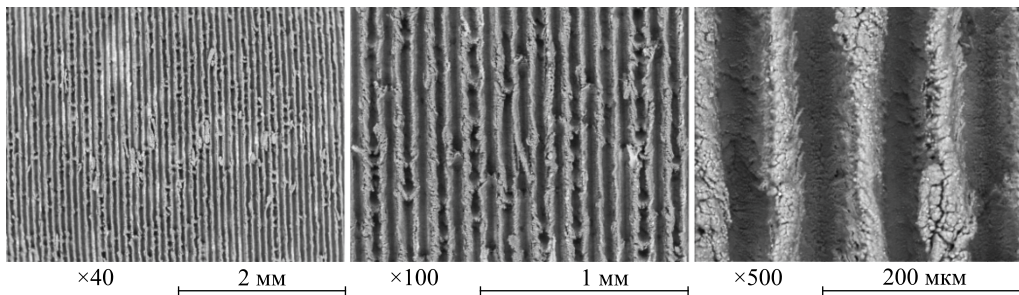


Рис. 2. Изображение модифицированной части поверхности пластины из алюминия, полученное методом сканирующей электронной микроскопии с увеличением в 40, 100 и 500 раз.

Из полученных результатов видно, что увеличение объемной доли этилового спирта в смеси приводит к увеличению времени подъема столба жидкости по модифицированной поверхности (и, следовательно, к уменьшению скорости смачивания). Такое поведение можно объяснить физическими свойствами жидкостей: капиллярная постоянная для воды — 3,8 мм, для этанола — 2,4 мм. Т.е. при условии полной смачиваемости стенок и водой и спиртом столб воды в капилляре модифицированной поверхности окажется выше, а значит и заполняться он будет быстрее. Максимальная высота подъема жидкости ($h = 50$ мм) обусловлена высотой модифицированного участка поверхности пластины.

На рис. 4 приведены фотографии типичных картин фронта смачивания поверхности модифицированной пластины, изготовленной из титана, в различные промежутки

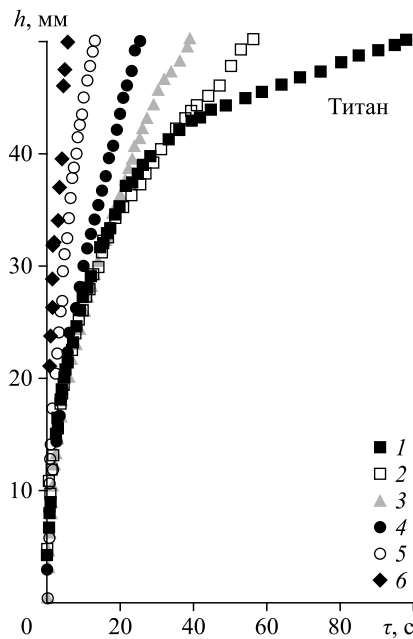


Рис. 3. Динамика изменения высоты подъема смеси жидкости на модифицированной поверхности при условиях свободной конвекции.

- 1 — $K = 95,5$ % об., $t_0 = 23$ °C, $\varphi_0 = 24$ %,
- 2 — $K = 76,4$ % об., $t_0 = 23$ °C, $\varphi_0 = 24$ %,
- 3 — $K = 57,3$ % об., $t_0 = 21$ °C, $\varphi_0 = 28$ %,
- 4 — $K = 38,2$ % об., $t_0 = 19$ °C, $\varphi_0 = 24$ %,
- 5 — $K = 19,1$ % об., $t_0 = 18$ °C, $\varphi_0 = 18$ %,
- 6 — $K = 0$ % об., $t_0 = 16$ °C, $\varphi_0 = 20$ %,

времени τ от начала процесса. Пунктирными линиями обозначена средняя высота фронта жидкости. Результаты получены при следующих параметрах: $t_V = 15$ °C, $t_0 = 21$ °C, $\varphi_0 = 28$ %, $K = 57,3$ %, что соответствует зависимости, обозначенной на рис. 3 треугольными маркерами.

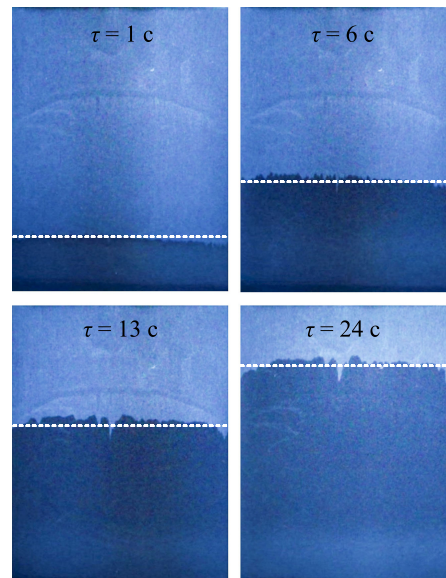


Рис. 4. Смачивание модифицированной поверхности титановой пластины.

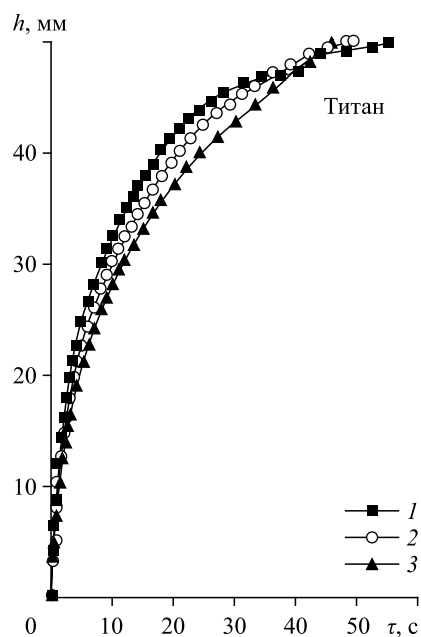


Рис. 5. Влияние начальной температуры жидкости при $K = 95,5$ % об.

1 — $t_V = 50$ °C, $t_0 = 28$ °C, $\varphi_0 = 26$ %,
 2 — $t_V = 40$ °C, $t_0 = 23$ °C, $\varphi_0 = 30$ %,
 3 — $t_V = 15$ °C, $t_0 = 19$ °C, $\varphi_0 = 41$ %.

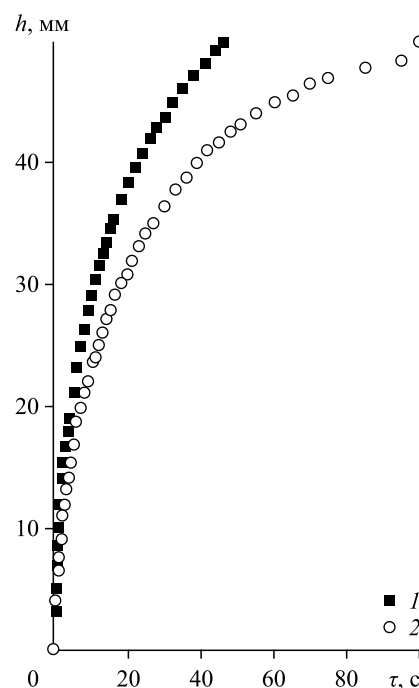


Рис. 6. Влияние материала модифицированной пластины при $t_V = 15$ °C, $K = 95,5$ % об.

1 — титан: $t_0 = 22$ °C, $\varphi_0 = 43$ %,
 2 — алюминий: $t_0 = 21$ °C, $\varphi_0 = 44$ %.

Влияние средней температуры жидкости на динамику изменения высоты подъема показано на рис. 5. Результаты получены при использовании чистого технического этилового спирта с $K = 95,5$ %. Из рисунка видно, что при более высокой температуре жидкости процесс протекает более интенсивно. Однако отличие в скорости подъема жидкости наблюдается до времени порядка 40 с, после чего кривые начинают совпадать. Этот факт можно объяснить тем, что по мере подъема по модифицированной поверхности происходит тепло- и массообмен с окружающей средой, в результате чего температура жидкости стремится к значению температуры мокрого термометра.

Рисунок 6 иллюстрирует сравнение динамики подъема фронта жидкости для модифицированных пластин из алюминия и титана.

Все эксперименты проводились практически при одинаковой температуре и влажности окружающего воздуха. Приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что применение модифицированных участков, изготовленных из титана, может обеспечивать более высокую скорость распространения фронта смачивания (в 1,5–2,5 раза).

Как видно из рис. 3, 5, 6, скорость подъема жидкости сильно отличается в различные моменты времени. Анализ полученных данных показывают наличие следующих режимов изменения высоты смачивания поверхностей:

— $h \sim \tau^1$ — высота линейно зависит от времени (начальные моменты времени);

— $h \sim \tau^{1/2}$ — универсальный закон капиллярного потока, при котором капиллярная сила уравнивается вязким сопротивлением;

— $h \sim \tau^{1/3}$ — менее интенсивное изменение высоты подъема.

Указанные режимы смачивания вертикальных модифицированных поверхностей были отмечены в работах [14] и [19].

Заключение

По результатам исследования динамики изменения высоты подъема водно-этаноловых смесей известного состава на супергидрофильных капиллярно-пористых поверхностях в условиях свободной конвекции можно сделать следующие выводы.

1. Уменьшение концентрации этанола в растворе приводит к увеличению скорости распространения рабочей жидкости по модифицированной поверхности и, как следствие, уменьшению времени достижения противоположного края структурированной области примерно в 18 раз для смеси с $K = 0$ относительно смеси с $K = 95,5\%$, что обусловлено большим значением капиллярной постоянной для воды, чем для этанола.

2. Модификация, полученная на поверхности титана, позволяет увеличить скорость распространения рабочей жидкости примерно в два раза в сравнении с модифицированным алюминием.

3. Наблюдались известные из литературы зависимости расстояния распространения рабочей жидкости от времени: стадия инерционного течения, стадия вязкого течения (режим Уошберна) и стадия, соответствующая балансу капиллярного движения и вязких и гравитационных сил, что свидетельствует об универсальности приведенных режимов для различных поверхностей и рабочих температур.

Представленные результаты важны для дальнейшего изучения процесса тепломассообмена, протекающего при испарении пленок жидкостей на супергидрофильных капиллярно-пористых поверхностях в условиях свободной конвекции. Они позволяют использовать такие структуры в различных отраслях промышленности и в тепломассообменных аппаратах, работающих на испарительных циклах.

Список литературы

1. Chen F., Subramaniam Y., Sanjeev C. Capillary rise of liquids in thermally sprayed porous copper wicks // *Experimental Thermal and Fluid Sci.* 2018. Vol. 98. P. 206–216.
2. Chen F., Sanjeev C. Evaporation of ethanol films wicking on structured, porous coatings deposited on copper plates // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 136. P. 821–831.
3. Solomon A., Dion A., Rishi R., Evelyn N.W. Design of micropillar wicks for thin-film evaporation // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 101. P. 280–294.
4. Nam Y., Sharratt S., Cha G., Ju Y.S. Characterization and modeling of the heat transfer performance of nanostructured Cu micropost wicks // *J. of Heat Transfer*. 2011. Vol. 133, No. 10. P. 101502-1–101502-7.
5. Vorobyev A., Guo C. Water sprints uphill on glass // *J. of Applied Physics*. 2010. Vol. 108. P. 123512-1–123512-4.
6. Wenbin Z., Xuegong H., Yu H., Yingying Y., Lan M. Study on axial wetting length and evaporating heat transfer in rectangular microgrooves with superhydrophilic nano-textured surfaces for two-phase heat transfer devices // *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 200. P. 112098-1–112098-14.
7. Ram R., Jayathi Y.M., Suresh V.G. A microscale model for thin-film evaporation in capillary wick structures // *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 54, Iss. 1–3. P. 169–179.
8. Wenbin Z., Yijun L., Xinlong D., Xuegong H. Study on microbubble dynamic behaviors at vertical micro-nano hybrid surfaces based on open capillary microgrooves heat sink // *Intern. J. of Thermal Sci.* 2019. Vol. 135. P. 434–444.
9. Jinchen T., Xuegong H. Evaluation of capillary wetting performance of micro-nano hybrid structures for open microgrooves heat sink // *Experimental Thermal and Fluid Sci.* 2020. Vol. 112. P. 109948-1–109948-14.
10. Vorobyev A.Y., Guo C. Metal pumps liquid uphill // *J. of Applied Physics*. 2009. Vol. 94. P. 224102-1–224102-3.
11. Vorobyev A.Y., Guo C. Laser turns silicon superwicking // *Optics express*. 2010. Vol. 18. P. 6455–6460.
12. Fang R., Zhu H., Li Z., Zhu X., Zhang X., Huang Z., Li K., Yan W., Huang Y., Maisotsenko V.S., Vorobyev A.Y. Temperature effect on capillary flow dynamics in 1d array of open nanotextured microchannels produced by femtosecond laser on silicon // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, No. 4. P. 796-1–796-14.
13. Washburn E. The dynamics of capillary flow // *Phys. Rev.* 1921. Vol. 17. P. 273–283.
14. Fang R., Zhang X., Zheng J., Pan Z., Yang C., Deng L., Li R., Lai C., Yan W., Maisotsenko V.S., Vorobyev A.Y. Superwicking functionality of femtosecond laser textured aluminum at high temperatures // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11 (11). P. 2964-1–2964-19.
15. Ranran F., Hongbo Z., Zekai L., Wensheng Y., Xianhang Z., Xiaohui Z., Maisotsenko V.S., Vorobyev A.Y. Capillary Nylon 6 polymer material produced by femtosecond laser processing // *Optics Express*. 2019. Vol. 27, Iss. 25. P. 36066–36074.

16. Xiaomeng W., Dani F., Juan C.G., Jungho L., Seung M.Y. Capillary evaporation of water from aluminum high-temperature conductive microporous coating // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 153. P. 119660-1–119660-11.
17. Fang R., Li Z., Zhang X., Zhu X., Zhang H., Li J., Pan Z., Huang Z., Yang C., Zheng J., Yan W., Huang Y., Maisotsenko V.S., Vorobyev A.Y. Spreading and drying dynamics of water drop on hot surface of superwicking Ti-6Al-4V alloy material fabricated by femtosecond laser // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, No. 4. P. 899-1–899-18.
18. Heng T., Yong T., Wei Y., Ruitao P., Longsheng L., Zhenping W. Fabrication and capillary characterization of axially micro-grooved wicks for aluminium flat-plate heat pipes // Applied Thermal Engng. 2018. Vol. 129. P. 907–915.
19. Chaohong G., Dong Y., Tao W., Yuyan J., Dawei T. Theoretical and experimental analysis of the evaporating flow in rectangular microgrooves // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 84. P. 1113–1118.

*Статья поступила в редакцию 24 июня 2022 г.,
после доработки — 12 июля 2022 г.,
принята к публикации 2 сентября 2022 г.*