

УДК 532.63

## **Теплообмен при кипении воды на поверхностях черного кремния различной морфологии\***

**О.А. Володин<sup>1</sup>, В.С. Сердюков<sup>1,2</sup>, Е.А. Вячеславова<sup>3</sup>, А.И. Баранов<sup>3</sup>,  
И.П. Малахов<sup>1</sup>, С.В. Конев<sup>1,4</sup>, И.А. Косовских<sup>1,4</sup>**

<sup>1</sup>*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск*

<sup>3</sup>*Санкт-Петербургский национальный исследовательский академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН*

<sup>4</sup>*Новосибирский государственный университет*

E-mail: volodin\_o@mail.ru

В работе приведены экспериментальные данные по влиянию морфологии структуры супергидрофильной поверхности черного кремния, полученной методом плазмохимического травления, на теплообмен при кипении воды в условиях большого объема. Исследуются поверхности кремния, имеющие однородные и гибридные микроструктуры. Эксперименты по теплообмену проводились на предварительно отобранных микроструктурированных поверхностях с наилучшими характеристиками капиллярного впитывания. Показано, что критический тепловой поток (КТП) для поверхности с гибридной структурой примерно в три раза превышает КТП для гладкой кремниевой поверхности ( $660 \text{ кВт/м}^2$ ), достигая величины  $1914 \text{ кВт/м}^2$ , тогда как КТП для поверхности с однородной структурой превышает КТП для гладкой поверхности в 2,4 раза, достигая значения  $1568 \text{ кВт/м}^2$ . При этом максимальный зафиксированный коэффициент теплоотдачи (КТО) поверхности с однородной капиллярной структурой, напротив, является наибольшим ( $77 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$ ), до двух раз превышая значения коэффициента теплоотдачи для немодифицированной поверхности в области умеренных тепловых потоков. Поверхность с гибридной структурой демонстрирует задержку начала кипения при сравнении с результатами для гладкой поверхности, однако с дальнейшим ростом теплового потока заметно превышает КТО гладкой референсной поверхности, достигая в итоге максимального значения в  $45 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$  в предкризисной области.

**Ключевые слова:** кипение, теплообмен, критический тепловой поток, модифицированные теплообменные поверхности, черный кремний, капиллярное впитывание.

### **Введение**

Модифицированные теплообменные поверхности сегодня востребованы в различных технологических областях (в теплоэнергетике, атомной энергетике, в химической промышленности, при охлаждении теплонагруженных элементов электроники и т.д.),

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-29-10092) и правительства Новосибирской области (соглашение № р-48).

поскольку дают возможность значительно интенсифицировать процесс пузырькового кипения и/или повысить значения критического теплового потока (КТП).

Среди различных интенсифицирующих поверхностей можно выделить подкласс капиллярных поверхностей, называемых в зарубежной литературе *hemi-wicking surfaces* (что буквально можно перевести как «частично впитывающие поверхности», устоявшегося русскоязычного термина авторам не встречалось). Это, как правило, супергидрофильные структурированные поверхности, способствующие значительному увеличению коэффициента теплоотдачи (КТП) за счет повышенной способности ко впитыванию жидкости капиллярной структурой. Такие поверхности, в отличие, например, от капиллярно-пористых, не имеют внутренних пор. Одним из наиболее перспективных способов создания данного типа капиллярных структурированных поверхностей является травление. В настоящей работе в качестве интенсифицирующей теплообменной поверхности будет рассмотрен так называемый черный кремний, получивший свое название за уникальную способность поглощения света.

Детальное исследование теплообменных свойств капиллярных поверхностей (*hemi-wicking surfaces*) и их влияния на КТП началось относительно недавно. На сегодняшний день установлено, что капиллярная структура поверхности способствует значительному улучшению подтока жидкости под паровые конгломераты, что приводит к замыканию сухих пятен в предкризисном режиме и, соответственно, повышению КТП [1–4]. Однако вопрос о влиянии морфологии капиллярных поверхностей и их параметров структурирования на интенсификацию теплообмена и развитие кризиса кипения (в первую очередь, повышение КТП) все еще остается открытым.

В работе [3] было показано, что применение иерархической структурированной поверхности, характеризующейся высокими значениями капиллярного впитывания, позволяет достигать 200%-го повышения величины КТП при кипении воды. Авторы настоящей работы разделяют гипотезу, что для супергидрофильных капиллярных поверхностей именно активное капиллярное впитывание является основным фактором повышения КТП, что подтверждается выводами работ [1, 3–5]. С другой стороны, ряд исследователей связывает рост КТП при кипении на капиллярных поверхностях с увеличением длины тройной контактной линии на шероховатой структуре поверхности (т.е. считают шероховатость главным фактором) [2]. Также некоторые авторы современных работ [6] предлагают модель, комбинирующую влияние двух вышеупомянутых факторов.

Цель представленной работы — исследование влияния морфологии супергидрофильной поверхности микроструктурированного кремния на характеристики капиллярного впитывания и теплообмен для повышения критического теплового потока при кипении воды.

### **Методика эксперимента**

Модификация теплообменных кремниевых поверхностей осуществлялась с помощью метода криогенного плазмохимического травления в газовой среде  $SF_6/O_2$  на установке Oxford Plasmalab System 100 (ICP 380). В результате были получены рабочие участки  $20 \times 20$  мм с микромодифицированной игольчатой структурой поверхности (черным кремнием). Процесс создания рабочих участков подробно описывался в работе [7].

В ходе исследования было подготовлено семь и отобрано пять итоговых образцов черного кремния с различными геометрическими характеристиками, полученными за счет варьирования времени обработки образца и состава газовой смеси  $SF_6/O_2$ . В том числе

были получены три образца с различной высотой однородной микроструктуры (3–6 мкм) и два образца с гибридной структурой, комбинирующей низкие структуры одной высоты (около 4–5 мкм) и более редкие высокие структуры одной высоты (около 14–15 мкм). Подробное описание морфологии образцов приводилось в [7]. В указанной работе в результате проведения экспериментов по капиллярному впитыванию было показано, что бóльшая высота однородных микроструктур приводит к лучшему растеканию жидкости по поверхности и что гибридные поверхности характеризуются наиболее высокими значениями числа  $Wi$  (критерий капиллярного впитывания, введенный в работе [3] и являющийся количественной мерой скорости поступления жидкости в структуру поверхности, см. также [7]) — вплоть до  $Wi = 2,27$ . При этом максимальные значения числа  $Wi$  достигаются при наибольшей плотности высоких микроструктур гибридных поверхностей.

Изображения исследованных в работе участков черного кремния, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ), приведены на рис. 1а, 1б.

Эксперименты по исследованию кипения воды в условиях большого объема проводились с использованием установки, подробное описание и схема которой были приведены в работах [5, 7]. В качестве рабочей жидкости использовалась деионизированная вода. Опыты проводились при атмосферном давлении в условиях насыщения. Нагревательным элементом служила плоская прямоугольная подложка (46 мм × 36 мм) из монокристаллического кремния толщиной 460 мкм. Тепловыделение с поверхности кремния осуществлялось с помощью тонкопленочного нагревателя из оксида индия-олова (ИТО) толщиной 1 мкм, напыленного на обратную (относительно поверхности кипения) сторону экспериментального участка. Площадь поверхности ИТО-нагревателя составляла 20 мм × 20 мм. Плотность подводимого теплового потока  $q$  определялась по показаниям величины тока, пропускаемого через ИТО-пленку, и разности потенциалов между токоподводами. Для анализа динамики парообразования при кипении жидкости проводилась высокоскоростная съемка с помощью камеры Phantom VEO410L, расположенной с боковой стороны по отношению к экспериментальному участку. Частота съемки составляла 4000 кадр/с, разрешение — 0,09 мм/пикс. Запись температурного поля ИТО-пленки проводилась с помощью расположенной снизу (по отношению к поверхности кипения) высокоскоростной термографической камеры FLIR T650s. Частота съемки составляла 1500 кадр/с, разрешение — 0,18 мм/пикс. Оценка погрешностей используемого экспериментального метода определения теплообменных характеристик приводилась в работе [5].

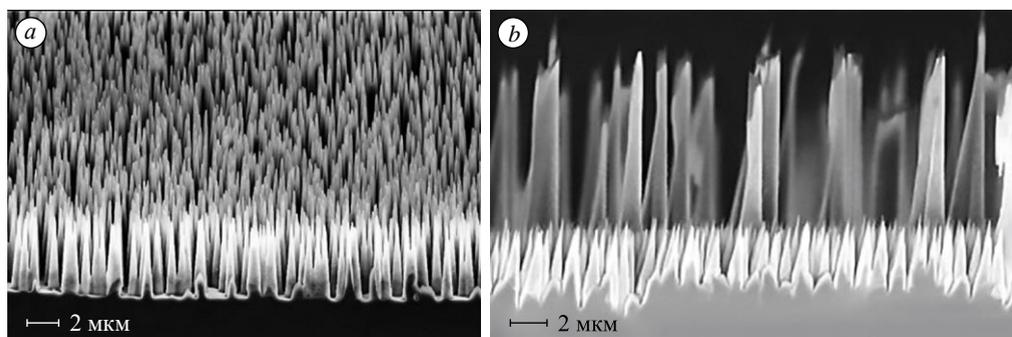


Рис. 1. Изображения черного кремния с однородной (а) и гибридной (б) структурами, полученные с помощью РЭМ.

### Обсуждение результатов

В разделе представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена (включая КТП) при кипении воды на поверхностях черного кремния с однородной и гибридной микроструктурами, продемонстрировавшими в ранее проведенном авторами исследовании капиллярного впитывания [7] наибольшие значения числа  $Wi$  для поверхности с однородной структурой ( $Wi = 0,43$ ) и среди поверхностей с гибридной структурой ( $Wi = 2,27$ ).

На рис. 2 приведены кривые кипения воды на исследованных поверхностях черного кремния, а также данные для гладкой кремниевой поверхности ( $R_a \sim 0,005$  мкм) [8]. Стрелки на экспериментальных точках при максимальных значениях тепловых потоков соответствуют значениям КТП. На графике также для наглядности звездочкой и пунктирной линией показан КТП, рассчитанный по гидродинамической модели кризиса Кутателадзе [9]. Немодифицированная поверхность кремния, как правило, является ультрагладкой, что затрудняет процесс пузырькового кипения и снижает соответствующую величину КТП. Это видно при сравнении с КТП, рассчитанным по модели Кутателадзе, которая, как известно, достаточно хорошо предсказывает кризис при кипении жидкостей на немодифицированных поверхностях.

Из графика также видно, что КТП, достигающий величины  $1914 \text{ кВт/м}^2$  для поверхности с гибридной структурой, в 2,9 раза превышает КТП для гладкой кремниевой поверхности, равный  $660 \text{ кВт/м}^2$ , тогда как КТП, полученный для поверхности с однородной структурой, превышает КТП для гладкой поверхности в 2,4 раза, достигая  $1568 \text{ кВт/м}^2$ . Наблюдаемая разница в значениях КТП для однородной и гибридной поверхностей является прямым следствием упомянутого выше различия значений числа  $Wi$  для данных поверхностей. То есть структура гибридной поверхности, характеризующейся более высоким числом  $Wi$ , способствует более активному замыыванию сухих пятен, чем структура однородной поверхности в предкризисных режимах кипения.

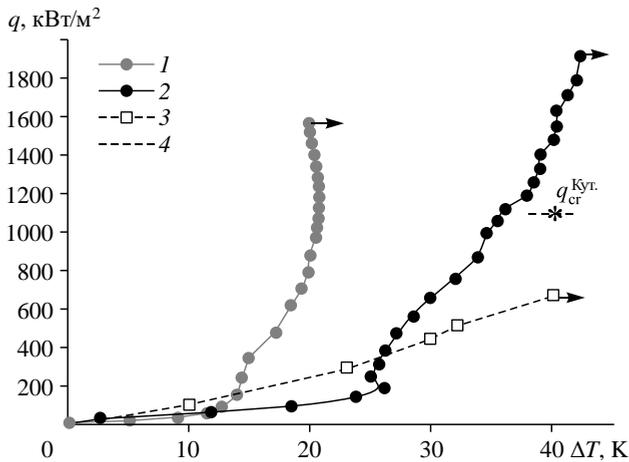


Рис. 2. Кривые кипения, полученные в настоящей работе на модифицированных поверхностях черного кремния, а также опытные данные для гладкой кремниевой поверхности [9] и КТП, рассчитанный по модели Кутателадзе [8].

1, 2 — данные настоящей работы для черного кремния с однородной и гибридной поверхностями соответственно,  
3 — опытные данные [8] для кремния с гладкой поверхностью,  
4 — расчет по модели Кутателадзе [9].

При этом из графиков на рис. 2 видно, что интенсивность теплообмена при кипении на гибридной поверхности, напротив, является минимальной среди изученных модифицированных поверхностей. Так, например, расчетное значение коэффициента теплоотдачи для рассматриваемой поверхности при  $q = 363 \text{ кВт/м}^2$  составляет  $13,8 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$ , что практически совпадает с данными работы [8] для немодифицированного полированного кремния, но в 1,7 раз меньше КТО поверхности черного кремния с однородной структурой ( $23,9 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$ ). Максимальный зафиксированный коэффициент теплоотдачи поверхности с однородной капиллярной структурой составляет  $77 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$ , что практически в два раза выше значения КТО для немодифицированной поверхности в области умеренных тепловых потоков. Менее эффективная по теплоотдаче поверхность черного кремния с гибридной структурой демонстрирует задержку начала кипения при сравнении с результатами для гладкой поверхности, однако с дальнейшим ростом теплового потока заметно превышает КТО гладкой поверхности, достигая в итоге максимального значения в  $45 \text{ кВт/(м}^2\text{К)}$  в предкризисной области.

Наблюдаемое различие в интенсивности теплообмена при кипении на поверхностях черного кремния с различной морфологией связано с тем, что жидкость лучше пропитывает структуру гибридной поверхности (с более высоким  $Wi$ ), чем структуру поверхности с однородной морфологией, что провоцирует более активное подавление центров вскипания на поверхности с гибридной структурой. Следствием этого эффекта являются более высокие значения перегрева поверхности.

На графиках (рис. 2) также наблюдается инверсия кривой кипения с ростом температурного напора ( $\Delta T$ ) для поверхности с однородной структурой, которая имеет место в предкризисной области. Данный эффект, характерный для пористых поверхностей, объясняется включением в процесс кипения неактивных ранее центров меньшего (как правило) характерного размера при достижении определенных значений перегрева поверхности [10]. То есть, для поверхности с однородной структурой — с большей высотой структур (6 мкм) и большей линейной плотностью (1,6 шт./мкм) в сравнении со структурами базового слоя гибридной поверхности — с увеличением перегрева поверхности происходит активация пор меньшего размера, что приводит к дополнительной интенсификации процесса кипения. В то время как для гибридной поверхности, в которой комбинируются разреженные высокие структуры с низкими (3,6 мкм) и менее плотными, чем в случае однородно-структурированной поверхности, структурами (1 шт./мкм), такого явления не наблюдается (см. рис. 1).

Таким образом, показано, что капиллярное впитывание (характеризующееся числом  $Wi$ ) является основным фактором, определяющим величину КТП при кипении жидкостей на супергидрофильных капиллярных поверхностях. Ряд авторов [1, 3, 4], по сути, выделяет такие капиллярные поверхности в отдельный класс, поскольку они обладают высокой способностью к активному капиллярному впитыванию жидкости, которой не наблюдается у «просто» гидрофильных поверхностей. Для данного класса поверхностей перестает работать известная модель Кандликара [11], учитывающая влияние угла смачивания, и значения КТП на соответствующем графике зависимости критического теплового потока от угла смачивания для таких поверхностей (то есть в области угла смачивания, равного нулю) оказываются существенно выше предсказанных (см. [1]).

## **Заключение**

В работе получены новые данные по теплообмену при кипении воды на капиллярных поверхностях черного кремния различной морфологии. Показано, что значение КТП поверхности с гибридной структурой примерно в три раза превышает значение КТП для гладкой кремниевой поверхности, в то время как КТП для поверхности с однородной структурой превышает КТП для гладкой поверхности в 2,4 раза.

Коэффициент теплоотдачи поверхности с однородной структурой, напротив, является наибольшим, до двух раз превышая значения КТО гладкой поверхности в области умеренных тепловых потоков и достигая при дальнейшем росте теплового потока максимального значения в  $77 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

Поверхность с гибридной структурой, характеризующаяся более высокими значениями числа  $Wi$ , в момент закипания демонстрирует более высокие значения перегрева, чем гладкая поверхность и поверхность с однородной структурой. С дальнейшим ростом теплового потока КТО поверхности с гибридной структурой начинает превышать КТО гладкой поверхности и в итоге достигает максимального КТО, равного  $45 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

Подтверждено, что капиллярное впитывание является основным фактором, определяющим величину КТП при кипении жидкостей на супергидрофильных капиллярных поверхностях.

## **Список литературы**

1. **Ahn H.S., Lee C., Kim J., Kim M.H.** The effect of capillary wicking action of micro/nano structures on pool boiling critical heat flux // Intern. J. Heat Mass Transf. 2012. Vol. 55. No. 1–3. P. 89–92.
2. **Chu K.H., Enright R., Wang E.N.** Structured surfaces for enhanced pool boiling heat transfer // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 100, No. 24.
3. **Rahman M.M., Ridwan S., Fehlinger D., McCarthy M.** Wicking enhanced critical heat flux for highly wetting fluids on structured surfaces // Langmuir. 2020. Vol. 36, No. 32. P. 9643–9648.
4. **Rahman M.M., Olceroglu E., McCarthy M.** Role of wickability on the critical heat flux of structured superhydrophilic surfaces // Langmuir. 2014. Vol. 30, No. 37. P. 11225–11234.
5. **Serdyukov V., Vladyko I., Starinskiy S., Rodionov A., Shukhov Y., Malakhov I., Safonov A., Surtaev A.** Pool boiling performance on the textured hemi-wicking surfaces fabricated by nanosecond laser ablation // Applied Thermal Eng. 2023. Vol. 228. P. 120472-1–120472-13.
6. **Song Y., Zhang L., Díaz-Marín C.D., Cruz S.S., Wang E.N.** Unified descriptor for enhanced critical heat flux during pool boiling of hemi-wicking surfaces // Intern. J. Heat Mass Transf. 2022. Vol. 183. P. 122189-1–122189-7.
7. **Сердюков В.С., Вячеславова Е.А., Баранов А.И., Владыко И.В., Володин О.А.,** Влияние структуры черного кремния на капиллярное растекание жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Vol. 31, No. 5.
8. **Yao Z., Lu Y.W., Kandlikar S.G.** Effects of nanowire height on pool boiling performance of water on silicon chips // Intern. J. Thermal Sciences. 2011. Vol. 50, No. 11. P. 2084–2090.
9. **Кутателадзе С.С.** О возникновении пленочного кипения в условиях свободной циркуляции // Котлотурбостроение. 1948. № 3. С. 10–12.
10. **Швецов Д.А., Павленко А.Н., Брестер А.Е., Жуков В.И.** Инверсия кривой кипения на микроструктурированных пористых покрытиях // Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61, № 3. С. 405–409.
11. **Kandlikar S.G.** A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation // J. Heat Transf. 2001. Vol. 123, Iss. 6. P. 1071–1079.

*Статья поступила в редакцию 19 сентября 2024 г.,  
после доработки — 18 октября 2024 г.,  
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*