

УДК 536.242

Особенности динамики кипения азота на микроструктурированных пористых покрытиях*

Д.В. Кузнецов, А.Н. Павленко

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

E-mail: kuznetsov_9308@mail.ru

Проведено экспериментальное исследование влияния капиллярно-пористых покрытий, полученных методом направленного плазменного напыления, на динамику парообразования и теплообмен при кипении азота в условиях стационарного тепловыделения на медных трубчатых нагревателях диаметром 16 мм. Показано, что наличие покрытий приводит к увеличению критического теплового потока относительно гладкого нагревателя и интенсификации теплоотдачи до 3.5 раз в области малых тепловых потоков. Из анализа данных высокоскоростной видеосъемки следует, что интенсификация теплообмена при малых тепловых потоках связана со значительной активацией стабильно работающих центров парообразования. При последующем росте тепловой нагрузки интенсификация связана с существенным вкладом высокоинтенсивного теплообмена в зоне макрослоя в локальных областях между гребнями структурированных покрытий. Показано снижение угла наклона кривых кипения модифицированных нагревателей в предкризисных режимах, которое определяется пульсирующим характером поведения межфазных границ и сопровождается значительными колебаниями температуры поверхности.

Ключевые слова: кипение, теплообмен, капиллярно-пористые покрытия, жидкий азот.

Введение

Несмотря на то, что в литературе представлено большое количество работ, посвященных экспериментальному и теоретическому исследованию различных аспектов процессов тепло- и массопереноса при кипении жидкости, на сегодняшний день не существует завершенной теории теплообмена при пузырьковом кипении. До сих пор ведется активное экспериментальное исследование внутренних характеристик пузырькового кипения при варьировании системных параметров (сочетание факторов: жидкость/материал нагревателя, давление, шероховатость поверхности и т.д.). Такой интерес исследователей связан как с необходимостью верификации имеющихся моделей и разработки новых подходов, так и с развитием в последние годы прямого численного моделирования процессов кипения [1].

* Работа выполнена в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН при финансовой поддержке государственного контракта с ИТ СО РАН № 121031800216-1.

Пузырьковое кипение жидкости является одним из наиболее эффективных способов отвода тепла от поверхности нагрева. В последнее время интерес исследователей направлен на поиск способов повышения коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков (КТП) при кипении. Одними из наиболее перспективных в этой области являются методы, связанные с прямой модификацией теплообменных поверхностей за счет создания на них различных структур и покрытий на микро- и наномасштабах, о чем свидетельствует большое количество обзорных работ [2–7].

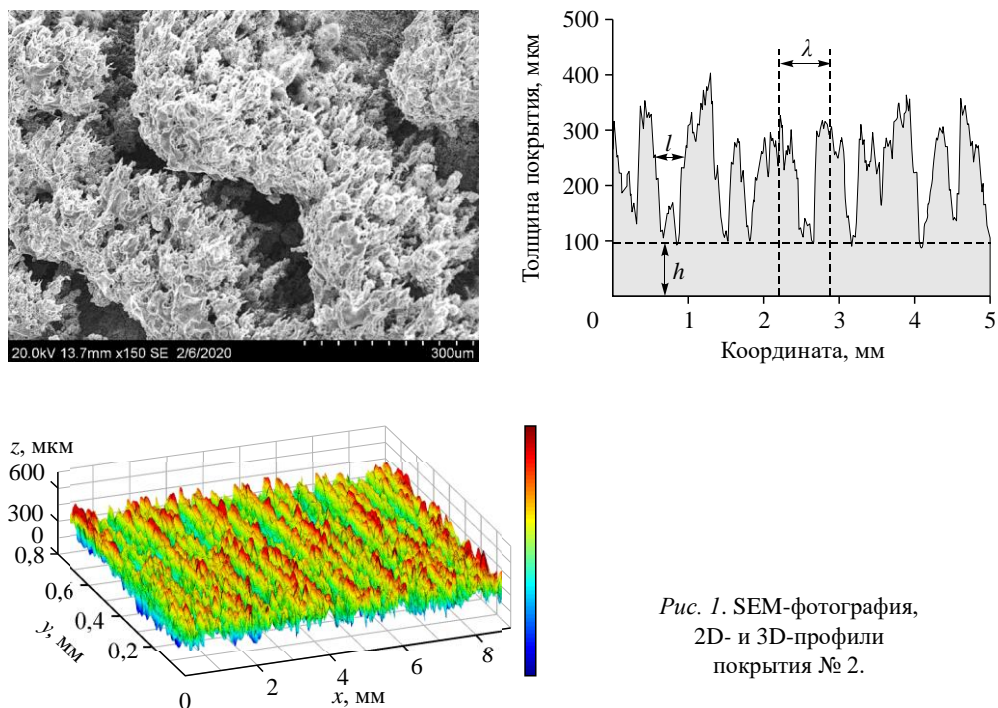
Одним из способов создания микроструктурированных пористых покрытий является метод направленного плазменного напыления [8]. Уникальность покрытий, полученных с использованием указанного метода, заключается в одновременном сочетании организации высокопористого покрытия и структурированности его поверхности в виде квазиупорядоченных гребней и каналов. Исследование влияния таких покрытий на теплообмен и критические тепловые потоки при кипении жидкостей с различными физическими свойствами (жидкий азот, фреон R21, вода) было проведено в работах [9–11]. Авторами показано, что для нагревателей с покрытиями в области относительно малых тепловых потоков наблюдается существенная интенсификация теплообмена (до 3 раз) независимо от типа жидкости в условиях стационарного тепловыделения. Был проведен анализ механизмов интенсификации теплообмена, которые различаются в зависимости от свойств жидкости и микроструктурных характеристик покрытий. Несмотря на достаточно глубокое исследование влияния таких структур на теплообмен при кипении, остается слабоизученным вопрос об особенностях динамики парообразования в области высоких тепловых потоков. Кроме того, во всех работах исследовались цилиндрические нагреватели с диаметром, соизмеримым с толщиной покрытия, что вносит существенную неопределенность при вычислении плотности теплового потока на нагревателях с пористыми покрытиями.

Целью настоящей работы является исследование влияния трехмерных капиллярно-пористых (ТКП) покрытий, полученных методом направленного плазменного напыления, на динамику парообразования и теплообмен при кипении жидкого азота в условиях стационарного тепловыделения при атмосферном давлении.

1. Экспериментальные методики

Схема установки и подробное описание экспериментальных методик представлены в [11]. В качестве рабочих участков с «гладкой» теплоотдающей поверхностью (без покрытия) использовались медные цилиндрические трубки с внешним диаметром 16 мм, толщиной стенки 3 мм, длиной 50 мм и параметром шероховатости $R_a = 8,5$ мкм.

Покрытия на исходную рабочую поверхность наносились методом направленного плазменного напыления. Для напыления использовался порошок бронзы БрАмц 9–2. На рис. 1 представлены SEM-фотография рабочего участка с покрытием, а также 2D- и 3D-профили покрытия. Из рисунка видно, что покрытия представляют собой квазиупорядоченные вдоль поверхности трубки пористые гребни и каналы. Основные морфологические характеристики покрытий указаны в таблице, а именно: δ — средняя по высоте гребней толщина покрытия, λ — среднее расстояние между соседними гребнями, h — толщина остаточного слоя, l — ширина каналов, ε — пористость. Анализ использованных в проведенных сериях опытов в течение нескольких часов и дней нагревателей показал, что каких-либо признаков нарушения целостности покрытий не наблюдается.



Таблица

Параметры покрытий

Номер	Фракция, мкм	δ , мкм	λ , мкм	h , мкм	l , мкм	ε , %
1	20–32	200	350	50	120	50
2	20–32	350	460	100	240	64

2. Результаты

На рис. 2а приведены кривые кипения и критические тепловые потоки ($q_{\text{КТП}}$) для гладкого медного образца и образцов с ТКП-покрытиями. Также представлены данные [12] по теплообмену при кипении жидкого азота на плоском медном нагревателе с гладкой поверхностью, которые, как видно на рис. 2а, хорошо согласуются с результатами, полученными для гладкой поверхности в настоящей работе. Следовательно, наличие

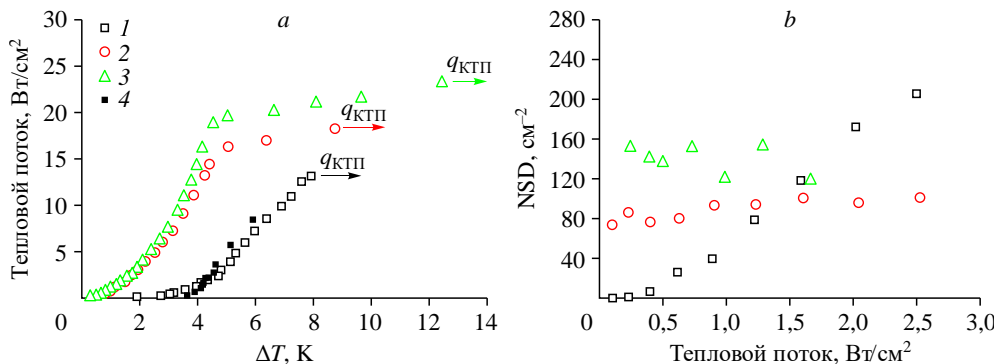


Рис. 2. Результаты экспериментов: кривые кипения (а) и плотность центров парообразования (б).
1 — без покрытия, 2 — покрытие № 1, 3 — покрытие № 2, 4 — данные [12].

капиллярно-пористых покрытий на поверхности нагревателей приводит к существенно-му увеличению критического теплового потока. При этом максимальная величина КТП наблюдалась для образца № 2 и была в 1,8 раза выше соответствующего значения для гладкой трубки без покрытия. Для обоих модифицированных нагревателей наблюдалась существенная интенсификация теплообмена до 3,5 раз в области малых тепловых потоков, которая снижается до 2 раз при тепловых потоках, близких к $q_{\text{КТП}}$ на нагревателе без покрытия.

Важно отметить, что характерной особенностью пузырькового кипения азота на модифицированных нагревателях в сравнении с гладкой поверхностью в области высоких тепловых нагрузок (выше значения КТП на гладком нагревателе) являлось значительное снижение угла наклона кривой теплообмена. Повышение плотности теплового потока в таком режиме сопровождалось существенными периодическими колебаниями температуры поверхности амплитудой 1–2 К и характерными частотами пульсаций 0,1–0,2 Гц. Схожие пульсационные эффекты при кипении жидкостей в кризисных и переходных режимах с детальным анализом спектральных характеристик были показаны в цикле работ коллектива авторов [13].

На основе анализа данных высокоскоростной видеосъемки была проведена количественная оценка плотности активных центров парообразования (NSD) при различных плотностях тепловых потоков (см. рис. 2b). Для гладкого нагревателя наблюдается практически линейный рост NSD при увеличении мощности тепловыделения, в то время как на нагревателях с ТКП-покрытиями эта величина остается практически постоянной. При этом видно, что плотность центров парообразования на нагревателях с капиллярно-пористыми покрытиями существенно выше, чем на гладком нагревателе при тепловых потоках $q < 1\text{--}2 \text{ Вт/см}^2$. Дальнейшее повышение мощности тепловыделения приводит к тому, что NSD для гладкого участка становится больше аналогичной величины для модифицированных образцов. Можно сделать вывод, что увеличение плотности центров парообразования не является определяющим механизмом интенсификации теплообмена при кипении жидкого азота на исследованных покрытиях. Анализ видеосъемки показал, что парообразование на модифицированных образцах реализуется в микроканалах покрытия. Кроме того, было обнаружено, что центры парообразования при кипении жидкого азота на гладком участке в области малых тепловых потоков не являются стабильными. В то же время на всех исследованных ТКП-покрытиях наблюдалась непрерывная парогенерация, что и приводит к существенной интенсификации теплообмена при $q < 1,5 \text{ Вт/см}^2$. Как отмечалось в работе [11], при повышении плотности теплового потока основной вклад в интенсификацию теплообмена при кипении азота на таких покрытиях вносит увеличение областей тонких менисков жидкости между паровой и твердой фазами в областях между соседними гребнями покрытия и, как следствие, значительное увеличение доли тепла, передаваемого за счет интенсивного испарения в макрослое.

Кадры высокоскоростной видеосъемки кипения на модифицированном нагревателе при высоких мощностях тепловыделения (выше критического теплового потока для гладкого образца) представлены на рис. 3. Как отмечалось, в этой области тепловых потоков наблюдались существенные колебания температуры поверхности нагрева. Анализ кадров видеосъемки кипения показал схожий пульсирующий характер поведения межфазной границы. По всей поверхности нагревателя образовывались толстые «паровые чулки», которые периодически отрывались от поверхности нагрева, обеспечивая последующий подток жидкости к теплоотдающей поверхности. Далее наблюдалась интенсификация парообразования с последующим периодическим формированием новых паровых конгломератов. Зависимость частоты отрыва пара от плотности теплового потока представлена

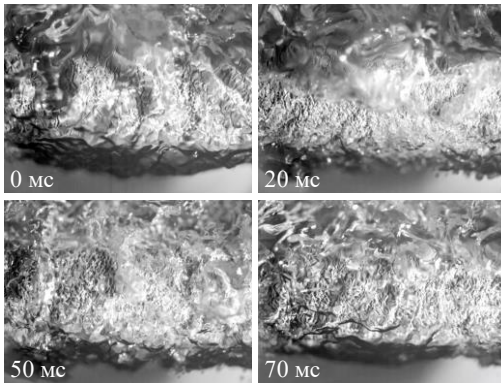


Рис. 3. Фотографии кипения на образце № 2 при $q = 22,7 \text{ Вт/см}^2$.

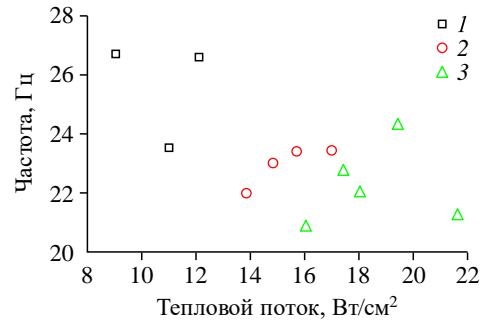


Рис. 4. Зависимость частоты отрыва паровых конгломератов от плотности теплового потока.

1 — без покрытия, 2 — покрытие № 1, 3 — покрытие № 2.

на рис. 4. Аналогичное поведение межфазной поверхности отмечалось и для гладкого нагревателя вблизи кризисных значений теплового потока, однако существенного изменения наклона кривой кипения в этом случае не было. Частота отрыва паровой фазы в таком режиме кипения слабо зависит от мощности тепловыделения и составляет 23–28 Гц. При этом минимальные значения плотности теплового потока, при которых происходил этот периодический процесс, лежат вблизи точек изменения наклонов кривых кипений для модифицированных нагревателей. Именно этот периодический процесс, сопровождающийся соответствующими изменениями паросодержания в пристенном двухфазном слое и доли общей смоченной поверхности, определяет снижение теплоотдачи в предкризисных режимах. Следует также отметить существенное различие в частотах пульсаций температуры и межфазной поверхности. Такое различие, вероятно, связано с тем, что наибольшие амплитуды колебаний температуры поверхности нагревателя соответствуют, как правило, моментам слияния паровых конгломератов от нескольких близлежащих друг к другу областей и образования более крупного «парового чулка» на тепловыделяющей поверхности. При этом за счет тепловой инерционности исследованных образцов высокочастотные пульсации температуры, очевидно, сглаживаются и не имеют столь выраженного характера. Так, согласно [14], характерное время стабилизации температурного профиля в режиме пузырькового кипения определяется следующим образом:

$$\tau = \frac{c_n \rho_n \delta_n}{\alpha},$$

где c_n , ρ_n , δ_n — теплоемкость, плотность и толщина нагревателя соответственно, α — линеаризованный коэффициент теплоотдачи.

По оценкам, сделанным в областях с меньшими углами наклона кривых кипения (в предкризисных режимах), эта величина лежит в диапазоне 2–4 с, что хорошо согласуется с полученными данными.

Выводы

Представлены результаты экспериментального исследования теплообмена и динамики парообразования на медных трубчатых нагревателях диаметром 16 мм со структурированными капиллярно-пористыми покрытиями, полученными методом направленного плазменного напыления, при кипении азота в условиях стационарного тепловыделения. Анализ полученных результатов показал следующее.

1. Максимальное увеличение критического теплового потока в 1,8 раза относительно гладкого нагревателя наблюдается для покрытия № 2. Максимальная степень интенсификации теплообмена (до 3,5 раз) была получена для покрытий в области малых тепловых потоков.

2. Плотность активных центров парообразования на ТКП-покрытиях остается практически неизменной при увеличении мощности тепловыделения и при тепловых потоках выше $1-2 \text{ Вт/см}^2$ лежит ниже аналогичных значений для гладкого участка. Интенсификация теплообмена при малых q связана со значительной активацией стабильно работающих центров парообразования, а при последующем росте тепловых нагрузок — с существенным вкладом высокоинтенсивного теплообмена в зоне макрослоя в локальных областях между гребнями микроструктурированных капиллярно-пористых покрытий.

3. Для модифицированных нагревателей наблюдается снижение угла наклона кри-вых кипения в предкризисных режимах, которое сопровождается существенными колебаниями температуры поверхности и определяется пульсирующим характером поведения межфазных границ с периодическим отрывом крупных паровых конгломератов.

Список литературы

1. Dhir V.K., Warrier G.R., Aktinof E. Numerical simulation of pool boiling: a review // J. Heat Transfer. 2013. Vol. 135, No. 6. P. 061502-1–061502-17.
2. Chu H., Xu N., Yu X. et al. Review of surface modification in pool boiling application: Coating manufacturing process and heat transfer enhancement mechanism // Appl. Thermal Engng. 2022. Vol. 215. P. 119041-1–119041-5.
3. Volodin O.A., Pavlenko A.N., Pecherkin N.I. Heat transfer enhancement on multilayer wire mesh coatings and wire mesh coatings combined with other surface modifications — A review // J. Engng Thermophysics. 2021. Vol. 30, No. 4. P. 563–596.
4. Liang G., Mudawar I. Review of pool boiling enhancement by surface modification // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 128. P. 892–933.
5. Володин О.А., Печеркин Н.И., Павленко А.Н. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59, № 2. С. 280–312.
6. Pavlenko A.N., Kuznetsov D.V. Development of methods for heat transfer enhancement during nitrogen boiling to ensure stabilization of HTS devices // J. Engng Thermophys. 2021. Vol. 30, No. 4. P. 526–562.
7. Dedov A.V. A review of modern methods for enhancing nucleate boiling heat transfer // Thermal Engng. 2019. Vol. 66. P. 881–915.
8. Kalita V.I., Komlev D.I., Komlev V.S., Radyuk A.A. The shear strength of three-dimensional capillary-porous titanium coatings for intraosseous implants // Materials Sci. and Engng. C. 2016. Vol. 60. P. 255–259.
9. Суртаев А.С., Павленко А.Н., Калита В.И., Кузнецов Д.В., Комлев Д.И., Радюк А.А., Иваницов А.Ю. Влияние трехмерных капиллярно-пористых покрытий на теплообмен при кипении жидкости // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 8. С. 1–9.
10. Surtaev A., Kuznetsov D., Serdyukov V., Pavlenko A., Kalita V., Komlev D., Ivannikov A., Radyuk, A. Structured capillary-porous coatings for enhancement of heat transfer at pool boiling // Appl. Thermal Engng. 2018. Vol. 133. P. 532–542.
11. Kuznetsov D.V., Pavlenko A.N., Radyuk A.A., Komlev D.I., Kalita V.I. Features of heat transfer during pool boiling of nitrogen on surfaces with capillary-porous coatings of various thicknesses // J. Engng Thermophys. 2020. Vol. 29. P. 375–387.
12. Nakayama W., Daikoku T., Kuwahara H., Nakajima T. Dynamic model of enhanced boiling heat transfer on porous surfaces. Part I: experimental investigation // ASME J. Heat and Mass Transfer. 1980. Vol. 102, No. 3. P. 445–450.
13. Скоков В.Н., Коверда В.П., Виноградов А.В., Решетников А.В. Низкочастотные пульсации с $1/f^\alpha$ -спектром мощности в переходных режимах кипения воды на проволочном нагревателе // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 5. С. 741–748.
14. Павленко А.Н., Стародубцева И.П., Мацех А.М. Влияние граничных условий на динамику развития очагов пленочного кипения // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 4. С. 611–628.

*Статья поступила в редакцию 21 июня 2023 г.,
после доработки — 7 ноября 2023 г.,
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*