

УДК 536.2

Исследование кризиса теплообмена при кипении воды в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц*

Ю.А. Кузма-Кичта¹, А.В. Лавриков¹, М. Shustov², Е.А. Кустова¹,
Н.С. Иванов¹, Е.А.Кулешов¹, А.С. Киселев¹

¹ *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия*

² *Technion–Israel Institute of Technology, Haifa, Israel*

e-mail: kuzma@itf.mpei.ac.ru; lavrikovav@yandex.ru; shustovMV@gmail.com; katerinlksa@gmail.com; mc.propeller@mail.ru; kuleshov.evgeniy.98@mail.ru; fortynaalex088@gmail.com

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-6-252-259

Поступила в редакцию 27.05.2020

После доработки 12.06.2020

Принята к публикации 16.06.2020

Проведено исследование кризиса теплообмена при кипении воды в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц оксида алюминия. Эксперименты выполнены на усовершенствованной установке в горизонтально расположенном микроканале с размерами $12.5 \times 3 \times 0.2$ мм, изготовленном с жесткими подводящей и отводящей линиями, что привело к уменьшению пульсаций тепловой нагрузки. Обнаружено, что при кипении в микроканале с разомкнутым контуром циркуляции с уменьшением длины выходного участка критическая тепловая нагрузка растет. Расчет критической тепловой нагрузки в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц проведен с использованием формул, полученных ранее при исследовании кризиса теплообмена в горизонтальной трубе с микропористым покрытием и односторонним нагревом. Для микроканала с покрытием из наночастиц в расчете не учитывается влияние недогрева жидкости и начального участка. Расчет критической тепловой нагрузки в микроканале с покрытием из наночастиц проведен в предположении, что толщина покрытия равна 500 нм, за характерный размер принят размер частиц, равный 50 нм. Получено удовлетворительное согласование опытных и расчетных данных. Однако существующих опытных данных по критической тепловой нагрузке при кипении воды в микроканале с покрытием из наночастиц очень мало, чтобы сделать более обоснованный расчет.

Ключевые слова: микроканал, наночастицы, критическая тепловая нагрузка, кризис теплообмена, интенсификация теплообмена, пористое покрытие.

Введение

Применение компактных микроканальных теплообменников в технике позволяет повысить ее эффективность. В работах [1–5] представлены данные по критическим тепловым нагрузкам при кипении в микроканале. Исследование кипения в микроканалах различных размеров показало, что с уменьшением

их высоты кривая кипения смещается вправо [1, 2]. В работах [3, 4] рассмотрено возникновение неустойчивостей при кипении в микроканале и их влияние на критическую тепловую нагрузку.

Кипение воды в теплообменнике, который состоял из двух микроканалов с размерами 16×2 мм и высотой 360 мкм, исследовано в [5]. Показано, что в диапазоне массовых скоростей $100\text{--}600$ кг/(м²·с) с ростом массовой скорости критическая тепловая нагрузка увеличивается.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-00183.

Эффективным методом интенсификации теплообмена является нанесение микропористого покрытия, так как оно обеспечивает интенсификацию теплообмена при всех режимах кипения [6]. В работе [7] при изучении характеристик пористого медного фитиля обнаружено, что эффективная теплопроводность с ростом пористости снижается.

В работе [8] получено, что с ростом размера частиц Al_2O_3 в покрытии критическая тепловая нагрузка при кипении воды в трубе диаметром 10.92 мм возрастает. Так, например, в диапазоне массовых скоростей от 100 до 300 кг/(м²·с) при увеличении размера частиц от 1 до 10 мкм критическая тепловая нагрузка растет от 3 до 5 МВт/м².

Микропористое спеченное покрытие является эффективным при кипении, однако его сложно нанести в микроканале. Поэтому нанесем на поверхность покрытия наночастицы путем организации кипения наножидкости в микроканале. В работах [9–14] рассмотрены имеющиеся представления о влиянии наночастиц на критическую тепловую нагрузку.

В работах [9–12] исследовано кипение воды с добавками наночастиц в большом объеме и обнаружено, что даже очень малые объемные концентрации наночастиц в воде (0.01–0.1 % (об)) приводят к повышению критической тепловой нагрузки.

Увеличение критической тепловой нагрузки при кипении наножидкости связано с осаждением наночастиц на поверхности нагрева и улучшением смачиваемости [13]. В случае полированной поверхности покрытие из наночастиц приводит к улучшению теплообмена при кипении, в то время как при кипении на технически гладкой поверхности наночастицы приводят к уменьшению отводимого теплового потока [14].

В работах [15–19] представлены опытные данные по влиянию покрытия из наночастиц на критическую тепловую нагрузку при кипении воды в микроканале, обсуждаются технологии нанесения пористых покрытий, выбор их характеристик. В работе [20] исследованы теплоотдача и паросодержание при кипении воды в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц и обнаружено, что критическая тепловая нагрузка увеличивается на 30–50% и растет также тепловая нагрузка в переходном

режиме кипения. С ростом массовой скорости увеличиваются пульсации истинного объемного паросодержания. Однако причины пульсаций паросодержания не выяснены.

Кризис теплообмена в микроканале с покрытием из наночастиц исследован в [21], отмечено, что важно исследовать характеристики пористых покрытий: размер, толщину, эффективную теплопроводность, пористость и проницаемость.

В работах [22–25] описаны имеющиеся представления по расчету критических тепловых нагрузок и характеристик пористых структур, которые могут быть использованы при анализе результатов. В работе [22] предложена формула для расчета критической тепловой нагрузки при кипении в большом объеме в зависимости от краевого угла, которая описывает ее рост при уменьшении краевого угла. В работе [23] получена зависимость критической тепловой нагрузки от высоты канала. С уменьшением высоты канала (от 3 до 0.2 мм) критическая тепловая нагрузка снижается. Рабочая жидкость – вода. Диапазон исследуемых скоростей от 5000 до 15000 кг/(м²·с). Предложена формула для критической тепловой нагрузки в узких прямоугольных каналах и трубах малого диаметра с использованием безразмерного параметра. Погрешность при расчете критической тепловой нагрузки составляет ±45%. Однако в работе исследовано кипение в каналах без покрытия.

В работе [24] исследовано влияние покрытия из наночастиц Al_2O_3 на критическую тепловую нагрузку при кипении R-123 в трубе диаметром 5.45 мм и длиной 280 мм. Диапазон массовых скоростей составлял от 1600 до 2100 кг/(м²·с). При получении формулы для критической тепловой нагрузки принято, что частицы сферические, однако не все параметры определены в ее итоговом выражении. В работе [25] исследована пористость покрытий из различных металлических волокон, полученных спеканием, и предложены формулы для определения среднего, максимального и минимального диаметров пор. Получено, что максимально возможный поток, который может передаваться тепловой трубой, зависит от проницаемости фитиля, определяется пористостью, диаметром волокон и их длиной. При увеличении пористости структуры проницаемость покрытия возрастает.

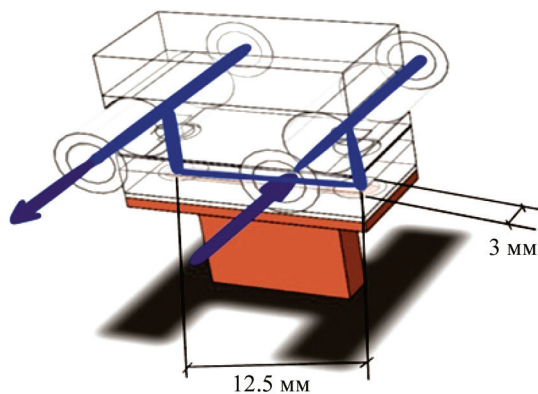


Рис. 1. 3D-вид рабочего участка

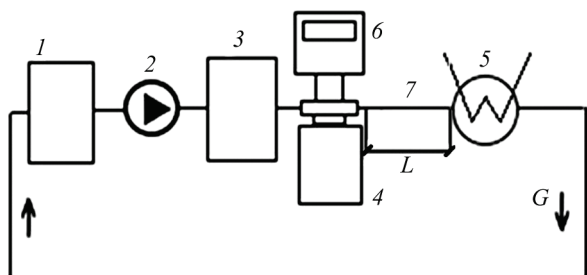
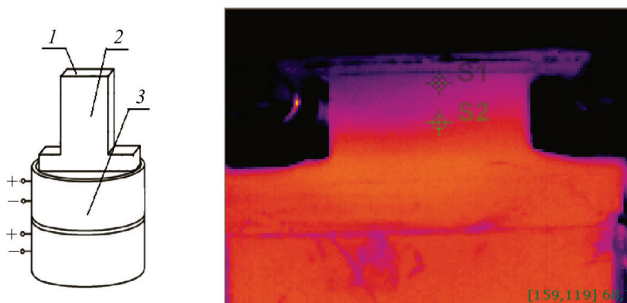
Рис. 2. Схема установки: 1 – бак с жидкостью; 2 – насос; 3 – сглаживающий бак; 4 – рабочий участок; 5 – конденсатор; 6 – дифманометр; 7 – выходной участок длиной L 

Рис. 3. Медный блок и термограмма его поверхности. 1 – поверхность кипения; 2 – измерительная поверхность; 3 – электронагреватель

Таким образом, задача исследования кризиса теплообмена при кипении в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц является актуальной и решению ее посвящена настоящая работа.

Описание экспериментальной установки и методики исследования

Подробное описание экспериментальной установки дано в работе [20]. Циркуляция в контуре установки создается насосом DLX VFT/MBV. Рабочий участок представляет собой

микроканал размерами $12.5 \times 3 \times 0.2$ мм. Одна сторона микроканала нагревается по методу теплового клина. Другая сторона сделана из стекла и в ней установлены трубки подвода и отвода рабочей жидкости, которые позволяют устранить пульсации давления в контуре. Между верхней и нижней пластиной расположены трубки для измерения давления (рис. 1).

Высота канала обеспечивалась с помощью проволоки диаметром 0.2 мм, уложенной по периметру между поверхностью нагрева и стеклянной пластиной. Рабочий участок герметизировался. Для этого на стеклянную поверхность укладывалась проволока, на проволоку наносился герметик, после чего стеклянная пластина скреплялась с поверхностью нагрева, обработанной наждачной бумагой P600. После выдержки зажимы снимались, и собирался контур.

На рис. 2 представлена принципиальная схема экспериментальной установки с разомкнутым контуром циркуляции. Длину трубки, установленной на выходе из микроканала, можно было изменять. На рис. 3 представлены медный блок и термограмма поверхности. Методика исследования теплоотдачи в микроканале основана на измерении распределения температуры поверхности медного блока, покрытой слоем частиц TiN, тепловизором. Покрытие поверхности меди нитридом титана позволяет обеспечить стабильность коэффициента излучения во времени и в пространстве. До начала эксперимента проводится калибровка тепловизора путем измерения температуры медного блока термопарой. Для расчета плотности теплового потока проводится линейная аппроксимация распределения температуры в рабочем участке.

В соответствии с законом Фурье

$$q = \lambda \cdot K, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности рабочего участка (меди); K – угловой коэффициент, полученный при линейной аппроксимации распределения температуры в медном блоке.

Температура поверхности теплообмена микроканала рассчитывается экстраполяцией температуры в медном блоке. Измерения температуры проводились инфракрасной видеокамерой. Масштаб изображения в тепловизоре в среднем составлял 0.15–0.17 мм/пиксел.

Достоверность данных по теплообмену, получаемых на микроканальной установке при обогреве с помощью медного блока, была подтверждена анализом результатов специальных экспериментов по кипению воды на пластине в большом объеме. Были уточнены неопределенности и проведено сопоставление с известными данными. Ошибка измерения теплового потока возникает из-за небольшого размера зоны измерения и зависит от разрешения камеры тепловизора и шума матрицы. Основной вклад в ошибку температурного напора вносит измерение толщины тонкой подложки, отделяющей последнюю видимую точку блока на тепловизоре и поверхность, контактирующую с водой. В исследованных условиях уточненные значения неопределенности определения температурного напора не превышают 12.5%, а теплового потока 19.9%.

Результаты эксперимента

Влияние конструкции входа в микроканал на вид кривой кипения

Кривая кипения, полученная на данной установке, включает пузырьковый и переходный режимы кипения (рис. 4).

При замене гибких подводящей и отводящей линий на жесткие пульсации тепловой нагрузки в переходном режиме кипения уменьшились.

Влияние длины выходного участка на критическую тепловую нагрузку при кипении воды в микроканале

Сопротивление на выходе из микроканала увеличивается с ростом длины выходного участка. Это приводит к его дополнительному запариванию и уменьшению критической тепловой нагрузки. Для выявления этой зависимости была проведена серия опытов с разной длиной выходного участка при массовой скорости 300 кг/(м²·с). Результаты представлены на рис. 5. Также на графике показана критическая тепловая нагрузка из работы [20] при той же массовой скорости.

При близкой длине выходного участка данные двух работ удовлетворительно согласуются. В обеих работах опыты проведены при разомкнутом контуре. Обнаружено, что с уменьшением длины выходного участка критическая тепловая нагрузка растет.

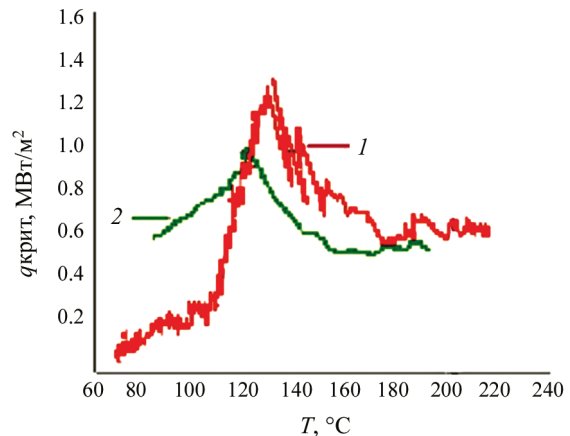


Рис. 4. Кривые кипения в микроканале без покрытия, полученные в [20] (1) и в настоящей работе (2). Недогрев 80°C, $w = 0.1$ м/с

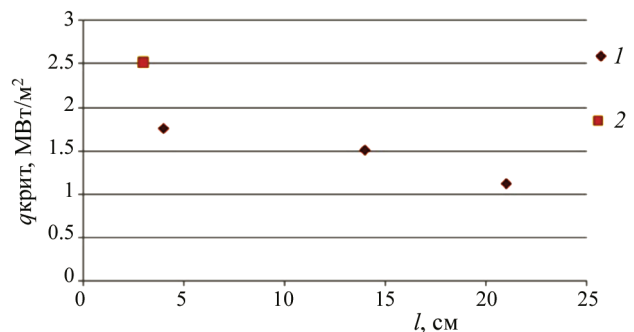


Рис. 5. Зависимость критической тепловой нагрузки при кипении воды в микроканале от длины выходного участка: 1 – данные настоящей работы; 2 – данные [20]

Методика и результаты расчета критической тепловой нагрузки в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц оксида алюминия

Расчет критической тепловой нагрузки в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц оксида алюминия проведен с использованием формул из работы [6], полученных при исследовании кризиса теплообмена в горизонтальной трубе с микропористым покрытием с односторонним нагревом. Это можно рассматривать как приближение, учитывая различие условий возникновения кризиса теплообмена в двух случаях. Для микроканала без покрытия примем, что:

$$q_{кр0} = 9.1 \cdot 10^{-3} q_0 \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0.25} \cdot \text{Re}_s^{0.26}, \quad (2)$$

$$\text{где } \text{Re}_s = \frac{\rho W_0}{\mu_s} D_2; \quad W_0 = \frac{\rho w}{\rho'}; \quad q_0 = r \sqrt{\frac{\sigma \rho''}{D_2}}.$$

Для микроканала с покрытием из наночастиц расчет критической тепловой нагрузки прово-

дится без учета влияния недогрева жидкости и начального участка:

$$q_{кр} = q_{кр} \Psi_{п.п.} \quad (3)$$

Влияние покрытия из наночастиц на критическую тепловую нагрузку описывается модифицированным выражением:

$$\Psi_{п.п.} = 1 + 0.44 N^{0.1} (1 - 0.01 Re_s^{0.05}), \quad (4)$$

где $N = \left(\frac{D_{max} r p' \cdot T_s}{4 \sigma T_s} \right)^m$; $m = -16300 \frac{\delta_{п.п.}}{\lambda_{эф}} + 4 -$

выбирается по данным работы [1]; $\delta_{п.п.}$ – толщина слоя наночастиц; D_{max} – размер наночастиц; N – характеризует увеличение плотности центров парообразования для поверхности с покрытием; $\lambda_{эф}$ – рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{эф} = \gamma \lambda_k + (1 - \gamma) \left(\frac{1 - \varepsilon}{\lambda_k} + \frac{\varepsilon'}{\lambda'} + \frac{\varepsilon''}{\lambda''} \right)^{-1}.$$

Принимаем $\gamma = 0.3$; ε' и ε'' равными 0.25. ΔT_s определяется по формуле Барча и Шрёдер–Рихтера:

$$\Delta T_s = T_s \cdot \left[\frac{1}{\left(1 - 0.6 \cdot \frac{T_s}{r} \right)} - 1 \right],$$

где T_s – температура насыщения; r – теплота парообразования.

Сопоставление полученных данных с известными результатами для канала без покрытия

С помощью уравнения (2) рассчитаны критические тепловые нагрузки для микроканала без покрытия. Результаты представлены на рис. 6. Там же показаны данные для микроканала без покрытия из работ [5, 20].

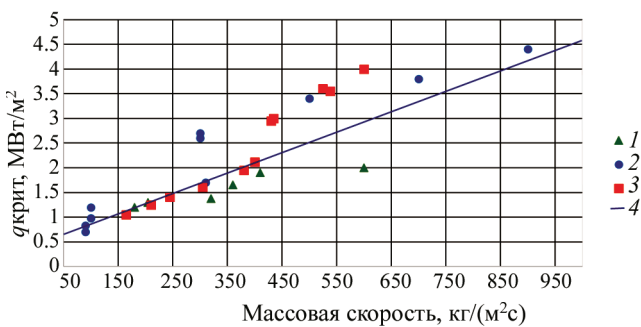


Рис. 6. Зависимость критической тепловой нагрузки от массовой скорости для микроканала без покрытия: 1 – настоящая работа; 2 – данные [20]; 3 – данные [5]; 4 – расчет по формуле (2)

Полученные данные охватывают диапазон массовых скоростей от 85 до 900 кг/(м²·с). Отклонение результатов расчета от данных [20] в диапазоне до 300 кг/(м²·с) не превышает 15%; от данных [5] – 10%. Отклонение расчетных данных от экспериментальных результатов при скоростях свыше 300 кг/(м²·с) достигает 25%.

Необходимо получить новые данные по критической тепловой нагрузке, чтобы более обстоятельно провести их анализ.

Сопоставление экспериментальных данных из работы [20] для канала с покрытием из наночастиц оксида алюминия с результатами расчета

На рис. 7 представлены результаты работы [20] при кипении воды в микроканале высотой 0.2 мм, шириной 3 мм и длиной 12.5 мм с покрытием из наночастиц оксида алюминия. На этом же рисунке нанесены две линии, полученные в результате расчета по формулам (2)–(4).

С учетом наличия агломератов наночастиц и рекомендаций работы [25] было принято, что характерный размер частиц равен 50 нм, а толщина покрытия равна 500 нм. При определении эффективной теплопроводности покрытия приняты доли пара и жидкости, равные 0.25. Кроме того, для уменьшения отклонения расчетных данных от результатов эксперимента в уравнении (4) скорректированы коэффициент перед числом Re и степень, в которую оно возводится. С учетом сделанных допущений отклонения расчетных данных от результатов работы [20] не превышают 30%. Для микроканала с покрытием из наночастиц критическая тепловая нагрузка больше в среднем в 1.5 раза. Как видно

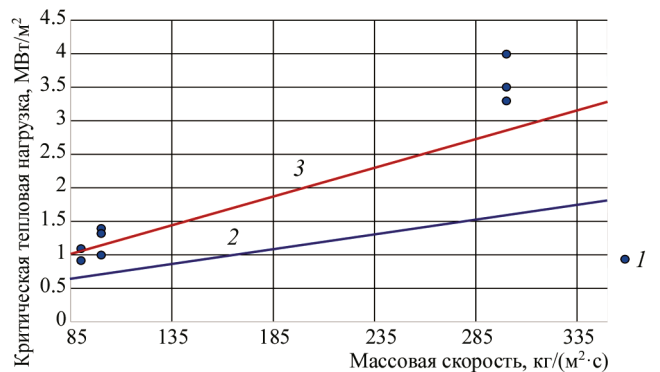


Рис. 7. Зависимость критической тепловой нагрузки от массовой скорости для микроканала без покрытия и с покрытием из наночастиц Al₂O₃: 1 – данные [20]; 2 – расчет для канала без покрытия по формуле (2); 3 – расчет для канала с покрытием по формулам (3), (4)

из рисунка, при большей скорости влияние покрытия из наночастиц на критическую тепловую нагрузку проявляется более сильное.

В дальнейшем необходимо расширить массив данных, чтобы усовершенствовать уравнения для расчета критической тепловой нагрузки. Кроме того, необходимо усовершенствовать зависимости для определения $\delta_{п.п.}$, D_{max} , $\lambda_{эф.}$

Обсуждение результатов

Покрытие из наночастиц формировалось при кипении наножидкости, представляющей собой коллоидный раствор наночастиц Al_2O_3 . Получившееся покрытие имеет различную по поверхности толщину: темные участки примерно 1 мкм, светлые – 250 нм (рис. 8) [20]. Возможно, что неоднородность слоя наночастиц получилась из-за образования сухих пятен под пузырями при кипении (светлые участки).

Оценка характерного размера пор в покрытии проведена с использованием формул [25]. При выбранных толщине покрытия и размере частиц минимальный размер пор равен 14 нм, средний – 23 нм, максимальный – 39 нм. Если толщина и размер частиц будут больше, то характерные размеры пор увеличиваются и критическая тепловая нагрузка растет. Однако формулы [25] не учитывают наличие агломератов наночастиц, закрытых пор, переменную по поверхности толщину покрытия и их следует усовершенствовать.

Таким образом, можно принять, что достигнуто удовлетворительное согласование расчетных и опытных данных. Повышение критической тепловой нагрузки для микроканала с покрытием из наночастиц вызвано улучшением смачивания благодаря пористой структуре, образованной наночастицами и их агломератами.

Формулы для расчета критической тепловой нагрузки в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц имеют ряд допущений, поэтому необходимо провести новые эксперименты, чтобы их усовершенствовать.

Заключение

Получены данные по критической тепловой нагрузке в микроканале с жесткими подводящей и отводящей линиями, что привело к уменьшению пульсаций тепловой нагрузки в области переходного кипения. Обнаружено, что при кипении воды в микроканале с разомкнутым конту-

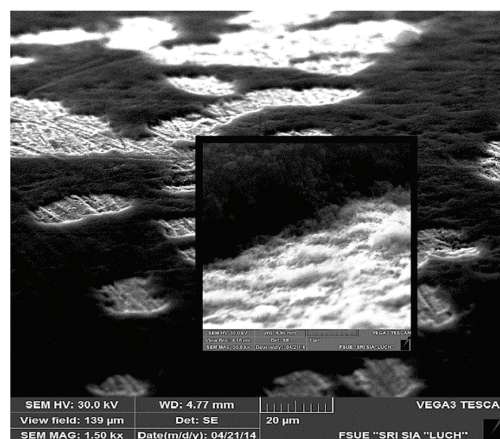


Рис. 8. Покрытие из наночастиц Al_2O_3 . Подложка из никеля

ром циркуляции с уменьшением длины выходного участка критическая тепловая нагрузка растет.

Расчет критической тепловой нагрузки при кипении воды в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц проведен с использованием формул, предложенных ранее при исследовании кризиса теплообмена в горизонтальной трубе с микропористым покрытием с односторонним нагревом. Получено удовлетворительное согласование опытных и расчетных данных. Однако массив данных ограничен и его необходимо расширить, чтобы усовершенствовать уравнения для расчета критической тепловой нагрузки в микроканале. Проведена оценка размеров пор в покрытии из наночастиц.

Использование микроканальных теплообменников для охлаждения электроники, тепловых насосов, автомобильных двигателей приводит к уменьшению массы, размеров и энергопотребления устройств. Поэтому исследование кризиса теплообмена в микроканале без покрытия и с покрытием из наночастиц для повышения критической тепловой нагрузки в микроканальных установках является актуальным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suzuki K., Inagaki R. A fundamental study on high heat flux cooling using subcooled flow boiling with microbubble emission, proceedings of fifth international conference on enhanced, compact and ultra-compact heat exchangers // Science, Engineering and Technology. CDROM, CHE2005-37, 2005. P. 295–299.
2. Сузуки К., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Шустов М.В., Чурсин П.С. Исследование теплообмена и гидродинамики при кипении недогретой воды в канале малого диаметра // Тепловые процессы в технике. 2012. Т. 4. № 7. С. 307–311.
3. Qu W., Mudawar I. Measurement and correlation of critical heat flux in two-phase micro-channel heat sinks // Int. J. Heat Mass Transfer. 2004. V. 47. N 10-11. P. 2045–2059,

4. **Ховалыг Д.М.** Закономерности динамики двухфазных потоков и теплообмена при кипении хладагента R134 в микроканалах. Дисс...канд. техн. наук. Санкт-Петербургский НИУ информационных технологий, механики и оптики. 2013. 149 с.
5. **Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S.** The influence of the mass flow rate on the critical heat flux during subcooled deionized water boiling in a microchannel cooling system // *Technical Physics Letters*. 2018. V. 44. N 10. P. 938–941.
6. **Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Федик И.И., Холпанов Л.П.** Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2008. 532 с.
7. **Giraudona R., Lipsa S., Fabrègue D., Gremillard L., Maireb E., Sartrea V.** Fabrication and characterization of efficient wicks for loop heat pipes // *Joint 18th IHPC and 12th IHPS, Jeju, Korea, June 12-16, 2016*. P. 7.
8. **Gangtao Liang, Issam Mudawar.** Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 146. Art. 118864.
9. **Wen D., Ding Y.** Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -alumina nanofluids // *Journal of Nanoparticle Research*. 2005. V. 7. P. 265–274.
10. **Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Shustov M.V., Chursin P.S., Chistyakova A.V.** Boiling characteristics at nanoparticle coated surface // *ECI 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 3-7 June 2012*. Lausanne, Switzerland.
11. **Milanova D., Kumar R.** Role of ions in pool boiling heat transfer of pure and silica nanofluids // *Applied Physics Letters*. 2005. V. 87. Paper 233107, 3 p.
12. **Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W.** Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2007. V. 50. N 19-20. P. 4105–4116.
13. **Kim H., Kim M.** Experimental study of the characteristics and mechanism of pool boiling CHF enhancement using nanofluids // *J. Heat Mass Transfer*. 2009. V. 45. P. 991–998.
14. **Кузма-Кичта Ю., Лавриков А., Шустов М., Чурсин П., Чистякова А., Звонарев Ю., Жуков В., Васильева Л.** Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро- и нанорельефом // *Теплоэнергетика*. 2014. № 3. С. 35–38.
15. **Kuzma-Kichta Yu., Leontiev A.** Heat and mass transfer enhancement on macro-, micro-, and nanoscales choice and justification of the heat transfer intensification methods // *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2018. V. 25. Iss. 6. P. 465–565.
16. **Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Kustova E.A., Kuleshov E.A.** Research of water boiling in microchannel // *Journal of Physics: Conference Series* 2019. V. 1370(1). Art. 012058.
17. **Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu. A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.** Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscales. Begell House, 2016. 630 p.
18. **Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Лавриков А.В., Киселев Д.С.** Способ получения наночастиц оксида алюминия. Патент № РФ 2665524. Опубл. 30 августа 2018 г.
19. **Волчков Э.П., Дзюбенко Б.В., Драгунов Ю.Г., Исаев С.А., Коротеев А.А., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И., Попов И.А., Терехов В.И., Алексенко С.В.** Вихревые технологии для энергетики. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. 350 с.
20. **Шустов М.В., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В.** Покрытие микроканала наночастицами – эффективный метод повышения критической тепловой нагрузки // *Теплоэнергетика*. 2017. № 4. С. 72–78.
21. **Kuzma-Kichta Yu., Leontyev A., Lavrikov A., Shustov M., Suzuki K.** Boiling investigation in the microchannel with nanoparticles coating // *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference, IHTC-15 August 10-15, 2014, Kyoto, Japan*.
22. **Kandlikar S.G.** A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation // *J. Heat Transfer*. 2001. V. 123. N 6. P. 1071–1079.
23. **Kureta M., Akimoto H.** Critical heat flux correlation for subcooled boiling flow in narrow channels // *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2002. V. 45. P. 4107–4115.
24. **Seok Bin Seo, In Cheol Bang.** Effects of Al_2O_3 nanoparticles deposition on critical heat flux of R-123 in flow boiling heat transfer // *Nucl. Eng. Technol.* 2015. V. 47. N 4. P. 398–406.
25. **Khairnasov S., Andraka C.E., Baturkin V., Zaripov V., Nishchik O.** Development of advanced high porosity wicks for the high temperature heat pipes of concentrating solar power // *Joint 18th IHPC and 12th IHPS, Jeju, Korea, June 12-16, 2016. SAND2016-2627C*. P. 58–65.

Research of heat transfer crisis in a microchannel without coating and with coating from nanoparticles during water boiling

**Yu.A. Kuzma-Kichta¹, A.V. Lavrikov¹, M. Shustov²,
E.A. Kustova¹, N.S. Ivanov¹, E.A. Kuleshov¹, A.S. Kiselev¹**

¹ *National research University "MPEI", Moscow, 111250, Russia*

² *Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel*

e-mail: kuzma@itf.mpei.ac.ru; shustovMV@gmail.com; lavrikovav@yandex.ru; katerinlksa@gmail.com; mc.propeller@mail.ru; kuleshov.evgeniy.98@mail.ru; fortynaalex088@gmail.com

Using of compact microchannel heat exchangers can to increase technics efficiency and reduce it environmental impact. In this paper the heat transfer crisis was investigated during water boiling in a microchannel without coating and with coating from aluminum oxide nanoparticles. Experiments were performed on advanced installation with horizontally located microchannel with dimensions of 12.5×3×0.2 mm. Data of critical heat flux were received in a microchannel with solid supply lines. This supply lines led to decrease the heat flux fluctuations in the boiling. It was found that during boiling in a microchannel with open circulation circuit if the length of outlet section decreases, the critical heat flux increases. Calculation of the critical heat flux in a microchannel without coating and with coating from nanoparticles, carried out by for-

mulas for heat transfer crisis in a horizontal pipe with microporous coating and one-sided heating. For microchannel coated with nanoparticles, the critical heat flux was calculated without effect of liquid subcooling and initial section. In calculating the thickness of the layer from nanoparticles is chosen equal to 500 nm, the particle size is chosen equal to 50 nm. It is obtained satisfactory agreement between the experimental and calculated data. Also it is evaluated of pore size in a coating from nanoparticles. However, the data array is limited and needs to be expanded, which will improve the equations for calculating critical heat flux in a microchannel.

Keywords: microchannel, nanoparticles, critical heat flux, heat transfer crisis, heat transfer intensification, porous coating.

REFERENCES

1. Suzuki K., Inagaki R. A fundamental study on high heat flux cooling using subcooled flow boiling with microbubble emission. *Proceedings of Fifth International Conference on Enhanced, Compact and Ultra-compact Heat Exchangers; Science, Engineering and Technology*, CDROM, CHE2005-37, 2005, pp. 295–299.
2. Suzuki K., Kuzma-Kichta Yu., Lavrikov A., Shustov M., Chursin P. Issledovanie teploobmena I gidrodinamiki pri kipenii nedogretoj vody v kanale malogo diametra [Investigation of heat-transfer and hydrodynamics during subcooled water boiling in small-size channel]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2012, vol. 4, no. 7, pp. 307–311. In Russ.
3. Qu W., Mudawar I. Measurement and correlation of critical heat flux in two-phase micro-channel heat sinks. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, vol. 47, no. 10-11, pp. 2045–2059.
4. Hovaly D.M. *Zakonomernosti dinamiki dvufaznykh potokov I teploobmena pri kipenii khladagenta R134 v mikrokanalakh*. Diss. cand. techn. Nauk [Model of dynamics of two-phase flows and heat transfer during boiling of R-134 refrigerant in microchannels. PhD thesis]. St. Petersburg, 2013. 149 p.
5. Kuznetsov V.V., Shamirzaev A.S. The influence of the mass flow rate on the critical heat flux during subcooled deionized water boiling in a microchannel cooling system. *Technical Physics Letters*, 2018, vol. 44, no. 10, pp. 938–941.
6. Dzybenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. *Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscales*. Moscow: TSNIATOMINFORM, 2008. 532 p. In Russ.
7. Giraudon R., Lipsa S., Fabrigue D., Gremillard L., Maireb E., Sartre V. Fabrication and characterization of efficient wicks for loop heat pipes. *Proceedings of Joint 18th IHPC and 12th IHPS*, 2016, p. 7.
8. Gangtao Liang, Issam Mudawar. Review of channel flow boiling enhancement by surface modification, and instability suppression schemes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 146, art. 118864. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118864>
9. Wen D., Ding Y. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based γ -alumina nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 2005, vol. 7, pp. 265–274.
10. Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Shustov M.V., Chursin P.S., Chistyakova A.V. Boiling characteristics at nanoparticle coated surface. *ECI – 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, Lausanne, Switzerland*. 2012.
11. Milanova D., Kumar R. Role of ions in pool boiling heat transfer of pure and silica nanofluids. *Applied Physics Letters*, 2005, vol. 87, paper 233107, 3 p. <https://doi.org/10.1063/1.2138805>
12. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2007, vol. 50, no. 19-20, pp. 4105–4116. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002>
13. Kim H., Kim M. Experimental study of the characteristics and mechanism of pool boiling CHF enhancement using nanofluids. *Heat Mass Transfer*, 2009, vol. 45, pp. 991–998. <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0318-8>
14. Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Shustov M.V., Chursin P.S., Chistyakova A.V., Vasil'eva L.T., Zvonarev Yu.A., Zhukov V.M. Studying heat transfer enhancement for water boiling on a surface with micro- and nanorelief. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 3, pp. 210–213. DOI: 10.1134/S0040601514030069
15. Kuzma-Kichta Yu., Leontiev A. Choice and justification of the heat transfer intensification methods. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2018, vol. 25, no. 6, pp. 465–565. DOI: 10.1615/JEnhHeatTransf.v25.i6.20
16. Kuzma-Kichta Y.A., Lavrikov A.V., Kustova E.A., Kuleshov E.A. Research of water boiling in microchannel. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1370(1), art. 012058. DOI: 10.1088/1742-6596/1370/1/012058
17. Dzybenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. *Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscales*. Begell House Publishers Inc., U.S., 2017. 630 p.
18. Kuzma-Kichta Yu.A., Inavov N.S., Lavrikov A.V., Kiselev D.S. *Method of Producing Nanoparticles from Oxide Aluminum*. Patent RF, no. 2665524, 2018.
19. Volchkov E.P., Dzybenko B.V., Dragunov Yu.G., Isaev S.A., Koroteev A.F., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I., Popov I.A., Terekhov V.I., Aleksenko S.V. *Vortex Technologies for Energy*. Moscow: MPEI Publishing House, 2017. 350 p. In Russ.
20. Shustov M.V., Kuzma-Kichta Y.A., Lavrikov A.V. Nanoparticle coating of a microchannel surface is an effective method for increasing the critical heat flux. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 4, pp. 301–306. DOI: 10.1134/S0040363617040075
21. Kuzma-Kichta Yu., Leontiev A., Lavrikov A., Shustov M., Suzuki K. Boiling investigation in the microchannel with nanoparticles coating. *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference – IHTC-15 Kyoto, Japan*. 2014.
22. Kandlikar S.G. A theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation. *J. Heat Transfer*, 2001, vol. 123, no. 6, pp. 1071–1079.
23. Kureta M., Akimoto H. Critical heat flux correlation for subcooled boiling flow in narrow channels. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 2002, vol. 45, no. 20, pp. 4107–4115. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(02\)00129-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00129-1)
24. Seok Bin Seo, In Cheol Bang. Effects of Al_2O_3 nanoparticles deposition on critical heat flux of R-123 in flow boiling heat transfer. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015 vol. 47, no. 4, pp. 398–406. DOI 10.1016/j.net.2015.04.003
25. Khairnasov S., Andraka C.E., Baturkin V., Zaripov V., Nishchik O. Development of advanced high porosity wicks for the high temperature heat pipes of concentrating solar power. *Joint 18th IHPC and 12th IHPS*, 2016, pp. 58–65.