

УДК 536.24.08

**Б.В. Косой\***, **У. Утака\*\***, **М. И. Слободенюк\***

\*Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная 112, Одесса, 65044, Украина

\*\*Национальный университет Йокогама, 79-5 Токивадаи, Ходогайа, Йокогама, 240-8501, Япония

## ТЕХНОЛОГИЯ МИКРОКАНАЛЬНОГО ИСПАРИТЕЛЬНОГО ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ

*Работа посвящена экспериментальному и теоретическому анализу применения теплообмена при кипении в потоке для задач терморегулирования. Авторы представляют результаты экспериментального исследования теплообмена и критического теплового потока (КТП) при кипении недогретого этанола для микроканального теплообменника, состоящего из 28 прямоугольных каналов с диаметром 0,5 мм. Исследования проводились при диапазоне скоростей циркуляции этанола в каналах 0,5-1 м/с, температуре на входе в каналы 48, 58 и 68 °С. Наступление критического теплового потока непосредственно связано с гидравлическими неустойчивостями, следствием которых является выброс пара в распределительный коллектор. Недогрев жидкости существенно влияет на величину КТП, особенно в области высоких расходов.*

**Ключевые слова:** микроканал – кипение – теплообмен – смачивание – КТП

**Б.В. Косой\***, **У. Утака\*\***, **М. И. Слободенюк\***

\*Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна 112, Одеса, 65044, Україна

\*\* Національний університет Йокогама, 79-5 Токівадаі, Ходогайа, Йокогама, 240-8501, Японія

## ТЕХНОЛОГІЯ МІКРОКАНАЛЬНОГО ВИПАРНОГО ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ

*Робота присвячена експериментальному і теоретичному аналізу застосування теплообміну при кипінні в потоці для задач терморегулювання. Автори представляють результати експериментального дослідження теплообміну і критичного теплового потоку (КТП) при кипінні недогрітої етанолу для мікроканальних теплообмінника, що складається з 28 прямокутних каналів з діаметром 0,5 мм. Дослідження проводилися при діапазоні швидкостей циркуляції ця-Нола в каналах 0,5-1 м / с, температурі на вході в канали 48, 58 і 68 оС. Наступ критичного теплового потоку безпосередньо зв'язано з гідравлічними нестійкістю, наслідком яких є викид пари в розподільний колектор. Недогрів рідко-сти суттєво впливає на величину КТП, особливо в області високих витрат.*

**Ключові слова:** мікроканал – кипіння – теплообмін – змочування – КТП

**B.V. Kosoy\***, **U. Utaka\*\***, **M. I. Slobodenyuk\***

\*Odessa national academy of food technologies, 112 Kanatnaya str., Odessa, 65044

\*\* Yokohama National University, 79-5 Tokivadai, Hodogaia, Yokohama, 240-8501, Japan

## TECHNOLOGY OF MICROCHANNEL EVAPORATIVE THERMOREGULATION

*This study is devoted to experimental and theoretical analysis of application of flow boiling heat transfer phenomenon for thermal control issues. The authors present an experimental research of heat transfer and critical heat flux (CHF) for subcooled flow boiling of ethanol in microchannel heat exchanger consisting of 28 rectangular channels with hydraulic diameter of 0.5 mm. Investigation was completed for ethanol velocities range of 0.5-1 m/s and inlet temperatures 48, 58 and 68 °C. The onset of the critical heat flux is directly related to the hydraulic instabilities which result in the emission of vapor into the inlet manifold. Subcooling of the fluid significantly effects the value of CHF, especially at high flow rates.*

**Key words:** microchannel – boiling – heat transfer – wetting – CHF

## I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие микроэлектронной промышленности привело к резкой миниатюризации элементов и увеличению их производительности, следствием чего является повышение тепловыделения до уровня, превышающего 50 Вт/см<sup>2</sup> для компьютерных процессоров и 2000 Вт/см<sup>2</sup> для полупровод-

никовых лазерных диодов [1]. В основополагающей работе Туккермана и Писа [2] доказывается возможность отвода сверхвысоких тепловых потоков с помощью каналов с гидравлическим диаметром 75 мкм. Кроме того, с развитием в областях микрообработки материалов, нанотехнологий, топливных элементов и требованиями к уменьшению веса элементов в авиационно-космической

промышленности растет необходимость в миниатюрных теплообменных аппаратах, которые на сегодняшний день успешно разрабатываются и имеют плотность теплообменной поверхности выше, чем  $10\,000\text{ м}^2/\text{м}^3$  [3]. Подобные системы могут быть реализованы путем создания большого количества мини/микроканалов с диаметром 0.1-1 мм.

Критический тепловой поток (КТП) является одним из наиболее важных критериев, ограничивающий работоспособность системы терморегулирования. При достижении КТП происходит резкое снижение коэффициента теплопередачи, что вызвано изменением условий контакта жидкости с теплопередающей поверхностью, на которой происходит испарение или кипение. В зависимости от величины теплового потока, теплофизических свойств и рабочих условий ухудшение контакта жидкость/поверхность может привести к значительному перегреву последней, ее частичному разрушению или другой форме нарушения работоспособности системы в целом, что обуславливает актуальность получения более точной и надежной информации о предельных значениях КТП.

Данное исследование является промежуточным результатом совместной исследовательской деятельности специалистов Одесской национальной академии пищевых технологий (ОНАПТ) и Национального университета Йокогамы (НУЙ), Япония [4].

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

На рисунке 1 схематически представлена конструкция рабочей секции с микроканальным испарителем, разработанная в ОНАПТ. Прямоугольные микроканалы, длиной 30 мм и гидравлическим диаметром 0.5 мм выполнены в медной подложке толщиной 5 мм и шириной 30 мм. Гладкой стороной подложка соединяется с медным концентратором, через который подводится теплота от пяти картриджных нагревателей общей мощностью 1250 Вт. Тепловой концентратор устанавливается в цилиндрический тефлоновый корпус, заполненный аэрогельной теплоизоляцией. Между концентратором и подложкой установлены 4 медь-константановые термопары с диаметром спая 0.005 мм. Также термопары установлены в распределительном и паровом коллекторах для определения температуры жидкости на входе и пара/парожидкостной смеси на выходе.

На рисунке 2 представлено схематическое изображение гидравлического контура. Основная часть рабочего агента находится в резервуаре, через который также проводится дегазация системы. Шестеренчатый насос позволяет создать перепад давления в системе для установления необходимого расхода жидкости. Расход теплоносителя определяется с помощью ротаметра с погрешностью менее 4 %. Также предусмотрена байпасная линия и вентиль перед ротаметром. Такая система играет

определяющую роль в регулировании расхода жидкости.

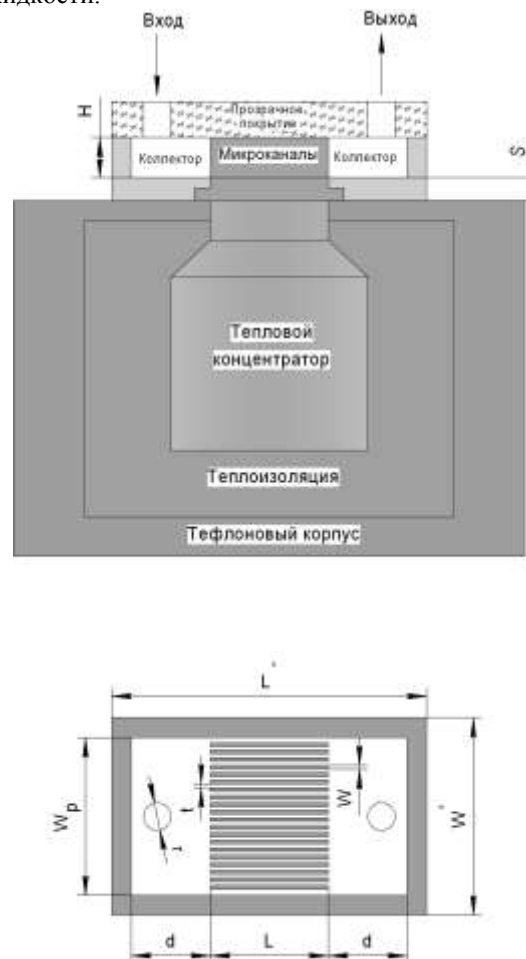


Рисунок 1 – Схематическое изображение рабочей секции (ОНАПТ)

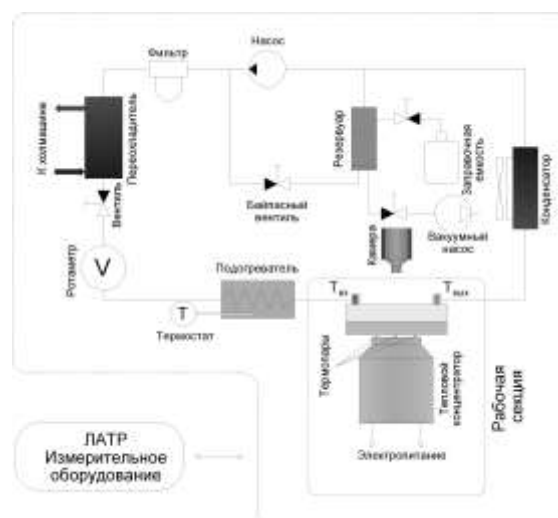


Рисунок 2 – Схема экспериментальной системы

После дегазации устанавливался необходимый расход жидкости и скорость потока. Увеличение уровня подводимого тепла происходило с шагом в 10 Вт. С увеличением теплового потока и,

как следствие, изменением режима кипения периодически приходилось регулировать байпасным и основным вентилем расход жидкости. Регулировка необходимого уровня переохлаждения жидкости производилась с помощью переохладителя, подключенного к холодильной машине и электрического термостатного нагревателя. Каждая экспериментальная серия прекращалась при достижении критического теплового потока. Критический тепловой поток соответствует самому высокому значению теплового потока, определенному для стабильного кипения жидкости до последнего приращения подводимой теплоты.

На рис. 3 показана схема экспериментальной система НУЙ для комплексного исследования теплообмена и гидравлических характеристик при кипении в микроканалах. Детальное описание рабочей секции представлено на рис. 5.

Исследования теплообмена и структуры кипения в НУЙ проводились для насыщенной жидкости. Подогрев поступающей в микроканал жидкости до температуры насыщения осуществляется в открытом подогревателе с кипящей водой. Микроканалы сформированы между структурированной поверхностью и покрытием из кварцевого стекла. С другой стороны структурированной греющей поверхности установлены керамические нагреватели. Также установлены две термопары в изоляторе для определения потерь через данный компонент. Горячий воздух с температурой близкой к 100 °С циркулирует между стеклянными покрытиями для минимизации тепловых потерь от микроканального радиатора.

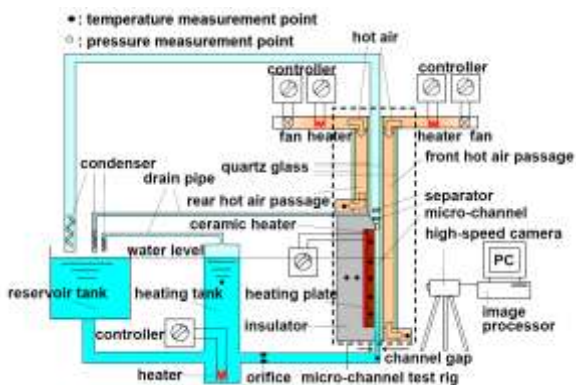


Рисунок 3 – Схема экспериментальной системы Национального университета Йогогамы

Измерения температуры поверхности осуществляются 10 термопарами, установленными пятью парами с обеих сторон канала по всей его длине. Среднее значение показаний термопар, исключая показания двух верхних и двух нижних, принимается как температура теплообменной поверхности.

Ширина канала варьируется от 0, 25 мм до 10 мм. Для изменения свойств поверхности с гидро-

фобных на гидрофильные, были применены покрытия на основе кремния и оксида титана. Для сравнения теплообменных характеристик были изготовлены поверхности с вертикальными канавками. Высота, ширина и шаг канавок составляет 0.1, 0.5 и 0.7 мм, соответственно. Размеры вертикальных канавок были измерены по их верхним границам (скругление у основания не принимается во внимание). Процесс зарождения и роста парового пузырька регистрируется высокоскоростной камерой.

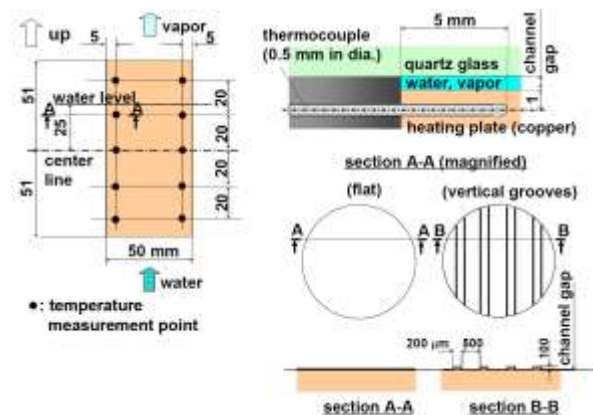


Рисунок 4 – Микроканальная пластина и структура поверхности

Для исследования влияния смачиваемости микроканальных поверхностей, использовались покрытия как с гидрофобными, так и с гидрофильными характеристикам (Рис.5).

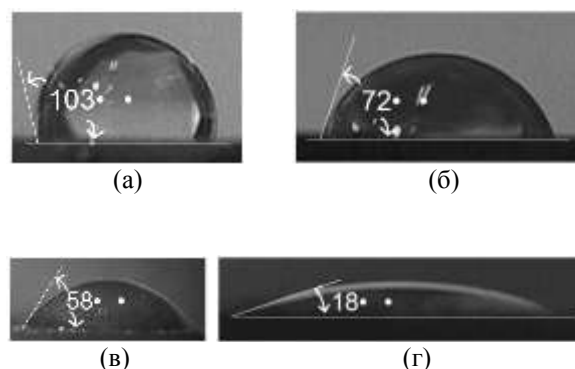
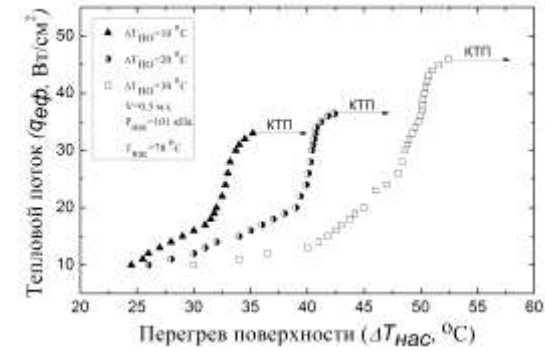


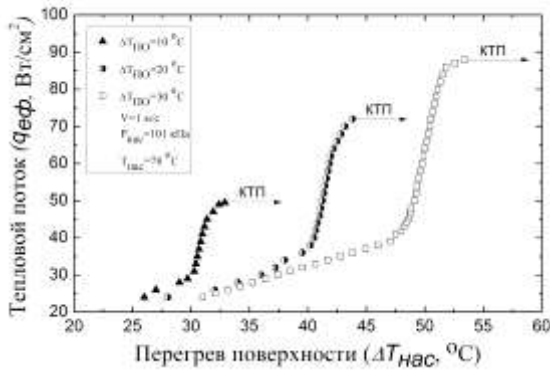
Рисунок 5 – Статические углы смачивания для микроканальных поверхностей с различными покрытиями: (а) кремний; (б) свежие шероховатости; (в) состарившиеся шероховатости; (г) оксид титана

### III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 6 представлены кривые кипения для различных экспериментальных условий.



(а)



(б)

Рисунок 6 – Кривые кипения для расходов: (а)  $V=0,5$  м/с и (б)  $V=1$  м/с

Можно заметить, что кривые кипения для каждого значения переохлаждения этанола лежат практически на одной линии, а влияние расхода жидкости на интенсивность теплообмена незначительно. Тем не менее, для большей скорости циркуляции жидкости  $V = 1$  м/с и переохлаждения  $\Delta T_{по}=30$  °C угол наклона кривой кипения уменьшается, показывая некоторое влияние теплообмена при принудительной конвекции. В этом случае размер пузырьков становится значительно меньшим из-за конденсации на границе пар-жидкость, которая обусловлена меньшей объемной температурой поступающей жидкости. Уменьшение размера и/или схлопывание паровых пузырей, вследствие конденсации, приводит к увеличению площади теплообмена для однофазного потока. Поскольку коэффициенты теплоотдачи при однофазном теплообмене имеют значительно меньшие значения, чем при фазовом переходе, кривая кипения смещается в зону больших перегревов

Высыхание пленки жидкости на стенках начинается с конца канала и продолжается до полного пересыхания поверхности. После этого каналы на короткое время вновь заполняются жидкостью, которая интенсивно испаряется, вследствие чего происходит выброс большого количества пара в распределительный коллектор. Это приводит к временной блокировке подачи жидкости в систему и резкому повышению температуры поверхности.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 7 – Пересыхание каналов: (а)  $\tau=0$ , (б)  $\tau=0.033$  с, (в)  $\tau=0.067$  с

На рисунке 8 представлена структура процесса парообразования на микрокапиллярной поверхности в зависимости от величины теплового потока.

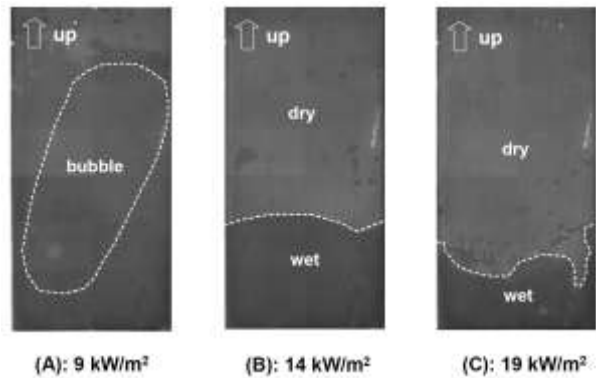


Рисунок 8 – Структура кипения для различных тепловых потоков (размер микроканала 0.25 мм; покрытие – оксид титана)

Путем высокоскоростной видеосъемки были получены данные о картине парообразования на микроканальной поверхности (Рис. 9), что критически необходимо для лучшего понимания особенностей физического механизма и построения надежной математической модели соответствующего процесса.

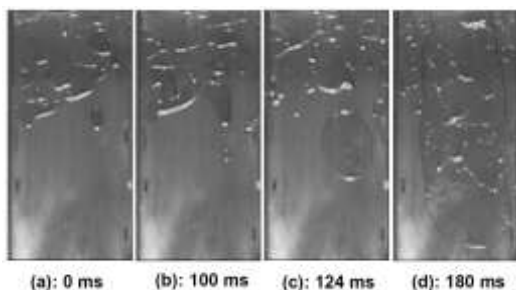


Рисунок 9 – Картина парообразования на микроканальной поверхности (характерный размер микроканала -0.5 мм, тепловой поток 5 кВт/м<sup>2</sup>)

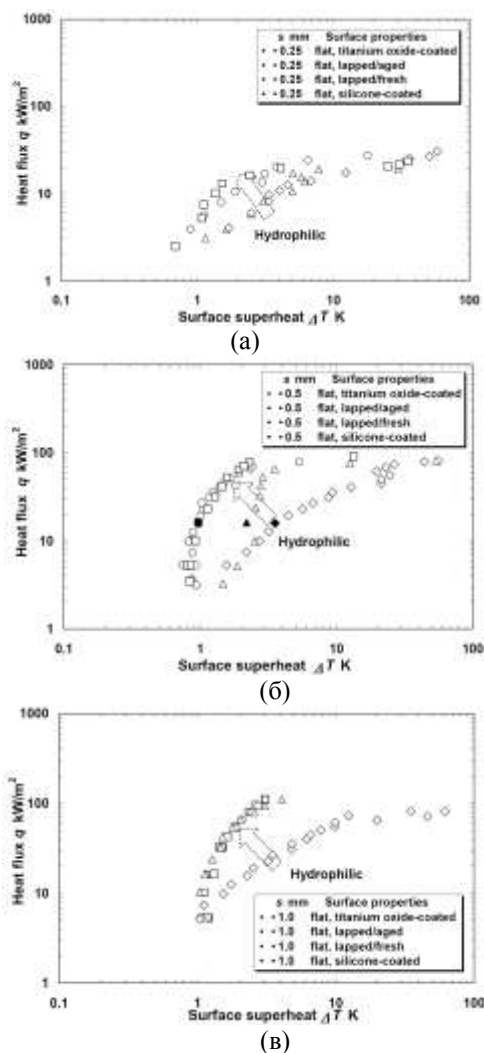


Рисунок 10 – Соотношение между характером кипения и смачиваемостью микроканальной поверхности для следующих характерных размеров микроканала: (а) – 0.25 мм, (б) – 0.5 мм, (с) -1.0 мм

Кривые кипения для различных типов поверхностей с характерным размером каналов 0.25, 0.5 и 1.0 мм представлены на рисунке 10. Как видно из графиков, для гидрофильных поверхностей перегрев поверхности значительно ниже, чем для поверхностей с гидрофобными свойствами. Кривая кипения для микроканала, шириной 0.25 мм, со свежими шероховатостями близко расположена с кривой кипения для микроканала с кремниевым покрытием. Можно заметить, что кривая кипения для миллиметрового канала с покрытием из оксида титана практически совпадает с микроканалом со свежими шероховатостями.

Для микроканала с шириной канавки 0.5 мм наибольшая интенсивность теплообмена зафиксирована при нанесении на теплопередающую поверхность гидрофильного покрытия. Более того, именно для канала с шириной 0.5 мм были получены наименьшие перегревы теплопередающей поверхности. Вышеперечисленные факторы говорят о существенном влиянии смачиваемости теплообменной поверхности на формирование микрослоя жидкости стенках канала и теплообменных характеристик в микроканале.

На рисунке 11 представлены обобщенные результаты экспериментальных исследований размера микроканалов и типа покрытия поверхностей на характер процесса кипения на соответствующей поверхности.

Для канала с характерным размером 0.5 мм и вертикальными канавками перегревы поверхности несколько ниже, чем для плоских каналов. В случае с микроканалами с характерным размером 0.25 мм, перегрев поверхности на несколько градусов выше зафиксированного на микроканальной поверхности без вертикальных канавок.

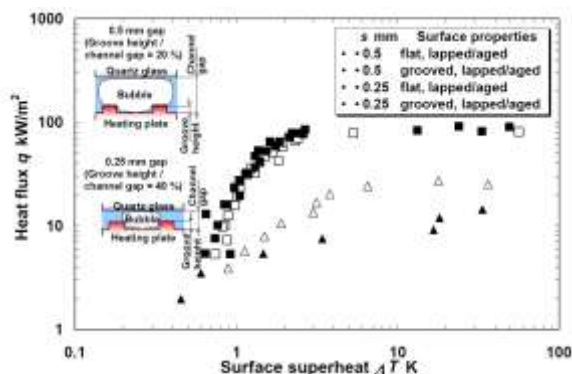


Рисунок 11 – Влияние размеров микроканалов и типа покрытия поверхности теплообмена на характеристики процесса кипения

#### IV. ВЫВОДЫ

В работе проведены фундаментальные исследования характеристик процесса кипения, теплоотдачи и критического теплового потока при кипении на микроканальной поверхности.

Было отмечено, что критический тепловой поток возникает при перегреве поверхности более чем на 35, 42 и 52°C для температур жидкости на входе, равной 68, 58 и 48°C, соответственно. Основным механизмом, приводящим к возникновению КТП, является возникновение неустойчивостей, вызывающих подогрев жидкости на входе в канал и периодическую паровую блокировку распределительного коллектора.

Влияние смачиваемости поверхности теплообмена на характер кипения было исследовано для размеров микроканалов в диапазоне от 0.25 до 1.0 мм. В результате экспериментов было установлено, что повышение смачиваемости поверхности улучшает теплообменные характеристики микроканальных поверхностей.

Проведенные эксперименты позволяют утверждать, что интенсификация процесса кипения на микроканальной поверхности определяется не отдельными геометрическими размерами микроканалов, а соотношением их высоты и ширины, что физически объясняется совместным влиянием этих геометрических характеристик на поведение парового пузырька.

## REFERENCES

1. Hannemann, R.J. Thermal control of electronics: perspectives and prospects / R.J. Hannemann // Proc. Rohsenow Symp. Future Trends Heat Transfer. – 2003.
2. Tuckerman, D. B. High-Performance heat sinking for VLSI / D.B. Tuckerman, R.F.W. Pease // IEEE Electron. Devices Letters, - 1981. – Vol. – 2. – P. 126-129.
3. Kandlikar, S.G Evolution of microchannel flow Passages – Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology / S.G. Kandlikar, W.J. Grande// Heat Transfer Eng.–2003.– Vol. 24. № 1 – P. 3-17.
4. Kosoy, B.V., Peculiarities of Heat Transfer on Micro-Structured Surfaces / B.V. Kosoy, Y. Utaka // Proc. 50th National Heat Transfer Symp. – 2013. – Sendai, Japan.
5. Tasaki, Y. Effects of Surface Properties and Gap Sizes on Boiling Heat Transfer Characteristics in a Micro-Channel Vapor Generator / Y. Tasaki, Y. Utaka // J.Enhanced Heat Transfer. – 2006. -. Vol.13, № 3. – P. 245-260.

Получена в редакции 28.11.2013, принята к печати 03.12.2013