

УДК 536.24

О. С. АЛЕКСЕИК, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ, И. А. КОПЧЕВСКАЯ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: helga-gor@mail.ru, kravetz_kpi@ukr.net

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ НА ПОВЕРХНОСТИ МАЛОГО РАЗМЕРА

Исследовано влияние характерных размеров, граничных условий, а также теплофизических свойств теплоносителя (воды и этанола) на интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера. Получена критериальная зависимость для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении в указанных условиях.

Ключевые слова: кипение, поверхность малого размера, интенсивность теплоотдачи, критериальная зависимость.

Среди используемых в настоящее время способов охлаждения электронной аппаратуры отвод теплоты за счет изменения фазового состояния теплоносителя был и остается одним из наиболее эффективных. Однако при значительных плотностях теплового потока на охлаждаемой поверхности может образоваться паровая пленка, что приведет к ухудшению условий теплоотвода и, как следствие, к резкому возрастанию температуры поверхности. Увеличить отводимую мощность позволяет применение точечных теплоотводов. Вследствие более свободного, чем на поверхности большого размера, доступа теплоносителя к центру парообразования происходит увеличение не только критической плотности теплового потока $q_{кр}$, но и эффективности передачи теплоты в целом. Некоторые авторы отмечают, что уменьшение размеров теплоотдающей поверхности приводит к увеличению $q_{кр}$ до 10 раз по сравнению с гладкими поверхностями большого размера [1, 2].

В последнее время значительная часть исследований процесса кипения на гладких поверхностях посвящена изучению таких характеристик, как скорость роста, характер изменения формы и размеров паровых пузырей и частота их отрыва [3–6], а также моделированию процесса испарения в полость парового пузыря [7–9].

В то же время, для решения практических задач более актуальным является определение кривых кипения или же зависимости коэффициента теплоотдачи на теплоотдающей поверхности от отводимой мощности и ряда других параметров. Подобного рода исследования представлены в [10–15]. В большей части этих работ в качестве теплоносителя использовалась вода, давление — атмосферное, а непосредственно процесс кипения исследовался на поверхности большого размера [10–14]. Исключение составляет [11], где были исследованы характеристики кипения жидкостей FC-72 и изопропано-

ла, и [12], где были определены кривые кипения воды при давлении от 0,1 до 7,0 МПа. Отдельно следует отметить работу L. Cheng и J. R. Thome [15], в которой проводились предварительные исследования системы охлаждения микропроцессора на жидком CO₂ при помощи компьютерного моделирования.

Среди рассмотренных работ только в одной можно выделить исследование интегральных характеристик теплообмена, близких к характеристикам на поверхностях малых размеров. Исследованную в [10] поверхность со структурированными центрами парообразования можно рассматривать как совокупность поверхностей малого размера на теплопроводящей подложке. Однако, поскольку геометрия поверхности оказывает значительное влияние на интенсивность теплообмена при кипении, распространение результатов, полученных в [10], на массивы поверхностей малого размера может привести к значительным погрешностям в расчетах.

Таким образом, анализ литературных источников показал, что в настоящее время нет достаточного количества данных для получения обобщающих зависимостей для определения основных характеристик процесса кипения на поверхности малого размера. В данной работе сделана попытка получения эмпирических зависимостей, позволяющих определить коэффициент теплоотдачи для такого процесса в зависимости от характерных размеров поверхности, граничных условий, а также теплофизических свойств различных теплоносителей.

Описание экспериментальной установки и проведения экспериментов

Конструкция рабочего участка установки представлена на **рис. 1**. В качестве тепловыделяющего элемента был использован медный стержень 1 круглого сечения диаметром $d=1,73$ мм. В тепловыделяющую поверхность на торце стерж-

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

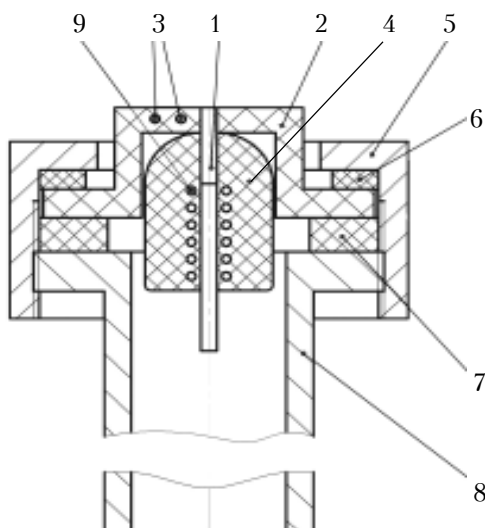


Рис. 1. Конструкция рабочего участка экспериментальной установки:

1 — медный стержень; 2 — стекловолоконная несущая стенка; 3 — медь-константановые термопары; 4 — теплоизоляция; 5 — корпус; 6, 7 — уплотняющие шайбы; 8 — прижимная гайка; 9 — электронагреватель

ня (далее — микроповерхность) и на расстоянии $\delta = 7,5$ мм от нее в стержень были зачеканены две константановые проволоки. С помощью образованных таким образом термопар определялся как передаваемый тепловой поток, так и температура поверхности. Стержень 1 с помощью эпоксидной смолы был вклеен заподлицо в стекловолоконную шайбу 2. С целью определения утечек теплоты через шайбу в нее на различных диаметрах были вмонтированы четыре медь-константановые термопары 3 (рис. 2). Также к стекловолоконной шайбе была присоединена гильза с термопарой (на рис. 1 не показана), по показаниям которой определялась температура жидкости T_5 . К гильзе была припаяна калибровочная проволока диаметром 0,85 мм, ко-

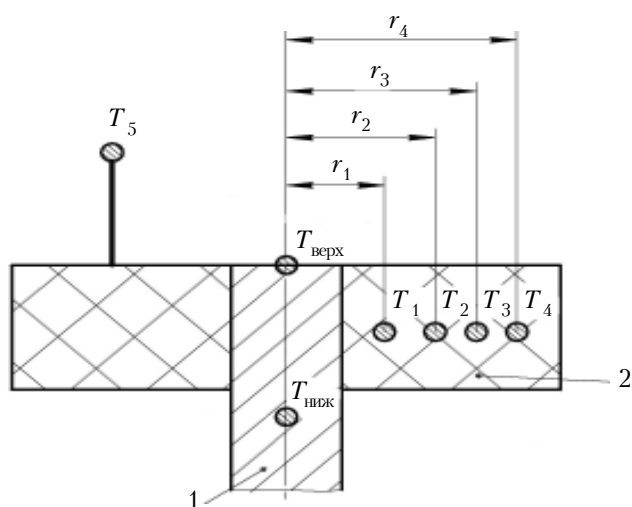


Рис. 2. Схема расположения термопар на рабочем элементе:

1 — тепловыделяющий стержень; 2 — стекловолоконная шайба

торая служила мерилем масштаба при определении размеров паровых пузырьков. Теплопровод к элементу осуществлялся с помощью нихромового нагревателя 9, намотанного на стержень 1, который для уменьшения теплопотерь в окружающее пространство был покрыт слоем теплоизоляции 4.

Шайба 2 с тепловыделяющим элементом 1 располагалась в корпусе 5 и фиксировалась с помощью двух уплотняющих колец 6 и 7 и прижимной гайки 8. Уплотняющие кольца выполнены из вакуумной резины, что позволяет проводить испытания при пониженном давлении.

Схема установки, на которой проводились исследования, приведена на рис. 3.

Рабочий участок РУ вставляли в специальный стакан С, сваренный в нижнюю часть экспериментальной камеры РК, и фиксировали с помощью прижимной гайки ГП. Экспериментальная камера представляла собой стальной цилиндр диаметром 0,1 м и длиной 0,1 м. При проведении эксперимента она располагалась таким образом, чтобы тепловыделяющая поверхность находилась в горизонтальной плоскости. В торцевых стенках камеры выполнены смотровые окна, что позволяло вести визуальное наблюдение за процессом кипения.

Заполнение камеры рабочей жидкостью осуществляли через штуцер ШЗ, расположенный в верхней части камеры. Уровень жидкости был на 10–20 мм выше термопары, посредством которой определяли температуру рабочей среды. Во время проведения опытов к штуцеру ШЗ присоединяли конденсатор-холодильник для поддержания постоянного давления и уровня жидкости в камере.

Экспериментальную камеру нагревали с помощью нихромового электронагревателя НЭ1. С целью уменьшения потерь теплоты в окружающее пространство рабочая камера и электронагреватель были теплоизолированы.

Показания термопар через аналого-цифровой преобразователь АЦП ICP CON I-7018Z передавались на компьютер. Установленное на нем программное обеспечение позволяло наблюдать показания термопар в реальном времени, а также вести их запись.

Перед проведением основной серии опытов проводили дегазацию камеры и рабочей жидкости, после чего их нагревали до температуры насыщения с помощью внешнего нагревателя НЭ1. После того как на внутренних стенках камеры появлялись одиночные центры парообразования, мощность на электронагревателе НЭ1 уменьшали до величины, достаточной для компенсации тепловых потерь в окружающее пространство, когда температура рабочей жидкости поддерживалась равной температуре насыщения.

Вслед за этим подавали нагрузку на электронагреватель рабочего элемента НЭ2, и мощность увеличивали до тех пор, пока на микроповерхности не начинался процесс кипения. На-

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ

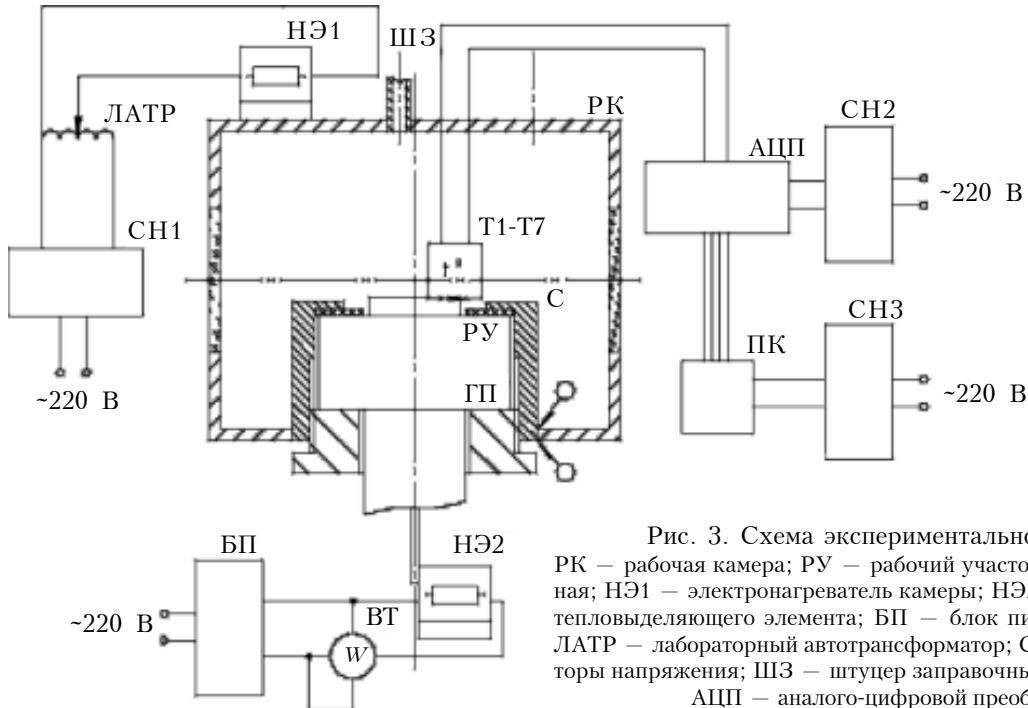


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:
 РК – рабочая камера; РУ – рабочий участок; ГП – гайка прижимная; НЭ1 – электронагреватель камеры; НЭ2 – электронагреватель тепловыделяющего элемента; БП – блок питания; ВТ – ваттметр; ЛАТР – лабораторный автотрансформатор; СН1...СН3 – стабилизаторы напряжения; ШЗ – штуцер заправочный; БП – блок питания; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

чало кипения фиксировали визуально. Значение мощности, подводимой к тепловыделяющему стержню, контролировали по показаниям ваттметра. После выхода на стационарный режим запись показаний термопар проводили на протяжении еще некоторого времени. Далее мощность на рабочем элементе увеличивали на некоторую фиксированную величину и описанные действия повторяли. Опыт проводился до тех пор, пока температура поверхности элемента не достигала предельно допустимого для данной конструкции значения (в нашем случае это была температура плавления клея, которым стержень клеивался в шайбу).

Методика обработки экспериментальных данных

После анализа первичных экспериментальных данных определяли границы стационарных режимов. Для каждого режима рассчитывали значения температуры в точках расположения термопар (см. рис. 2).

Количество теплоты, подводимое к тепловыделяющей поверхности, определяли согласно закону Био – Фурье

$$Q_{\text{подв}} = \lambda_{\text{ст}} F_{\text{мк}} (T_{\text{ниж}} - T_{\text{верх}}) / \delta,$$

где $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности тепловыделяющего стержня;

$F_{\text{мк}}$ – площадь микроповерхности.

Для определения утечек теплоты $Q_{\text{пот}}$ через стекловолнонитовую шайбу допускалось, что ее можно рассматривать как кольцевое ребро с односторонним отводом теплоты, и расчет проводили согласно методике, представленной в [16, с. 55 – 57].

После определения количества теплоты $Q_{\text{пот}}$, отведенного шайбой, рассчитывали передаваемый тепловой поток $Q_{\text{отв}}$ и коэффициент теплоотдачи α от микроповерхности:

$$Q_{\text{отв}} = Q_{\text{подв}} - Q_{\text{пот}};$$

$$\alpha = Q_{\text{отв}} / [F_{\text{мк}} (T_{\text{верх}} - T_5)].$$

При расчете безразмерных комплексов Рейнольдса Re и Нуссельта Nu в качестве определяющего размера принималась капиллярная постоянная Лапласа l_c [16, с. 282], а в качестве скорости – приведенная скорость парообразования w [16, с. 298]:

$$Nu = \alpha l_c / \lambda; \quad Re = w l_c / \nu;$$

где λ – коэффициент теплопроводности жидкости;

$$w = q / (r \rho'');$$

q – плотность подводимого теплового потока;

r – теплота парообразования;

ρ'' – плотность пара на линии насыщения;

ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Результаты исследований

В результате обработки экспериментальных данных была получена зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности отводимого теплового потока при кипении на технически гладкой поверхности малого размера при атмосферном давлении.

Как видно из рис. 4, в случае использования поверхности малого размера достигается большая плотность теплового потока q , чем при кипении на большой поверхности. Это объясняется тем, что к поверхности малого размера жидкость

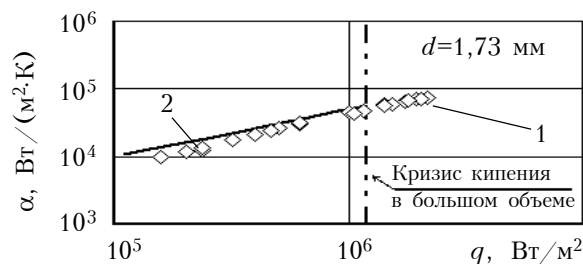


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от отводимой мощности для воды, полученная экспериментально для микроповерхности (1) и расчетным путем в [16, с. 308] для кипения на бесконечной пластине в большом объеме (2)

имеет лучший доступ, вследствие чего образование сухого пятна происходит при больших плотностях теплового потока.

Сопоставление полученных опытных данных с расчетной зависимостью, приведенной в [16], показало некоторое (до 30%) расхождение между ними. К тому же, значительная часть опытных данных была получена для плотностей теплового потока, которые превышают критические значения при кипении на бесконечной пластине, а формула в [16] применима только в докритической области. Все это говорит о том, что ее использование при расчете интенсивности теплоотдачи при кипении на поверхностях малого размера может привести к существенным погрешностям.

При исследовании было отмечено существенное влияние диаметра микроповерхности на интенсивность теплоотдачи при кипении (рис. 5): при увеличении диаметра происходило ухудшение теплоотдачи, что, вероятно, можно объяснить увеличением толщины теплового пограничного слоя.

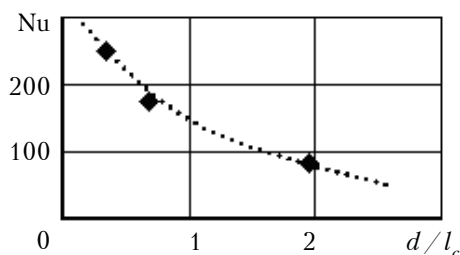


Рис. 5. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от безразмерного диаметра теплоотдающей поверхности для воды при $Re \approx 8,3 \cdot 10^3$

Кроме этого, экспериментально было установлено, что степень влияния плотности теплового потока на интенсивность теплоотдачи (т. е. прирост Nu с ростом Re) при кипении практически не зависит от теплофизических свойств теплоносителя (рис. 6).

В результате обобщения экспериментальных данных по кипению воды и этанола на поверх-

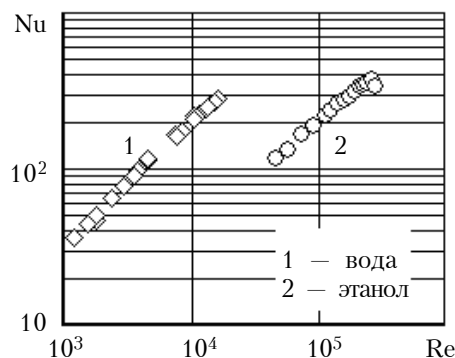


Рис. 6. Влияние теплофизических свойств теплоносителя на интенсивность теплообмена при кипении

ностях диаметрами 0,88, 1,73 и 4,94 мм была получена критериальная зависимость

$$Nu = 0,184 Re^{0,718} (d/l_c)^{-0,314} Pr^{0,45},$$

которая применима при значениях отводимой мощности от $3,1 \cdot 10^4$ до $7,4 \cdot 10^6$ Вт/м² для воды и от $2,7 \cdot 10^5$ до $1,4 \cdot 10^6$ Вт/м² для этанола (здесь Pr — число Прандтля).

Данная зависимость аппроксимирует имеющиеся экспериментальные данные (рис. 7) со средней точностью $\pm 12\%$, при этом максимальное отклонение не превышает 23%.

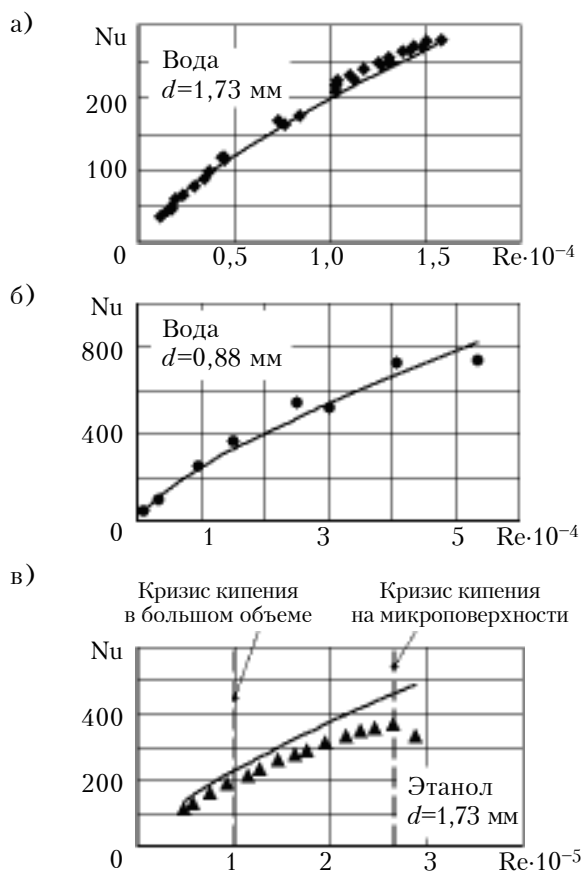


Рис. 7. Сопоставление расчетных и опытных данных для воды (а, б) и для этанола (в)

Отметим, что для плотностей теплового потока q выше $1,4 \cdot 10^6$ Вт/м² при кипении этанола наблюдались предкризисные и кризисные явления. Полученная же обобщающая зависимость не может применяться в предкризисной области вследствие изменения механизма кипения, поскольку в таком случае расчетные значения интенсивности теплоотдачи могут значительно превышать реальные (см. на рис. 7, в область, где $Re > 2,5 \cdot 10^5$).

Таким образом, получена эмпирическая зависимость для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера, которая учитывает влияние не только плотности отводимого теплового потока, но и физических свойств теплоносителя и диаметра теплоотдающей поверхности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кравец В. Ю., Фридрихсон Ю. В., Босая О. В. Кризис теплоотдачи при кипении жидкостей на микроповерхностях // Инженерно-физический журнал. — 1991. — Т. 60 — № 2. — С. 266–270. [Kravets V. Yu., Fridrikhson Yu. V., Bosaya O. V. // Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 1991. Vol. 60. N 2. P. 266]
2. Кудрицкий Г. Р. Теплообмен при кипении в условиях определяющего влияния геометрических характеристик поверхности нагрева / Автореф. ... дис. д-ра техн. наук. — Киев: ИТТФ НАНУ, 1995. [Kudritskii G. R. / Avtoref. ... dis. d-ra tekhn. nauk. Kiev: ITTF NANU. 1995]
3. Siedel S., Cioulachtjian S., Bonjour J. Experimental analysis of bubble growth, departure and interactions during pool boiling on artificial nucleation sites // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2008. — Vol. 38. — P. 1504–1511.
4. Щербakov В. К., Кравец В. Ю. Температурный режим и теплоотдача при кипении на микроповерхностях воды в большом объеме // В сб. статей “Тепломассообмен-VI”. — Т. 4, ч. 1. — Минск, 1980. — С. 90–95. [Shcherbakov V. K., Kravets V. Yu. // V sb. statei Teplomassobmen-VI. Vol. 4, p. 1. Minsk, 1980. P. 90]
5. Kim J., Oh B. D., Kim M. H. Experimental study of pool temperature effects on nucleate pool boiling // International Journal of Multiphase Flow. — 2006. — Vol. 32. — P. 208–231.
6. Gerardi C., Buongiorno J., Hu L., McKrell T. Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2010. — Vol. 53. — P. 4185–4192.
7. Kim J., Kim M. H. On the departure behaviours of bubble at nucleate pool boiling // International Journal of Multiphase Flow. — 2006. — Vol. 32. — P. 1269–1286.
8. Genske P., Stephan K. Numerical simulation of heat transfer during growth of single vapour bubbles in nucleate boiling // International Journal of Thermal Sciences. — 2006. — Vol. 45. — P. 299–309.
9. Stephan P., Kern J. Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2004. — V. 25. — P. 140–148.
10. Das A. K., Das P. K., Saha P. Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2007. — V. 31. — P. 967–977
11. Sakashita H., Ono A. Boiling behaviors and critical heat flux on a horizontal plate in saturated pool boiling of water at high pressures // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2009. — Vol. 52. — P. 744–750
12. Auracher H., Marquardt W. Heat transfer characteristics and mechanisms along entire boiling curves under steady-state and transient conditions // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2004. — V. 25. — P. 223–242.
13. Coursey J. S., Kim J. Nanofluid boiling: The effect of surface wettability // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2008. — Vol. 29. — P. 1577–1585.
14. Myers J. G., Yerramilli V. K. et al. Time and space resolved wall temperature and heat flux measurements during nucleate boiling with constant heat flux boundary conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2005. — Vol. 48. — P. 2429–2442
15. Cheng L., Thome J. R. Cooling of microprocessors using flow boiling of CO₂ in a micro-evaporator: Preliminary analysis and performance comparison // Applied Thermal Engineering. — 2009. — Vol. 29. — P. 2426–2432
16. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.-Л.: Энергия, 1965. [Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha. Moscow — Leningrad: Energiya. 1965]

Дата поступления рукописи
в редакцию 21.09 2011 г.

Alekseik O. S., Kravets V. Yu., Koptchevskaya I. A. **Boiling heat transfer intensity on small-size surface.**

Keywords: boiling, small-size surface, heat transfer coefficient, criterion equation.

Dependence of heat-release surface of heat carrier (water and ethanol) characteristic size, boundary conditions and thermophysical properties on boiling heat transfer intensity on small-size surface was investigated. Criterion equation for boiling heat transfer coefficients on small-size surface was obtained.

Ukraine, NTUU “Kyiv polytechnical institute”

Алексеїк О. С., Кравець В. Ю., Копчевська І. А. **Інтенсивність тепловіддачі при кипінні на поверхні малого розміру.**

Ключові слова: кипіння, поверхня малого розміру, інтенсивність тепловіддачі, критеріальна залежність.

Досліджено вплив характерних розмірів, граничних умов, а також теплофізичних властивостей теплоносія (води та етанолу) на інтенсивність тепловіддачі при кипінні на поверхні малого розміру. Отримано критеріальні залежності для розрахунку інтенсивності тепловіддачі при кипінні в зазначених умовах.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».