

У статті приведено емпіричні залежності, що дозволяють розрахувати інтенсивність тепловіддачі при кипінні води та етанолу на гладких та пористих поверхнях в умовах обмеженого простору в залежності від густини теплового потоку, параметрів теплоносія, а також геометрії простору. Дані формули дозволяють визначити коефіцієнт тепловіддачі з похибкою менше 20 %.

Ключові слова: інтенсивність тепловіддачі, емпірична залежність, кипіння, обмежений об'єм, пориста структура

В статье приведены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитать интенсивность теплоотдачи при кипении воды и этанола на гладких и пористых поверхностях в условиях ограниченного объема в зависимости от плотности теплового потока, параметров теплоносителя, а также геометрии пространства. Данные формулы позволяют определить коэффициент теплоотдачи в указанных условиях с погрешностью менее 20 %

Ключевые слова: интенсивность теплоотдачи, эмпирическая зависимость, кипение, ограниченный объем, пористая структура

ТЕПЛОТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ НА ГЛАДКИХ И ПОРИСТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА

О. С. Алексеик

Младший научный сотрудник, ассистент*

E-mail: Helga-Gor@mail.ru

В. Ю. Кравец

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: kravetz_kpi@ukr.net

*Кафедра атомных электростанций и инженерной теплофизики

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

1. Введение

При разработке систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры и космической техники на основе тепловых труб и термосифонов на предварительном этапе проектирования часто бывает необходимо провести аналитическое определение характеристик непосредственно труб. Для этого в расчетную модель закладываются как параметры внешних условий работы и геометрия труб, так и характеристики внутренних процессов, в том числе интенсивности теплоотдачи в зонах нагрева и конденсации. Использование в расчетных моделях аналитических зависимостей для определения указанных коэффициентов теплоотдачи, а не фиксированных величин, позволяет как увеличить точность получаемых результатов, так и максимально автоматизировать процесс расчета.

Таким образом, для получения корректных результатов проектирования необходимо как исследовать характеристики кипения в условиях ограниченного объема, так и получить зависимости, учитывающие влияние указанного параметра на коэффициент теплоотдачи.

2. Современное состояние проблемы

Представленные в литературе методики [1 – 3] позволяют определить оптимальные характеристики

тепловых труб для различных условий эксплуатации, либо предельные передаваемые тепловые потоки для трубы заданных размеров. И в том, и в другом случае необходимо рассчитывать интенсивность теплоотдачи в зоне нагрева тепловой трубы или термосифона.

Одними из часто используемых зависимостей для определения коэффициента теплоотдачи при кипении на металло-волоконистой структуре является формулы, приведенные в [3]. Данные зависимости учитывают существенное количество влияющих факторов, в том числе физические свойства поверхности нагрева и пористого покрытия, их геометрию. Однако, формулы достаточно громоздки, к тому же в некоторых случаях для определения величины коэффициента теплоотдачи необходимо применять метод последовательных итераций.

Зависимости, приведенные в [4 – 8], также учитывают влияние существенного количества факторов. Представленные в виде соотношений безразмерных комплексов, они позволяют проводить расчет коэффициента теплоотдачи в зоне нагрева тепловых труб, в которых в качестве теплоносителя используется вода, этанол, ацетон и ряд других жидкостей. Однако зависимости, представленные в указанных источниках, были получены путем обобщения экспериментальных данных при кипении в большом объеме жидкости. В то же время в реальных условиях в тепловых трубах и термосифонах способ подвода теплоносителя, а также

ограниченные размеры парового канала, оказывают существенное влияние на характеристики кипения.

3. Экспериментальная установка

Процесс кипения при экспериментальных исследованиях был организован на гладкой поверхности и металло-волоконистой пористой структуре. В обоих случаях теплоотдающие поверхности были выполнены из меди. В качестве теплоносителей применялись дистиллированная дегазированная вода и 96 % этанол.

Подробное описание экспериментальной установки, методик проведения эксперимента и обработки опытных данных представлены в [9, 10].

4. Полученные результаты

Исследования показали, что уменьшение высоты свободного объема жидкости над теплоотдающей поверхностью (рис. 1) оказывает существенное влияние на интенсивность теплоотдачи при кипении, как на гладкой, так и на пористой поверхности.

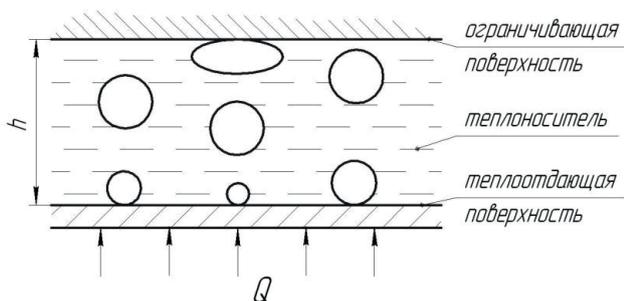


Рис. 1. Схема рабочего участка

При кипении на гладкой поверхности уменьшение расстояния между теплоотдающей и ограничивающей поверхностями приводит к интенсификации теплообмена по сравнению с условиями кипения в большом объеме $\alpha_{БО}$ (рис. 2). Вероятно, это связано как с возникновением капиллярных сил в щели между поверхностями и, соответственно, улучшением условий подвода теплоносителя к центрам парообразования, так и тем, что вследствие малой толщины слоя жидкости происходит более быстрый ее перегрев выше температуры насыщения в пристенной области. Следует отметить, что указанный эффект тем сильнее выражен, чем меньше плотность отводимого теплового потока.

В случае кипения на пористой поверхности происходит существенное увеличение коэффициента теплоотдачи по сравнению с кипением на гладкой поверхности. Уменьшение расстояния между теплоотдающей и ограничивающей поверхностями приводит, наоборот, к ухудшению условий теплоотвода по сравнению с кипением на пористой поверхности в большом объеме жидкости (рис. 3). При расстоянии между теплоотдающей и ограничивающей поверхностями меньше 5 мм имеет место незначительная интенсификация процесса теплообмена, однако коэффициент теплоотдачи все равно не достигает величин, получаемых при кипении в большом объеме.

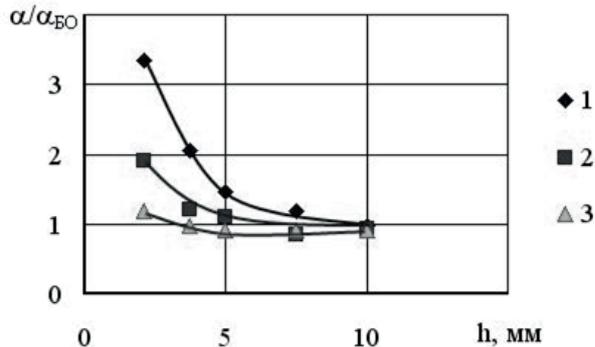


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи ($\alpha/\alpha_{БО}$) от высоты свободного пространства h при кипении на гладкой поверхности при плотности теплового потока: 1 – $q=30$ кВт/м²; 2 – $q=70$ кВт/м²; 3 – $q=130$ кВт/м²

Изменение коэффициента теплоотдачи при изменении расстояния носит немонокотный характер, что связано со сложностью механизма взаимодействия потоков жидкости и пара в пористом покрытии и внешнем слое жидкости [11].

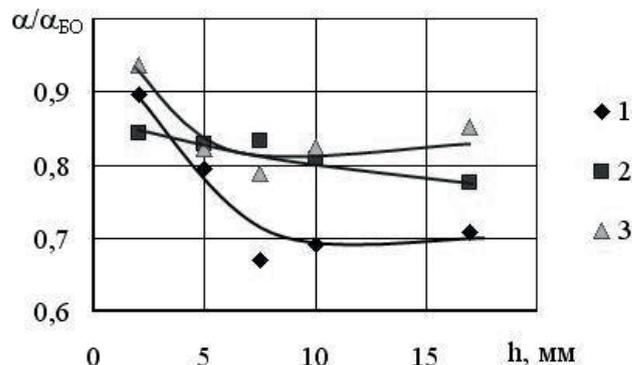


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи ($\alpha/\alpha_{БО}$) от высоты свободного пространства h при кипении на пористой поверхности при плотности теплового потока: 1 – $q=35$ кВт/м²; 2 – $q=70$ кВт/м²; 3 – $q=110$ кВт/м²

В результате анализа и обобщения полученных экспериментальных данных, были получены критериальные зависимости, позволяющие рассчитать коэффициенты теплоотдачи при кипении на гладкой или пористой поверхностях в условиях ограниченного объема.

В случае кипения на гладкой поверхности было получено следующее уравнение:

$$Nu = 0,1 \cdot Re^{0,718} \cdot \left(\frac{d}{l_c}\right)^{-0,314} \cdot \left(\frac{h}{l_c}\right)^{0,05} \cdot Pr^{0,45}, \quad (1)$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot l_c}{\lambda}$ – число Нуссельта; α – коэффициент теплоотдачи при кипении, Вт/(м²×К); $l_c = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}$ – капиллярная постоянная, м; σ – коэффициент поверх-

ностного натяжения, Н/м; ρ', ρ'' – плотности насыщенной жидкости и пара, соответственно, кг/м³; $g=9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; $Re = \frac{w \cdot l_c}{\nu}$ – число Рейнольдса; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с; $w = \frac{q}{\rho \cdot \rho''}$ – скорость парообразования, м/с; q – теплота парообразования, Дж/кг; Pr – число Прандтля; d – диаметр теплоотдающей поверхности, м; h – расстояние по нормали от теплоотдающей до ограничивающей поверхности, м.

Все теплофизические свойства теплоносителя в этой формуле и далее принимаются по температуре насыщения.

Зависимость (1) может быть использована в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=400 \dots 2 \cdot 10^5$ и для высот, удовлетворяющих условию $(h/l_c)=1 \dots 10$.

Представленная зависимость обобщает экспериментальные данные погрешностью, не превышающей $\pm 20\%$. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных представлено на рис. 4, где

$$K_1^* = \left(\frac{d}{l_c}\right)^{-0,314} \cdot \left(\frac{h}{l_c}\right)^{0,05} \cdot Pr^{0,45}. \quad (2)$$

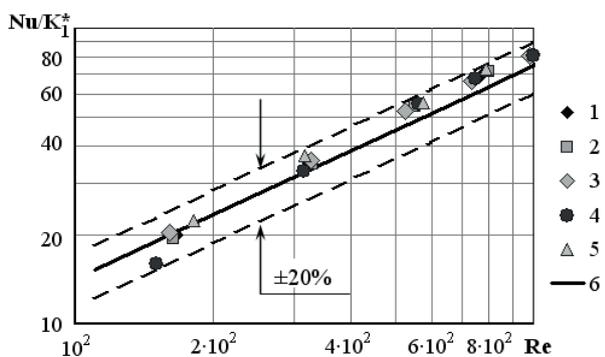


Рис. 4. Сопоставление расчетного и экспериментальных значений безразмерного коэффициентов теплоотдачи (Nu/K_1^*) в зависимости от безразмерной плотности теплового потока (Re) при кипении на гладкой поверхности в условиях ограниченного объема при расстояниях между теплоотдающей и ограничивающей поверхностями: 1 – 16 мм; 2 – 12 мм, 3 – 8 мм, 4 – 6 мм, 5 – 4 мм, 6 – обобщающая зависимость (1)

Также была получена зависимость, позволяющая рассчитывать интенсивность теплообмена при кипении в ограниченных условиях на горизонтальной металло-волокнистой капиллярной структуре толщиной 0,7-1,0 мм и пористостью 75-85 %. Зависимость имеет вид:

$$\frac{Nu_h}{Nu_{h \rightarrow \infty}} = 0.0067 \left(\frac{h}{l_c}\right)^2 - 0.067 \left(\frac{h}{l_c}\right) + 0.984, \quad (3)$$

где Nu_h – безразмерный коэффициент теплоотдачи при кипении на пористой поверхности в ограниченных условиях; $Nu_{h \rightarrow \infty}$ – безразмерный коэффициент теплоотдачи при кипении на пористом покрытии в условиях большого объема; h – расстояние между верхней границей пористой структуры и ограничивающей поверхностью, м.

Значение числа Нуссельта при кипении в условиях большого объема $Nu_{h \rightarrow \infty}$ можно рассчитать, используя следующую формулу, полученную в результате анализа экспериментальных данных:

$$Nu_{h \rightarrow \infty} = 3.58 \cdot Re^{0.47}. \quad (4)$$

Здесь безразмерные критерии определяются так же, как в зависимости (1).

Последняя зависимость применима в диапазоне чисел Рейнольдса от 150 до 3000, что соответствует плотностям тепловых потоков при кипении воды при атмосферном давлении от 23 кВт/м² до 400 кВт/м².

Полученные зависимости (3) и (4) аппроксимируют опытные данные с максимальной погрешностью не более $\pm 20\%$. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных представлено на рис. 5, где

$$K_2^* = 0.0067 \left(\frac{h}{l_c}\right)^2 - 0.067 \left(\frac{h}{l_c}\right) + 0.984. \quad (5)$$

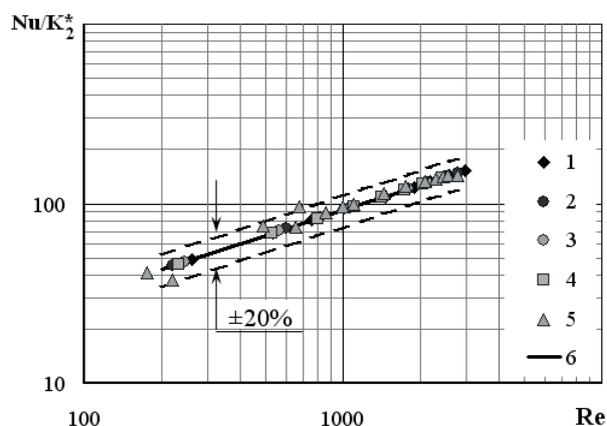


Рис. 5. Сопоставление расчетного и экспериментальных значений безразмерного коэффициентов теплоотдачи (Nu/K_2^*) в зависимости от безразмерной плотности теплового потока (Re) при кипении на пористой поверхности в условиях ограниченного объема при расстояниях между теплоотдающей и ограничивающей поверхностями: 1 – 5 мм; 2 – 7,5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 17 мм; 5 – большой объем; 6 – обобщающая зависимость (3)

Следует отметить, что исследование функции (3) на экстремумы показало, что ее минимум соответствует величине $h/l_c=5$ ($h \approx 12,5$ мм). Полученный результат совпадает с экспериментальными данными, поскольку при расстояниях между поверхностями $h \approx 12-14$ мм были получены наименьшие величины интенсивности теплоотдачи при кипении на пористом покрытии.

5. Выводы

1. Получена зависимость, позволяющая рассчитать интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера в большом и ограниченном объеме в зависимости от плотности отводимого теплового потока, диаметра поверхности, теплофизических свойств теплоносителя, а также расстояния от теплоотдающей до ограничивающей поверхности. Формула может быть использована в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=400...2\cdot 10^5$ и для высот, удовлетворяющих условию $(h/l_c)=1...10$. Максимальное отклонение расчетных данных не превышает $\pm 20\%$.

2. Получены зависимости для расчета интенсивности теплоотдачи при кипении воды на пористых поверхностях в условиях ограниченного и большого объема. Формулы могут быть использованы для чисел Рейнольдса от 150 до 3000 для металло-волоконистых капиллярных структур толщиной 0,7-1,0 мм и пористостью 75-85 % в диапазоне расстояний между поверхностью КПС и верхней стенкой от 2 до 20 мм. Расхождение между опытными и расчетным данным не превышает $\pm 20\%$.

3. Полученные зависимости аппроксимируют опытные данные с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

Литература

- Dunn, P. Heat pipes [Text]/ P. Dunn, D. A. Reay – Oxford, England; Tarrytown, N.Y., U.S.A. : Pergamon, 1994. – 348 p.
- Chi, S. W. Heat pipe theory and practice [Text] / S.W. Chi – Hemisphere Pub. Corp, 1976. – 242 p.
- Семена, М. Г. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами [Текст]/ М. Г. Семена, А. Н. Гершуни, В. К. Зарипов. – К: Вища шк. Головное изд-во, 1984 – 215 с
- Pastuszko, R. Correlations for boiling in fibrous porous structures [Text]/ R. Pastuszko, M. Poniewski, T. Wojcik // In: Proc. IV Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”. – Minsk, Belarus. – 2000. – P. 149-155
- Фрідріхсон, Ю. В. Вплив тиску і характеристик металоволокнистих покриттів на теплообмін при кипінні рідин у великому об'ємі. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.14.05 [Текст]/ Ю. В. Фрідріхсон – Київ, КПІ 1995. – 16 с.
- Alam, M. S. Enhanced boiling of saturated water on copper coated heating tubes [Text]/ M. S. Alam, L. Prasad, S. C. Gupta, V. K. Agarwal // Chemical Engineering and Processing Process Intensification. – 2008. – January (Vol. 47, Iss.1). – P. 159-167
- Ferret, C. Quantification of the water boiling heat transfer in micro-structures by image analysis [Text]/ C. Ferret, L. Falk, A. Chenu, U. D'Ortona, T. T. Veenstra // Superlattices and Microstructures. – 2004. – Vol. 34. – P.657-668
- Shapoval, A. A. Influence of the characteristics capabilities of fibrous metal capillary structures on heat transfer in boiling water and acetone [Text] / A. A. Shapoval, A. G. Kostornov // In: Proc. 11th International heat pipe conference. - Musashinoshi Tokyo, Japan. – 1999. – Vol. 2, A11 -4 – P.113-118
- Алексеїк, О. С. Інтенсивність теплоотдачи при кипінні на поверхні малого размера [Текст] / О. С. Алексеїк, В. Ю. Кравець, І. А. Копчевська // Технологія і конструювання в електронній апаратурі. – 2012. – №1. – С.49-53.
- Kravets, V. Yu. Boiling Heat-Transfer Intensity on Small-Scale Surface [Text] / V. Yu. Kravets, O.S. Alekseik // International Review of Mechanical Engineering. – March 2012. - Vol. 6 N. 3, Part A, pp. 479 - 484
- Алексеїк, О. С. Фізична модель процесу кипіння на пористій поверхні в обмежених умовах [Текст] / О. С. Алексеїк, В. Ю. Кравець // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. - №4/8 (64). - С. 26-31