

УДК 536.24

# ВЛИЯНИЕ СТЕСНЕННЫХ УСЛОВИЙ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ НА ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**О.С. Алексеик**  
Аспирант\*

Контактный тел.: 063-241-80-64  
E-mail: Helga-Gor@mail.ru

**В.Ю. Кравец**

Кандидат технических наук, доцент  
Контактный тел.: 066-780-99-50  
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

*Досліджено характеристики процесу кипіння на пористій поверхні. Відмічено збільшення перегріву поверхні при зменшенні висоти вільного простору над пористим покриттям. Встановлено характер впливу кута нахилу поверхні на інтенсивність тепловіддачі при кипінні*

*Ключові слова: інтенсивність тепловіддачі, кипіння, пориста структура*

*Исследованы характеристики процесса кипения на пористой поверхности. Отмечено увеличение перегрева поверхности при уменьшении высоты свободного пространства над пористой поверхностью. Установлен характер влияния угла наклона поверхности на интенсивность теплоотдачи при кипении*

*Ключевые слова: интенсивность теплоотдачи, кипение, пористая структура*

*Characteristics of boiling process on porous structure were investigated. Increasing of surface superheat with decreasing of free space above porous covering was observed. Influence of inclination angle on boiling heat-transfer intensity was determined*

*Keywords: heat-transfer intensity, boiling, porous structure*

## 1. Введение

Среди используемых в настоящее время методов интенсификации теплообмена при кипении развитие поверхности за счет нанесения на нее капиллярно-пористой структуры является одним из наиболее эффективных. Не смотря на относительную сложность изготовления такого рода поверхностей, их применение позволяет не только увеличить количество отводимой теплоты, но и расширить диапазон рабочих тепловых потоков, увеличить критические плотности теплового потока, а также уменьшить пульсации температуры охлаждаемой поверхности.

Покрытия из пористых структур широко используются в элементах систем охлаждения радиоэлектронной, космической аппаратуры, энергетических установок, в качестве фитилей в различных типах тепловых труб.

В связи с их широким применением, актуальным является изучение характера влияния тех или иных параметров на процессы кипения на пористых покрытиях с целью дальнейшего прогнозирования характеристик устройств, составляющими частями которых являются поверхности с пористым покрытием.

## 2. Состояние проблемы

Исследованию характеристик кипения на пористых структурах в различных условиях посвящено значи-

тельное количество работ. В литературе представлены как физические модели процесса кипения [1-3], так и попытки его математического описания [1, 4-5]. Однако, в связи со сложностью и стохастичностью процесса кипения, наиболее важную информацию дают результаты экспериментальных исследований.

Достаточно широко исследовано влияние параметров пористого покрытия, а именно толщины [6-8], пористости [9, 10], размеров частиц, из которых изготовлена капиллярная структура [10], геометрии капиллярной структуры [11] на характеристики кипения. Часть работ посвящена исследованию влияния внешних условий на интенсивность теплоотдачи при кипении, в частности теплофизических свойств теплоносителя [12], давления в системе [13] и др. [14-16].

Однако следует отметить, что значительная часть исследований проводилась при атмосферном давлении в условиях кипения в большом объеме. В настоящее же время миниатюризация различного типа устройств накладывает ряд ограничений на системы охлаждения, в частности стесненность условий, или же, другими словами, уменьшение размеров свободного пространства.

## 3. Экспериментальная установка

Исследования процесса кипения на пористом покрытии проводилось на установке, описанной в [17].

Стесненность условий, а именно изменение высоты свободного пространства между пористой поверхностью и некоторым жестким ограничителем, создавалась с помощью подвижной пластины, закрепленной в верхней части камеры (см. рис. 1).

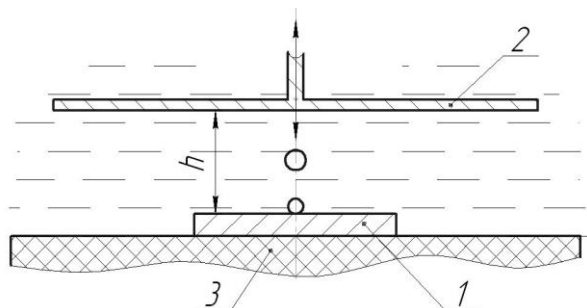


Рис. 1. Изменение высоты свободного пространства над пористой структурой: 1 – пористая структура; 2 – ограничитель; 3 – подложка

Конструкция рабочего элемента (РЭ) представлена на рис. 2. Кипение было организовано на торцевой части тепловыделяющей втулки 1, покрытой металло-волоконистой капиллярно-пористой структурой 10. Втулка 1 заподлицо вклеивалась в стекловолоконитовую шайбу 4. К нижней части втулки 1 припаивался блок электронагревателя РЭ. Последний состоял из нихромового электронагревателя 3, расположенного внутри медного корпуса 2, а также охранного электронагревателя 7. Шайба 4 с вклеенным в нее блоком нагревателя фиксировалась в корпусе 6 с помощью гайки 5. Герметичность соединений достигалась применением уплотняющих колец 8 и 9.

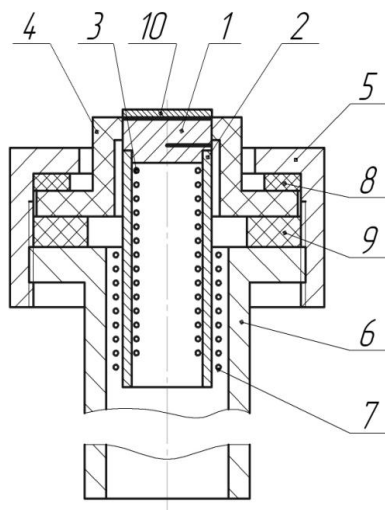


Рис. 2. Конструкция рабочего элемента: 1 – тепловыделяющая втулка; 2 – корпус нагревателя; 3 – электронагреватель РЭ; 4 – стекловолоконитовая шайба; 5 – прижимная гайка; 6 – корпус РЭ; 7 – охранный нагреватель; 8, 9 – уплотнения; 10 – пористое покрытие

Методики проведения эксперимента, а также обработки опытных данных подробно описаны в [17].

#### 4. Результаты исследований

Экспериментальные исследования показали, что уменьшение высоты свободного пространства над пористым покрытием приводит к увеличению перегрева поверхности и, соответственно, снижению интенсивности теплоотдачи (см. рис. 3). При этом влияние стесненности тем больше, чем выше плотность отводимого теплового потока.

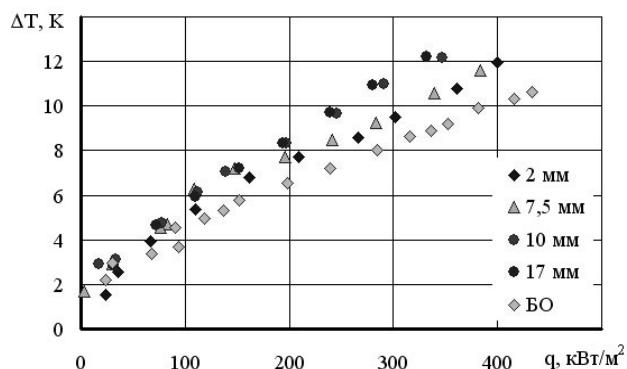


Рис. 3. Влияние стесненности на перегрев поверхности при кипении на капиллярной структуре

Следует отметить, что изменение коэффициента теплоотдачи с уменьшением высоты носит немонотонный характер (см. рис. 4). Так, при уменьшении высоты до определенной величины (порядка 7,5-10 мм для воды), интенсивность теплоотвода снижалась до минимальной величины. Дальнейшее уменьшение расстояния между теплоотдающей поверхностью и жестким ограничителем приводило к незначительному увеличению интенсивности теплоотдачи, не достигающего, однако, величины коэффициента теплоотдачи при кипении в большом объеме. Было отмечено, что чем больше плотность теплового потока, тем значительнее снижение коэффициента теплоотдачи.

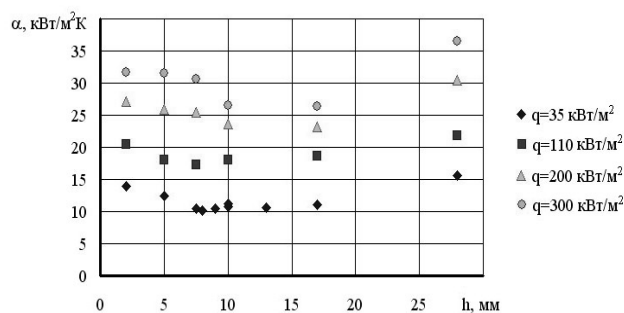


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от высоты свободного пространства над поверхностью теплоотдачи

Данное явление объясняется, вероятно, тем, что при уменьшении расстояния между пористым покрытием и ограничителем объема до некоторой величины происходит ухудшение условий доступа теплоносителя к пористой структуре. Так, при кипении в большом объеме жидкость поступает к пористой структуре как с торцевых сторон, так и сверху. При уменьшении вы-

соты паровые пузыри скапливаются под ограничивающей поверхностью, тем самым уменьшая проходное сечение для доступа жидкости (см. рис. 5). Дальнейшее же уменьшение величины свободного пространства может привести к тому, что в образовавшемся канале начинают действовать капиллярные силы, усиливающие подсос жидкости из внешнего объема к области кипения, что и приводит к незначительному возрастанию интенсивности теплоотдачи.

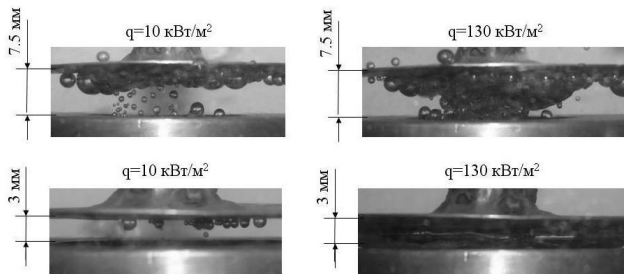


Рис. 5. Визуализация процесса кипения на пористой структуре в стесненных условиях

Уменьшение степени интенсификации теплообмена при уменьшении расстояния между пористым покрытием и ограничителем можно объяснить следующим образом. При увеличении отводимой мощности количество паровых пузырей под ограничивающей поверхностью увеличивается. В случае незначительных расстояний они могут сливаться в единое паровое образование, вследствие чего доступ теплоносителя к пористому покрытию существенно затрудняется и осуществляется преимущественно с боковых сторон. В связи с этим, центральная область пористой структуры может запариваться либо осушаться, что и приводит к увеличению температуры поверхности, снижению интенсивности теплоотдачи и, при значительных плотностях теплового потока, кризису теплоотдачи.

Не смотря на ухудшение условий теплоотдачи, сравнение с данными, полученными для гладкой поверхности, показало, что нанесение пористого покрытия приводит к интенсификации теплообмена при кипении, причем коэффициент теплоотдачи увеличивается в 1,2-4 раза (см. рис. 6).

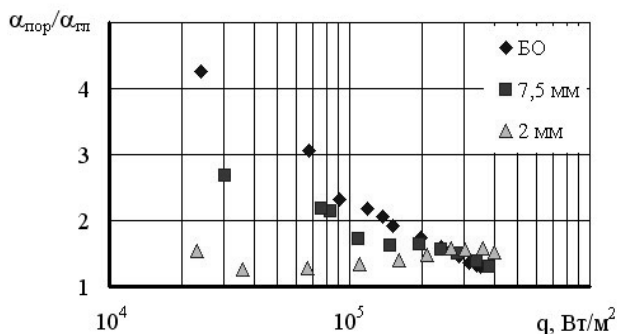
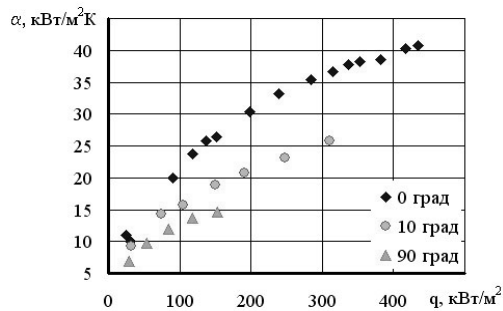
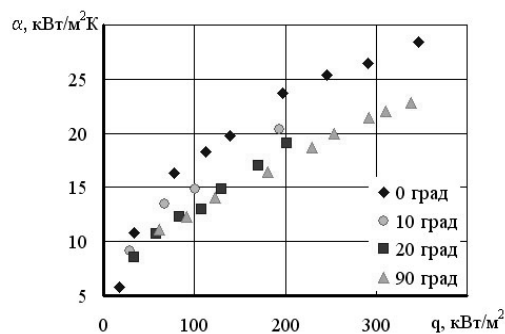


Рис. 6. Соотношение коэффициентов теплоотдачи при кипении на пористой и гладкой поверхностях в различных условиях

Также было исследовано влияние угла наклона теплоотдающей поверхности на интенсивность теплоотдачи в стесненных условиях. Установлено, что отклонение от горизонтального положения (0°) приводит к снижению интенсивности теплоотдачи (см. рис. 7). При этом уменьшение расстояния между пористой поверхностью и ограничителем приводит к уменьшению степени влияния угла наклона. Так, при кипении в большом объеме при отводимой мощности 200 кВт/м² наклон на 10° привел к снижению интенсивности теплоотдачи в 1.5 раза, в то время как при расстоянии в 10 мм – всего в 1.2 раза.



а



б

Рис. 7. Влияние высоты свободного пространства на интенсивность теплоотдачи при кипении на пористом покрытии: а – расстояние 30 мм (большой объем); б) расстояние 10 мм

Вероятно, это объясняется следующим образом. При кипении в большом объеме увеличение угла наклона поверхности приводит к тому, что доступ жидкости к пористой структуре затрудняется за счет паровых пузырьков, отрывающихся от центров парообразования в нижней части пористого покрытия. При уменьшении расстояния между теплоотдающей поверхностью и ограничителем доступ теплоносителя затрудняется по сравнению с большим объемом, однако при этом образуется своеобразный канал, в котором за счет выхода из него паровых пузырей происходит более интенсивная циркуляция теплоносителя. Причем чем больше угол наклона, тем интенсивнее движение паровых пузырей.

---

**Выводы**


---

1. Установлено, что уменьшение расстояния между пористой поверхностью и жестким препятствием может привести к снижению интенсивности теплоотдачи на 20-30% по сравнению с кипением в большом объеме.

2. В диапазоне высот до 5 мм для воды наблюдается незначительная интенсификация процесса отвода теплоты при кипении, однако коэффициенты теплоотдачи остаются более низкими, чем при кипении в большом объеме.

3. Отмечено, что при увеличении угла наклона теплоотдающей поверхности происходит снижение ин-

тенсивности теплоотдачи при кипении, как в большом объеме, так и в стесненных условиях.

4. При уменьшении величины свободного пространства происходит уменьшение влияния угла наклона теплоотдающей поверхности на коэффициент теплоотдачи при кипении.

5. Несмотря на снижение интенсивности теплоотдачи при значительных расстояниях между теплоотдающей поверхностью и жестким препятствием, применение пористого покрытия приводит к интенсификации теплообмена по сравнению с кипением на гладкой поверхностью в аналогичных условиях.

---

**Литература**

1. Маньковский О.Н. О механизме процесса кипения на затопленных поверхностях с пористым покрытием [Текст] / О.Н. Маньковский, О.Б. Иоффе, Л.Г. Фридгант, А.Р. Толчинский // ИФЖ. – 1976. – Т.30, №2. – С. 310-316
2. Стырикович М.А. О механизме переноса нелетучих примесей при кипении на поверхностях, покрытых пористыми структурами [Текст] / М.А. Стырикович, А.И. Леонтьев, С.П. Малышенко // ТВТ. – 1976. - Т.14. - С. 998 – 1006
3. Зуйков А.С. Модель процесса концентрирования при кипении в КПС [Текст] / А.С. Зуйков, А.И. Леонтьев, В.С. Полонский и др. – докл. АН СССР, 1978 - Т.241, №3 - С. 579 – 583
4. Шаповал А.А. Теплообмен при кипении воды и ацетона на поверхностях с металловолоконными капиллярно-пористыми покрытиями. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 01.04.14 [Текст] / Шаповал А.А. – Киев, Институт технической теплофизики, 1985. – 23 с.
5. Кичатов Б.В. Кипение жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями [Текст] / Б.В. Кичатов, В.М. Поляев // 4 th Minsk International Heat and Mass Transfer Forum.- Minsk, Belarus. - 2000 - P. 176-188.
6. Alam M.S. Enhanced boiling of saturated water on copper coated heating tubes [Текст] / Mohammad Siraj Alam, L. Prasad, S.C. Gupta, V.K. Agarwal // Chemical Engineering and Processing Process Intensification. – 2008. – January (Vol. 47, Iss.1). – P. 159-167
7. Li Ch. Evaporation/Boiling in Thin Capillary Wicks (I) – Wick Thickness Effects [Текст] / Chen Li, G. P. Peterson, Yaxiong Wang // Journal of Heat Transfer. - 2006 – December (Vol. 128, Iss. 12) – P. 1312-1320
8. Hanlon M. A. Evaporation Heat Transfer in Sintered Porous Media [Текст] / M. A. Hanlon, H. B. Ma // Journal of Heat Transfer. – 2003. – August (Vol. 125, Iss. 8) – P. 644-652
9. 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.
10. Li Ch. Evaporation/Boiling in Thin Capillary Wicks (II) – Effects of Volumetric Porosity and Mesh Size [Текст] / Chen Li, G. P. Peterson // Journal of Heat Transfer. – 2006. – December (Vol. 128, Iss. 12) – P. 1320-1328
11. Das A.K. Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling [Текст] / A.K. Das, P.K. Das, P. Saha // Applied Thermal Engineering. – 2009. – December (Vol. 29, Iss. 17-18) – P. 3643-3653
12. Верховский В.В. Внутренние характеристики процесса и теплообмен при кипении хладагентов на поверхностях с искусственными центрами парообразования [Текст] / В.В. Верховский, Г.Н. Данилова, А.В. Тихонов // In: Proc. 4th Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. - Minsk, Belarus. – 2000. – P. 168-175
13. Arik M. Enhancement of pool boiling critical heat flux in dielectric liquids by microporous coatings [Текст] / Mehmet Arik, Avram Bar-Cohen, Seung Mun You // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – March (Vol. 50, Iss. 5-6) – P. 997-1009
14. Кузма-Китча Ю.А. Улучшение характеристик элементов парогенерирующей техники путем интенсификации теплообмена [Текст] / Ю.А. Кузма-Китча, А.С. Комендантов, Г. Барч // In: Proc. 4th Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. – Minsk, Belarus. – 2000. – P. 215-222
15. Sarwar M.S. Subcooled flow boiling CHF enhancement with porous surface coatings [Текст] / Mohammad Sohail Sarwar, Yong Hoon Jeong, Soon Heung Chang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – August (Vol. 50, Iss. 17-18) – P. 3649-3657
16. Forrest E. Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings [Текст] / E. Forrest, E. Williamson, J. Buongiorno, L-W Hu, M. Rubner, R. Cohen // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – January (Vol. 53, Iss. 1-3) – P. 58-67
17. Алексеик О.С. Интенсивность теплоотдачи при кипении на поверхности малого размера [Текст] / О.С. Алексеик, В.Ю. Кравец, И.А. Копчевская // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2012. – №1 – С.49-53