

э л е к т р о н н ы й ж у р н а л

МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель: ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

УДК 536.24

Исследование кипения воды в большом объеме на микроструктурированных поверхностях

А.В. Белов, С.И. Каськов, И.А. Попов

m9636732846@gmail.com,

kaskov@power.bmstu.ru,

popov-igor-alex@yandex.ru

ВВЕДЕНИЕ

При создании систем охлаждения к современным теплообменным поверхностям кипения предъявляется ряд требований. Основное из них – отвод больших тепловых потоков при относительно низких разностях температур стенки и жидкости. Для этого требуется проанализировать и обеспечить:

- начало пузырькового кипения при меньшей разности температур горячей стенки и жидкости, то есть границы между естественной конвекцией и пузырьковым кипением должны быть сужены;
- более высокие коэффициенты теплоотдачи при заданной разности температур стенки и жидкости;
- увеличение критического теплового потока, который идентифицирует начало кризиса кипения.

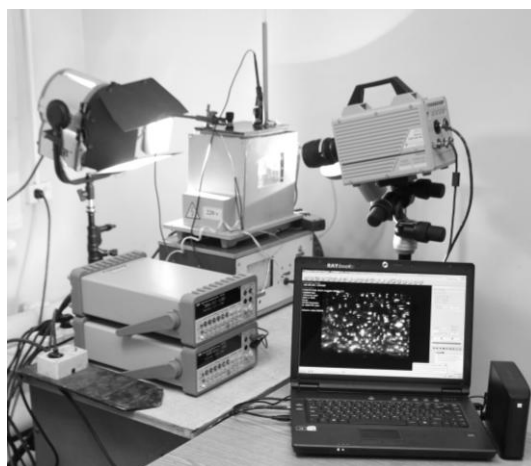
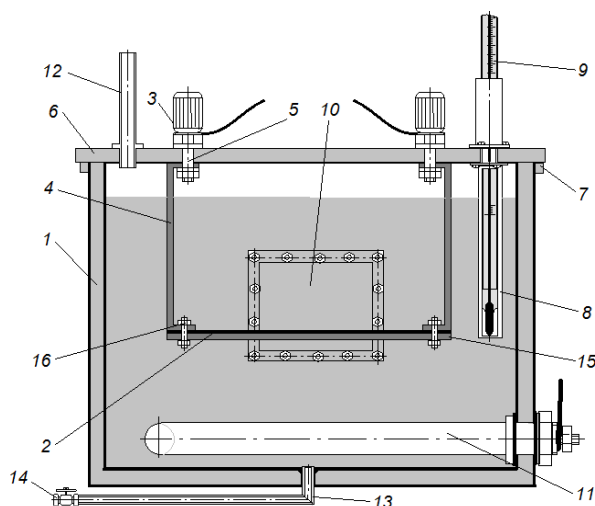
Повышение теплоотдачи от стенки к жидкости при кипении может быть достигнуто различными средствами, один из которых формированием микроструктуры на поверхности теплообмена для повышения интенсивности образования и отрыва пузырьков. Микроструктурированные поверхности – теплообменные поверхности с полученными, при их обработке и/или нанесении покрытий, мелкомасштабными деформациями, сопоставимыми по геометрическим параметрам с шероховатостью. Разработка структурированных поверхностей для

интенсификации процесса кипения основывается на основном правиле – создание большого количества центров парообразования или ловушек пузырьков пара на поверхности, что приводит к более раннему началу кипения или кипению при более низких температурных напорах.

Особый интерес представляют упорядоченные структуры, получаемые комбинацией методов резания и пластического деформирования - методы, основанные на подрезании и отгибке поверхностных слоев детали. Метод, получивший название «деформирующее резание» (ДР) имеет ряд существенных отличий от зарубежных прототипов и запатентован в России [1], ряде стран Европы и США, и используется не только для создания теплопередающих поверхностей [2,3,4,7,8,10], но и для получения фильтрующих труб, микросеток, капиллярных структур, упрочнения поверхностей, восстановления размеров деталей и др.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования выполнялись на установке, модель которой представлена на рис.1 Описание установки, условия и методика проведения опытов представлены в [5,6].



1 – корпус, 2 – экспериментальный образец, 3 – клеммы, 4 – токоподводы, 5 – резьбовое соединение. 6 – крышка, 7 – бурт, 8 – гильза, 9 – термометр, 10 – смотровое окно, 11 – ТЭН, 12 – штуцер конденсатора, 13 – сливной патрубок, 14 – вентиль, 15 – текстолитовая основа образца.

Рисунок 1 - Схема и внешний вид экспериментальной установки

Плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи рассчитывались по формулам:

$$q=Q/F=I \cdot \Delta U/F, \quad \alpha = Q/(F \cdot \Delta t),$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности пластины, на которую нанесены ребра, м²; Q – тепловой поток, выделяющийся на пластине, Вт; I – сила тока, подаваемого на пластину, А; ΔU – падение напряжения на пластине, В; $\Delta t = \bar{t}_w - t_f$ – разность между средней температурой поверхности образца и воды, К.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Характерные размеры интенсификаторов теплообмена при кипении представлены на рис. 2 и в табл. 1. Исследования проводились на образцах из различных материалов толщиной от 0,2 до 0,5 мм, длиной рабочей части (оребренной) 115 мм и шириной 5 мм.

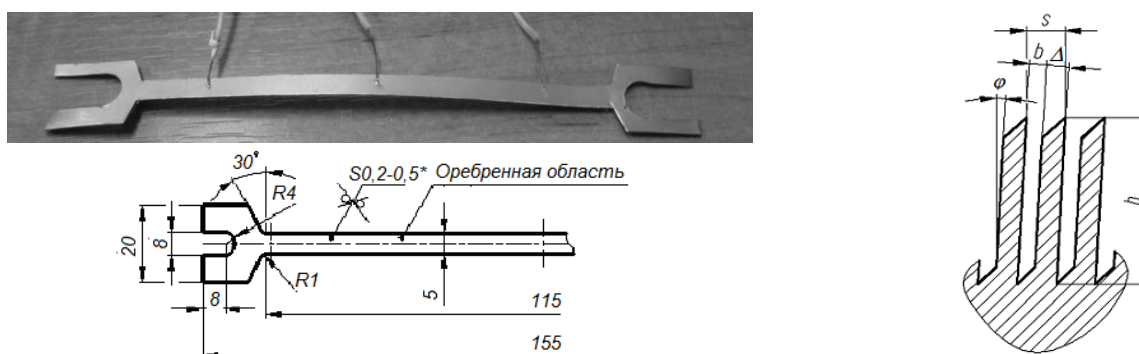


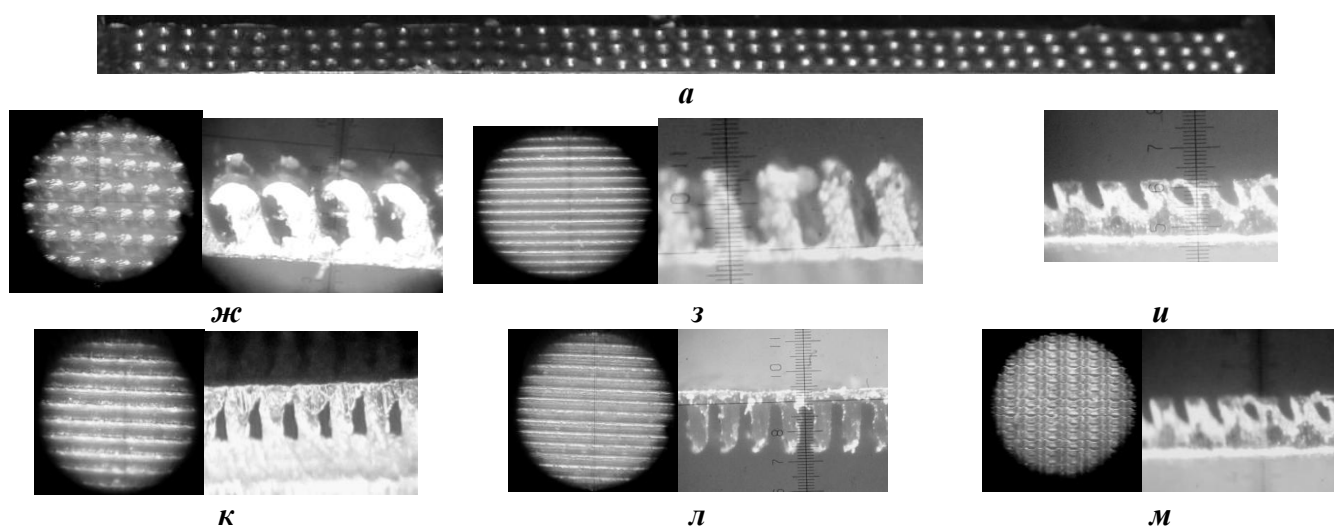
Рисунок 2 - Геометрическая форма образца, расположение оребрённой зоны и термопар, размеры ребер

Таблица 1 Параметры исследованных пластин

Обозначение на рис.4, 5 и 6	Тип поверхности, внешний вид, рис.3	Материал	Высота ребер h, мкм	Шаг ребер s, мкм	Межреберный зазор b, мкм	Угол при ребре (1-φ), град.	Глубина выемок, мм	Диаметр выемок, мм	Шаг накатки, мкм	Ширина канавки, мкм
1-2	гладкая	12X18H9T	-	-	-	-	-	-	-	-
3	а	12X18H9T	-	-	-	-	1	2	-	-
4	а	12X18H9T	-	-	-	-	0,5	1	-	-
10	ж	AISI 1020	420	350	-	90	-	-	318	140
11	з	12X18H9T	150	160	50	90	-	-	-	-

12	и	12X18H9T	90	160	50	90	-	-	-	-
13	к	AISI 1020	200	200	30-40	60	-	-	-	-
14	л	12X18H9T	200	160	50	90	-	-	-	-
15	м	AISI 1020	340	240	-	75	-	-	318	140
16	л	12X18H9T	200	160	50	90	-	-	-	-

Площадь поверхности за счет нанесения микроструктуры увеличивалось для образцов № 10-12, 14-16 от 2,1 до 8,3 раза. Полученные в работе результаты не приписаны развитию поверхности теплообмена, а в основном – изменению гидродинамической картины кипения на микрокапиллярной поверхности.



а – трехмерная шероховатость в виде сферических выемок; **з, и, л** – двухмерная шероховатость в виде проводящих ребер; **ж, м** – трехмерная шероховатость в виде штырьковых рассеивающих ребер; **к** - двухмерная шероховатость в виде микроканальной структуры, образованной согнутыми проводящими ребрами

Рисунок 3 - Внешний вид (сверху) и шлифы исследованных поверхностей кипения

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные данные получены для дистиллированной воды при атмосферном давлении. Тепловой поток изменялся в пределах от 10 до 1200 кВт/м². В исследуемом диапазоне плотности теплового потока наблюдались режимы поверхностного, развитого пузырькового кипения и кризиса кипения. Исследования проводились при кипении, когда температура жидкости в кипятильной камере в зоне экспериментальных образцов составляла от 97,5 до 99,3 °С. Гистерезис кривой кипения для воды не наблюдался.

На рис. 4 и 5 показаны экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении в большом объеме воды на поверхностях с различной геометрией и на гладкой поверхности. Результаты опытов (точки 1) и результаты расчета (линия 2) по зависимости Лабунцова – $\alpha = 3,14 \cdot q^{0,7} \cdot p^{0,1}$ – различаются на 10 %. Уровни интенсификации теплоотдачи определялись при $q = \text{idem}$ (по данным рис.4). На рис. 5 показано, что наличие микрошероховатости позволяет достичь поставленные ранее задачи достижения более высоких коэффициентов теплоотдачи при заданной разности температур стенки и жидкости и начала пузырькового кипения при меньших разностях температур между горячей стенкой и жидкостью.

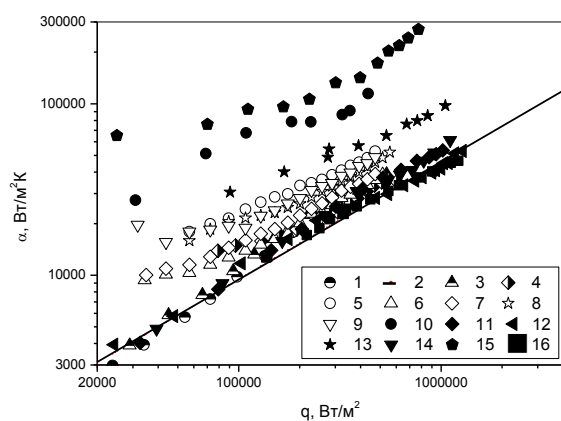


Рисунок 4 - Теплоотдача при кипении в большом объеме воды на поверхностях с различной геометрией. Обозначения в табл.1. Данные позиций 5–9 взяты из [9]

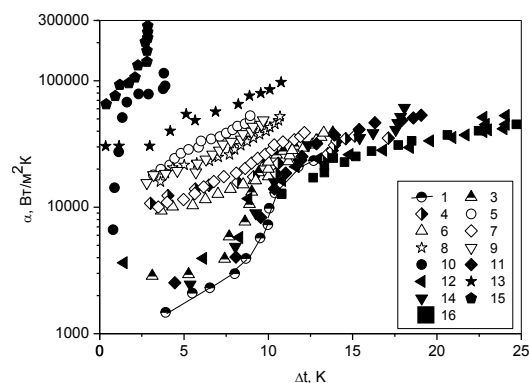


Рисунок 5 - Интенсивность теплоотдачи при кипении в большом объеме в зависимости от разницы температуры поверхностей и воды. Обозначения в табл.1. Данные позиций 5–9 взяты из [9]

Наибольшая интенсификация теплоотдачи, от 4,5 до 9 раз в зависимости от уровня плотности теплового потока, свойственна поверхностям № 15 и № 10 с трехмерной столбчатой микрошероховатостью. Также высокий уровень интенсификации теплоотдачи (от 2,5 до 3 раз во всем диапазоне плотности тепловых потоков) показала поверхность № 13 со сплошными ребрами, торцы которых загнуты горизонтально и образуют микроканалы. Данные поверхности близки к пористым покрытиям по механизмам интенсификации теплообмена.

Для однотипных видов поверхностей № 11,12,14 с тепловыделяющими микроребрами ($s, b, \varphi, \Delta = \text{const}$, $\Delta = s - b$ – толщина ребра) с увеличением относительной высоты ребер h/Δ с 0,82 до 1,82 (h с 90 мм до 200 мм)

интенсификация теплоотдачи $\alpha/\alpha_{\text{гл}}$ при $q=250\text{кВт/м}^2$ растет в диапазоне от 1,17 до 1,26. При этом площадь теплообмена увеличивается в 1,65 раз с $F/F_{\text{гл}}=2,125$ до 3,5. Поверхности № 14 и № 16 имеют одинаковую форму и размеры микроорегбрения, но на образце № 14 продольные ребра – тепловыделяющие, а на образце № 16 поперечные ребра - теплорассеивающие. Отмечено, что на образце № 14 значения коэффициента теплоотдачи от 30 до 50 % выше, чем на образце № 16. Однотипная поверхность №16 с теплорассеивающими микроребрами относительной высотой $h/\Delta = 1,82$ ($h=200$ мм) имеет тот же уровень теплоотдачи, что и поверхность № 12 с тепловыделяющими микроребрами высотой $h/\Delta = 0,82$ ($h = 90$ мм).

Относительная высота ребер h/Δ влияет обратно пропорционально установленной на образцах № 11,12,14 образом, что связано с основным влиянием другого параметра. Установить влияние на уровень теплоотдачи относительных параметров – относительной ширины межреберного зазора b/h , относительной ширины ребра Δ/b и увеличения площади теплообмена $F/F_{\text{гл}}$ – также не удалось. Влияние абсолютного размера межреберного зазора b . При увеличении зазора между ребрами (шага ребер) уменьшается уровень интенсификации теплоотдачи. Увеличение угла наклона ребер к основной поверхности будет способствовать увеличению коэффициентов теплоотдачи. На поверхностях № 3 и № 4 с макрошероховатостью из сферических выемок интенсификация теплоотдачи минимальна и не превышает 1,2 раза. Основным механизмом интенсификации теплоотдачи на всех рассмотренных поверхностях является увеличение количества центров парообразования и сохранение микропузырей в межреберном пространстве в ходе развития кипения, уменьшение диаметра пузырька пара в момент отрыва и увеличение частоты отрыва. В ходе проведения эксперимента производилась видеосъемка процесса кипения на образцах. Данная информация важна для объяснений механизмов интенсификации теплообмена. Полученные данные позволяют оценить диаметр отрывного пузырька пара, частоту отрыва, скорость подъема и роста пузыря.

Установлены критические тепловые потоки в зависимости от геометрии интенсифицированных поверхностей (рис.6). Кризис кипения фиксировался по

характерному резкому повышению температуры поверхности, сопровождающемуся свечением поверхности, излому на графике зависимости удельного теплового потока от разности температур и прогару поверхности.

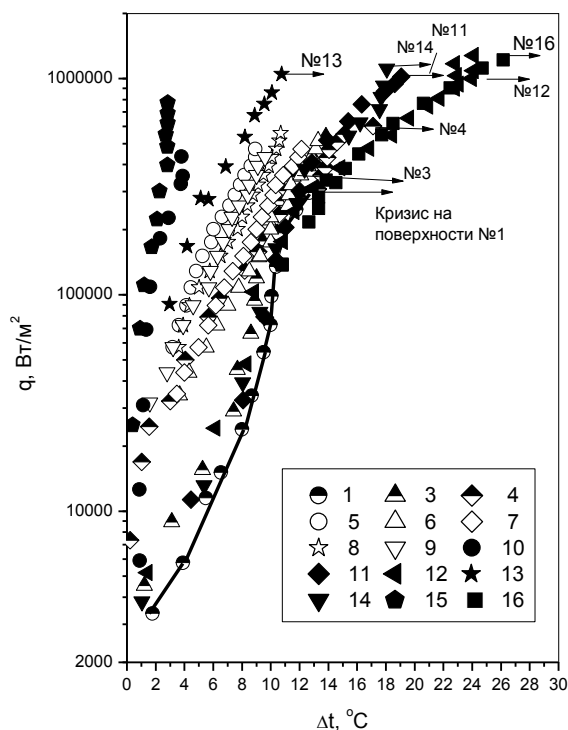


Рисунок 6 - Тепловые потоки при кипении воды на поверхностях различной конфигурации. Обозначения в табл.1. Данные позиций 5 – 9 взяты из [9]

Минимальное увеличение критических тепловых потоков показано поверхностями № 3 и № 4 с макрошероховатости в виде систем сферических выемок – до 2 раз. Для поверхностей № 11-12,14,16 с микрошероховатостью в виде двухмерных микроребер увеличение критических тепловых потоков составило от 3,3 до 4,1 раз. С увеличением относительной высоты h/Δ теплорассеивающих микроребер возрастают и критические тепловые потоки. При этом поверхности №14 и № 16 с теплорассеивающими и тепловыделяющими микроребрами одной высоты имеют примерно одинаковый уровень критических тепловых потоков, однако из-за более низких коэффициентов теплоотдачи кризис кипения на поверхности № 16 с теплорассеивающими микроребрами наступает при больших разностях температур поверхности и жидкости. В исследованном диапазоне плотностей тепловых потоков определить критические тепловые потоки для перспективных поверхностей № 10 и № 15 не удалось.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования показано, что теплопередающие поверхности, полученные ресурсосберегающим методом деформирующего резания, в виде двух- и трехмерных микрооребранных поверхностей и канальных структур позволяют существенно повышать теплоотдачу и критические тепловые потоки при кипении жидкостей. Наибольшая интенсификация теплоотдачи: от 3 до 9 достигается на поверхностях с трехмерными столбчатыми и канальными структурами. Для двухмерных микроребер интенсификация теплообмена составила до 2,5 раз. При этом уменьшение межреберного расстояния и увеличение угла наклона увеличивают интенсивность теплообмена.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 2044606 (РФ). Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации // Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников // Изобретения.– 1995.– №27.
2. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Кононов О.В. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием // Вестник МГТУ 1993 - №4.- С.79-82.
3. Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // Новости теплоснабжения. – 2005. -№4. С.51-53.
4. Зубков Н.Н., Шашков С.Э.. Получение поверхностей интенсивного кипения методом деформирующего резания. Материалы всерос. науч.-техн. конференции «Машиностроительные технологии». – М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, С.60.
5. Попов И.А, Щелчков А.В., Ахметеалиева А.Р., Гришагин А.В. Теплообмен при кипении воды на макро- и микрошероховатых поверхностях в условиях свободной конвекции // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в новых энергетических технологиях: Тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (23-27 мая 2011 г. Звенигород). – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 203-204

6. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Зубков Н.Н., Каськов С.И., Щелчков А.В. Кипение воды на микроструктурированных поверхностях // Труды Академэнерго. 2012. №1. С.14-31.

7. Путилин В.Ю. Теплообмен и сопротивление при поперечном обтекании одиночных оребренных труб с малыми шагами оребрения. Дис. ...канд. техн. наук – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003 – 160 с.

8. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: монография / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев, А.В. Щелчков, С.И. Каськов под общ. ред. Гортышова Ю.Ф. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.

9. Исследование теплообмена при кипении на новых поверхностях интенсивного теплообмена // Отчет НИР грант РФФИ № 05-08-01288 «а» М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008 – 44 с.

10. Anisimov S.V., Smirnov Y.B. Condensation of vapours of immiscible liquids on horizontal finned tubes // Proceedings of International Symposium on the Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation and 11-th Internatioal School-Seminar of Young Scientists and Specialists, Moscow, May 21-24, 1997, pp. 215 - 220