

УДК 536.24

КИПЕНИЕ ВОДЫ НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Ю.Ф.Гортышов*, И.А.Попов*, Н.Н.Зубков**,
С.И.Каськов**, А.В.Щелчков*
porov-igor-alex@mail.ru

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им.А.Н. Туполева – КАИ

**Московский государственный технический университет им.Н.Э. Баумана

Ключевые слова: кипение, теплоотдача, кризис кипения, интенсификация

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи и критических тепловых потоков на микроструктурированных поверхностях. Поверхности получены методом деформирующего резания и имеют различные конструктивные формы и размеры. Достигнута интенсификация теплообмена до 9 раз, по сравнению с гладкой поверхностью. Увеличение критической плотности теплового потока составило 4,1 раз. Даны основы физических моделей интенсификации кипения.

Пузырьковое кипение – это основной вид двухфазного теплообмена, при котором теплота передается от нагретой стенки к нагретой до температуры насыщения жидкости в месте их контакта. Когда пузырьковое кипение происходит в покоящейся жидкости, это соответствует термину пузырьковое кипение в большом объеме или кипение при естественной конвекции. Этому двухфазному естественноконвективному процессу переноса свойственны значительные коэффициенты теплоотдачи из-за имеющего место интенсивного процесса фазового превращения. Интенсивность процесса теплоотдачи обусловлена динамикой формирования, роста и отрыва пузыря пара от нагретой поверхности.

Несмотря на значительные коэффициенты теплоотдачи при кипении даже на гладких поверхностях, развитие современных технологий, в первую очередь электронных устройств, требует дальнейшего увеличения коэффициентов теплоотдачи для отвода больших удельных тепловых потоков с относительно малых площадей.

Следовательно, интенсификация теплоотдачи при кипении является актуальной задачей научных исследований. Повышение теплоотдачи от стенки к жидкости при кипении может быть достигнуто различными средствами, а именно:

1. выбором соответствующей рабочей жидкости, физические параметры которой могут обеспечить более высокие коэффициенты теплоотдачи;
2. применением кипения при движении охлаждающегося агента;

3. 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. В этом случае шероховатость мала для изменения интенсивности однофазной теплоотдачи. Такие поверхности используются, прежде всего, для процессов кипения.

Разработка структурированных поверхностей для интенсификации процесса кипения основываются 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. Это особенно важно для процессов кипения жидкостей, хорошо смачивающих поверхности (например, фреоны, органические жидкости, криогенные жидкости, и щелочные жидкие металлы).

Для создания систем охлаждения к современным теплообменным поверхностям для 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:

а) начало пузырькового кипения при меньших разностях температур между горячей стенкой и жидкостью должна обеспечивать, то есть границы между естественной конвекцией и пузырьковым кипением должны быть сужены;

б) более высокие коэффициенты теплоотдачи при заданной разности температур стенки и жидкости;

в) увеличение критического теплового потока, который идентифицирует начало кризиса кипения.

Специальной обработкой поверхности (механическая обработка, формование или нанесение покрытий) можно создать открытые полости (полузакрытые выемки), которые «захватывают» пузырьки пара на поверхности и способствуют дальнейшему парообразованию в жидкостях с малыми силами поверхностного натяжения. Механизм фазового превращения на таких структурированных поверхностях отличается от "обычного" кипения. Описания особенностей и различные модели такого процесса представлены в работах Ксина и Чао [1], Люба и Берглеса [2], Уонга [3], Накаямы [4,5], Уебба и Хайдера [6], Чена и Уебба [7]. Большое количество варьируемых геометрических параметров теплообменных поверхностей и оптимизация процесса теплообмена при кипении по множеству режимных параметров ставят перед исследователями и инженерами ряд серьезных задач и полностью обуславливают дальнейшие обширные исследования в этой области.

В одной из первых работ по интенсификации теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме М. Якоба и У. Фрица [8,9] за счет использования микрошероховатых поверхностей с квадратными фрезерованными пазами и на шероховатой поверхности, полученной обработкой пескоструйным аппаратом, получено повышение коэффициентов теплоотдачи от 7 до 13 раз и от 1,3 до 4 раз, соответственно. Подобные опыты были подтверждены К. Корти и А.С. Фаустом [10], получившим интенсификацию теплоотдачи при кипении в большом объеме на

поверхности с зернистой шероховатостью до 4 раз. О значительной интенсификации теплоотдачи на структурированных поверхностях и уменьшении на порядок значения перегрева жидкости на стенке сообщалось в работах А.Е. Бергуса [11], Дж.Р.Тоума [12], Р. Уебба [6,7]. С. Йилмаз и др. [13,14] провели всесторонний сравнительный анализ пузырькового кипения на нескольких промышленно выпускаемых структурированных поверхностях. Выявлен сдвиг кривых кипения для интенсифицированных труб влево от кривой кипения для гладкой трубы в область пониженных температурных напоров и увеличение критических тепловых потоков до 40%.

В последние годы возрос интерес к исследованию характеристик кипения с нанорельефом [15,16]. Установлено, что нанесение нанорельефа способствовало увеличению частоты отрыва пузырьков от 3 до 5 раз и при меньших их диаметрах (примерно в 3 раза), чем на гладких поверхностях. Количество центров парообразования увеличивается до 25 раз и более в зависимости от степени перегрева рельефа.

Среди отечественных исследований кипения на структурированных поверхностях необходимо отметить работы М.А.Стыриковича, Ю.А. Кузма-Кичты, С.А. Ковалева, М.Д. Диева, Л.Л. Васильева, В.М. Поляева, И.З. Коппа, Л.И.Ройзена, А.В. Боришанской] и многих других.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана был предложен метод лезвийной механической обработки, сочетающий процесс резания и целенаправленного пластического деформирования подрезанного слоя, который получил название метод деформирующего резания (ДР) [17]. Образующаяся при ДР стружка не отделяется полностью от заготовки, сохраняя с ней связь по своей узкой стороне. Совокупность подрезанных поверхностных слоев, которые сохранили сплошность своего соединения с заготовкой, образует на обработанной поверхности детали развитый микрорельеф. На осуществимость процесса ДР в наибольшей степени влияют пластичность обрабатываемого материала и соотношение глубины резания и подачи. Для материалов с относительным удлинением более 30%, к которым относятся большинство цветных металлов, высота ребер может составлять до 7 шагов оребрения. Для материалов с относительным удлинением в диапазоне 20...30%, к которым относятся большинство сталей, максимальная высота ребер составляет до 5 шагов оребрения. Материалы с относительным удлинением менее 18% не поддаются обработке деформирующим резанием без дополнительного подогрева детали или зоны обработки. Твердость материала детали не должна превышать НВ220. Площадь поверхности детали в результате обработки методом ДР может быть увеличена в 14 раз, при этом могут быть нанесены ребра с межреберным расстоянием от 5 мкм до 3 мм на заготовки диаметром от 6 мм (рис.1). Интенсификация теплообмена означает сокращение материалоемкости теплообменных аппаратов. В большинстве случаев для изготовления теплообменников используются трубы из меди или ее сплавов. Учитывая, что только для изготовления холодильных и кондиционирующих установок используется около 6% мирового потребления меди и ее сплавов, разработка теоретических и практических основ нового безотходного метода механической обработки - деформирующего резания, как способа получения на поверхностях

деталей высокоэффективного макрорельефа теплообменного и других назначений является актуальной научно-технической задачей.

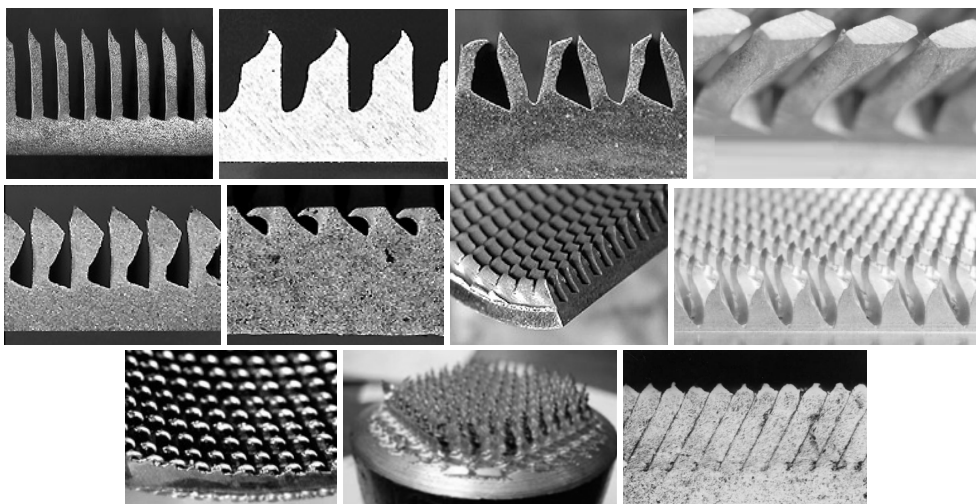


Рис.1. Оребренные методом ДР поверхности различной конфигурации

Принципиально методы создания развитых поверхностей с внутренними паровыми полостями на основе метода деформирующего резания можно разделить на две группы. Первая группа основана на последовательном выполнении ребер и дальнейшем пластическом деформировании ребер. Здесь выделяются три подгруппы операций: 1 - пластическое деформирование вершин ребер с получением утолщения на их вершине, 2 - пластическое деформирование вершин ребер с их изгибом, 3 - комбинация утолщения и изгиба вершин ребер или самих ребер. Вторая группа основана на одностадийном формировании подповерхностной полости за счет специальной геометрии инструмента для деформирующего резания. Вторая группа предлагаемых методов также разделяется на три подгруппы: 1 - образование ребер с утолщением на вершине за счет ломаной главной режущей кромки, 2 - образование аналогичных ребер за счет специальной конфигурации деформирующей кромки, 3 - образование паровых полостей за счет разнонаправленного наклона парных ребер.

Методом ДР возможно получение макрорельефа в виде шипов. Для этого на поверхности трубной заготовки перед ДР накатываются рифления накатным роликом, установленным перед резцом на подвижном люнете. Очевидно, что развитые поверхности, получаемые методом ДР, в первую очередь перспективны для изготовления деталей теплообменников, поскольку увеличение их площади поверхности интенсифицирует теплообменные процессы и позволяет снижать габариты и вес теплообменной аппаратуры.

Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальные исследования выполнялись на установке, модель которой представлена на рис.2 Установка представляет собой теплоизолированный сосуд в виде кипятильной камеры 1 размером 150x250x200 мм, заполненный дистиллированной водой. Внутри камеры 1 находится пластина 2, на которой изучалась интенсификация кипения. Конструкция, на которой закреплены экспериментальные пластины, образует отдельный узел установки. Нагрев экспериментальных пластин осуществлялся путем непосредственного пропускания по ним электрического тока. Подвод электричества к пластине осуществляется по следующим элементам. Напряжение подавалось от клемм 3 через медные плоские токоподводы 4 толщиной 3 мм и шириной 20 мм к образцу 2. Все места электрического контакта при подготовке к эксперименту были зачищены. Токоподводы закреплены с помощью резьбового соединения 5 на электроизолирующей текстолитовой крышке 6. На крышке имеется бурт 7, уплотняющий крышку. Расположение экспериментальной пластины относительно крышки 6 и сосуда 1 определялось условием наилучшего обзора ее рабочей поверхности. Экспериментальная пластина 2 крепилась на поддерживающей текстолитовой пластине 15 и прижималась к токоподводам через резьбовое соединение 16.

На крышке закреплена гильза 8 термометра 9. При проведении эксперимента термометр 9 устанавливается в гильзу 8 так, чтобы ртутный резервуар находится на одном уровне с экспериментальной пластиной 2. Таким образом, измерялась температура воды непосредственно в зоне расположения пластины 2.

Кипятильная камера 1 имеет двойные стенки, между которыми имеется асбестовая теплоизолирующая набивка.

Для наблюдения за процессом кипения имеются два окна 10. Одно окно, через которое осуществляется подсветка, выполнено из матового стекла. Равномерная освещенность окна достигается с помощью полуцилиндрического зеркала на задней стенке установки. Другое окно, для наблюдения за процессом кипения, выполнено из прозрачного стекла.

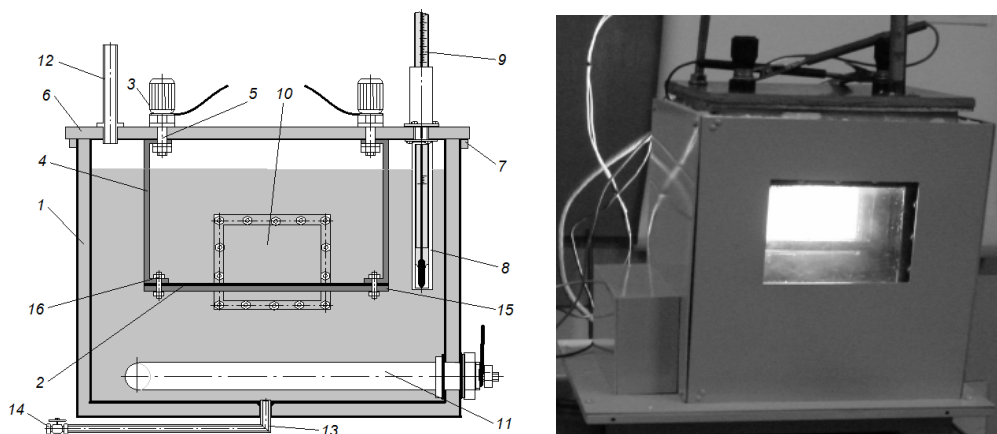


Рис.2. Схема и внешний вид экспериментальной установки

Подогрев воды до температуры кипения осуществляется с помощью ТЭНа 11. Тепловая мощность ТЭНа регулировалась во время эксперимента.

Пары воды, образующиеся при кипении, охлаждались на стенке конденсатора, подключаемого к полости камеры 1 через штуцер 12, находящийся в верхней части сосуда. Конденсат стекал обратно в камеру. Также с помощью конденсатора поддерживались условия насыщения в рабочей камере.

Заполнение водой и опорожнение камеры осуществлялось через сливной патрубок 13 в нижней части сосуда при открытом вентиле 14. Во время работы установки вентиль 14 перекрывался. Слой жидкости на экспериментальной пластине составлял 100 мм.

Для управления параметрами нагрева воды охранном и экспериментальным нагревателями использовались следующие устройства: блок мощности и блок управления. Блок мощности представляет собой сварной каркас с установленным на передней панели автотрансформаторами для регулировки напряжения на экспериментальном нагревателе и охранном ТЭНе, два выключателя для включения и выключения напряжения нагрева экспериментального нагревателя и охранного ТЭНа, амперметры для контроля силы тока при нагреве образца, ваттметр для определения тепловыделения на образце и милливольтметр для измерения термо-ЭДС хромель-копелевых термопар на поверхности образца и арматура сигнальная.

Температура воды t_f в ходе эксперимента определялась с помощью ртутного термометра со шкалой от 50 до 100 °С и ценой деления 0,1 °С.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле:

$$\alpha = Q/(F \cdot \Delta t),$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м²К; F – площадь поверхности пластины, на которую нанесены ребра, м²; $Q=I \cdot \Delta U$ – 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

Геометрическая форма образца показана на рис 3. Исследования проводились на образцах из различных материалов толщиной от 0,2 до 0,5 мм, длиной рабочей части (орезбренной) 115 мм и шириной 5 мм. Длина образца выбрана так, чтобы обеспечивался свободный обзор поверхности кипения через смотровое окно. Ширина и толщина рабочего участка образца были выбраны из условия получения необходимых тепловых потоков на поверхности теплообмена. В местах контакта образца с токоподводящими шинами площадь соответствующей грани образца увеличена с целью обеспечения надежного электрического контакта и минимального отвода тепла в этих местах на токоведущие шины. На прямом узком участке образца наносился микрорельеф.

Заготовкой для изготовления оребренных пластин служили листы титанового сплава ВТ1 толщиной 0,5 мм, нержавеющей стали X18H9T и 12X18H10T толщиной 0,2 мм и углеродистой стали AISI 1020 толщиной 0,3-0,35 мм. Такой выбор был мотивирован, во-первых, высоким качеством формы ребер, которые можно получить на поверхности титановых пластин; во-вторых, сравнительно высоким удельным сопротивлением материала, что немаловажно, так как обогрев образца в эксперименте производится непосредственным пропусканием тока.

Для изготовления образцов использовались пластины шириной 20 мм с предварительно нанесенным микрорельефом. Особенность обработки этих заготовок заключалась в том, чтобы соблюсти параллельность и прямолинейность боковых сторон обогреваемого участка образца с точностью $\pm 0,1$ мм. Такая точность обеспечивалась для того, чтобы исключить сужения и, как следствие, местные перегревы поверхности, которые могут внести погрешность при измерении температуры. Образование формы образца из заготовки производилось на шлифовальном станке по шаблону. При реализации такого метода обработки после удаления заусенца алмазным надфилем достигалось хорошее качество кромок образца.

Температура поверхности образца измерялась с помощью четырех хромель-копелевых термопар (диаметр проводников 0,2 мм) (рис.3). Спаи двух термопар находились вблизи поперечной оси симметрии образца на расстоянии 10 мм друг от друга. Спаи двух крайних термопар находились на расстоянии 40 мм от краев образца. Каждый королек термопары был приварен к поверхности образца. Свободные концы термопар были выведены через отверстие в крышке сосуда, которое при проведении эксперимента было загерметизировано. Подвод сигнала к измерительному устройству осуществлялся с помощью удлинительных хромель-копелевых проводов. Все провода термопар были изолированы друг от друга и от жидкости с помощью полихлорвиниловых трубочек.

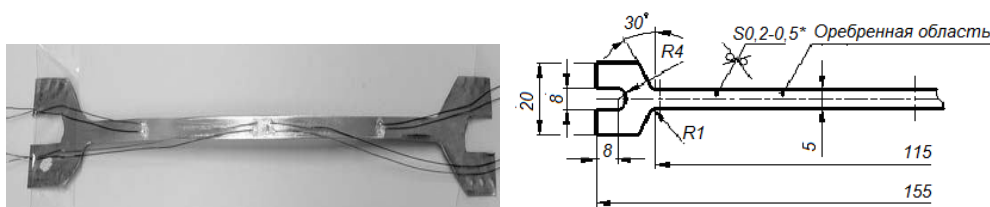


Рис.3. Геометрическая форма образца, расположение оребренной зоны и термопар

Для исключения кипения воды на гладкой (нижней, неоребренной) поверхности образца и устранения погрешностей измерения температуры, связанных с периодическим образованием паровых пузырьков в местах приварки термопар, поверхность покрывалась слоем эпоксидного клея, слоем силиконового герметика и приклеивалась к текстолитовой подложке. Слои клея и герметика также обеспечивали дополнительную прочность соединения термопар с образцом. Текстолитовая подложка толщиной 5 мм исключала повреждения и деформацию

пластин во время эксперимента и уменьшала тепловые потери с противоположной неоребренной стороны пластины.

Экспериментальные работы по исследованию интенсификации теплообмена при кипении были проведены для пятнадцати образцах – одном гладком, двух с трехмерным макрорельефом в виде сферических выемок, двенадцати с микроребрами, полученными ДР, различной геометрической конфигурации и размеров. Подобные поверхности кипения, полученные методом ДР, исследовались также в работах [18,19]. Характерные размеры интенсификаторов теплообмена при кипении представлены на рис.4 и в табл.1. Обогрев экспериментальных поверхностей кипения производится путем непосредственного пропускания тока. Геометрическая конфигурация ребренных элементов имеет особенность с точки зрения протекания тока и распространения теплоты.

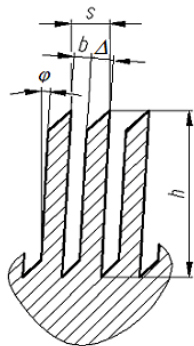


Рис.4. Размеры ребер

Таблица 1. Параметры исследованных пластин

Обозначение на рис. 6, 7, 10	Тип поверхности рис.5	Материал	Высота ребер, км	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	X18H9T	-	-	-	-	-	-	-	-
3	а	X18H9T	-	-	-	-	1	2	-	-
4	а	X18H9T	-	-	-	-	0,5	1	-	-
5	б	BT1	95	40	15	87	-	-	-	-
6	в	BT1	310	160	63	87	-	-	-	-
7	г	BT1	200	120	46	87	-	-	-	-
8	д	BT1	230	90	35	87	-	-	-	-
9	е	BT1	220	60	22	87	-	-	-	-
10	ж	AISI 1020	420	350	-	90	-	-	318	140
11	з	12X18H10T	150	160	50	90	-	-	-	-
12	и	12X18H10T	90	160	50	90	-	-	-	-
13	к	BT1-0	200	200	30-40	60	-	-	-	-
14	л	12X18H10T	200	160	50	90	-	-	-	-
15	м	AISI 1020	340	240	-	75	-	-	318	140
16	л	12X18H10T	200	160	50	90	-	-	-	-

Поверхность кипения в плане имеет форму прямоугольника, а ребра могут располагаться как вдоль длинной стороны прямоугольника, так и вдоль короткой

стороны. Поэтому электрический ток, пропускаемый в продольном направлении пластины может вызывать выделение джоулевой теплоты только в основании ребер (поперечные ребра), а также одновременно в основании ребер и собственно в ребрах (продольные ребра). То есть, ребра могут быть теплорассеивающими и тепловыделяющими. Практически все исследования кипения на ребристых поверхностях выполняются для первого (традиционного) случая. В работе в основном исследовались тепловыделяющие микроребра, т.е. двухмерные микроребра, образующие которых совпадали с направлением течения электрического тока и прогрев которых по высоте можно считать равномерным. К теплорассеивающим микроребрам здесь отнесены трехмерные ребра, т.е. прерывистые по направлению течения электрического тока по ним и распределение температур в которых характерно для ребрения.

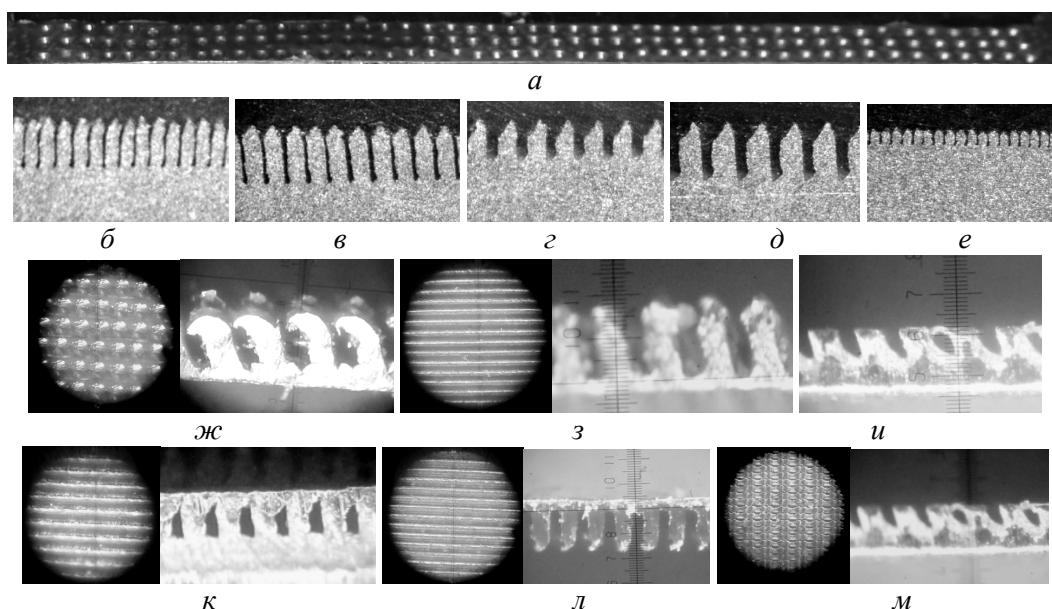


Рис.5. Внешний вид (сверху и шлифы) исследованных поверхностей кипения:
 а – трехмерная шероховатость в виде сферических выемок; б-е,з,и,л – двухмерная шероховатость в виде проводящих ребер; ж,м – трехмерная шероховатость в виде штырьковых рассеивающих ребер; к - двухмерная шероховатость в виде микроканальной структуры, образованной согнутыми проводящими ребрами

Результаты исследований

Экспериментальные данные получены для 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 97,5-99,3 °С.

В ходе экспериментов также было отмечено, что при долговременной работе экспериментальных пластин, периодическом вскипании жидкости на их поверхности происходит изменение интенсивности теплоотдачи. Идет, так называемая, «приработка» поверхности. Проведенные опыты из серии 7 вскипаний на поверхности показали, что после 4 вскипаний уровень теплоотдачи на поверхности практически постоянный. Все результаты получены на «прикипевших» пластинах.

Проведенные эксперименты показали, что применение поверхностей с рельефом, полученным с помощью метода деформирующего резания, позволяет значительно повысить интенсивность теплообмена при кипении по сравнению с гладкими образцами. Также обнаружено, что интенсивность теплообмена возрастает с уменьшением характерных размеров элементов микрорельефа.

На рис.6 и 7 показаны экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении в большом объеме воды на поверхностях с различной геометрией. Показано влияние на теплоотдачу геометрии шероховатости горизонтальных поверхностей. На рис.7 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. Из рис.6 видны результаты тестовых опытов при кипении воды 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 15%. Уровни интенсификации теплоотдачи определялись при $q = \text{idem}$ (по данным рис.6).

Наибольшая интенсификация теплоотдачи свойственна поверхностям №15 и 10. Это поверхности с трехмерной столбчатой микрошероховатостью. Интенсификация теплоотдачи от 4,5 до 9 раз в зависимости от уровня плотности теплового потока.

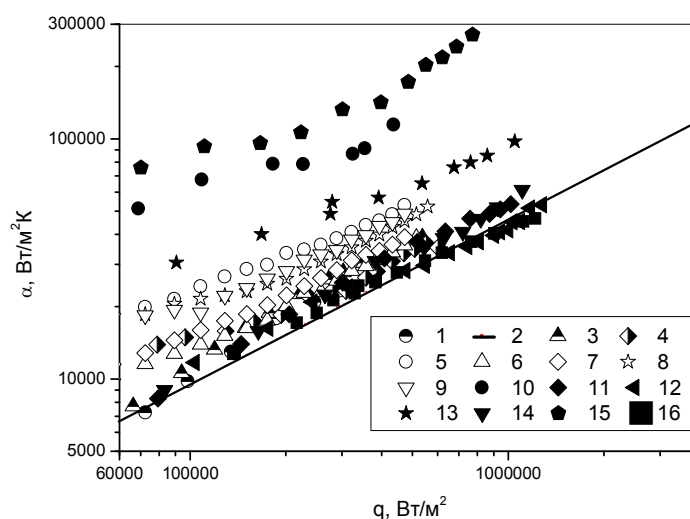


Рис.6. Теплоотдача при кипении в большом объеме воды на поверхностях с различной геометрией (обозначения в табл.1.)

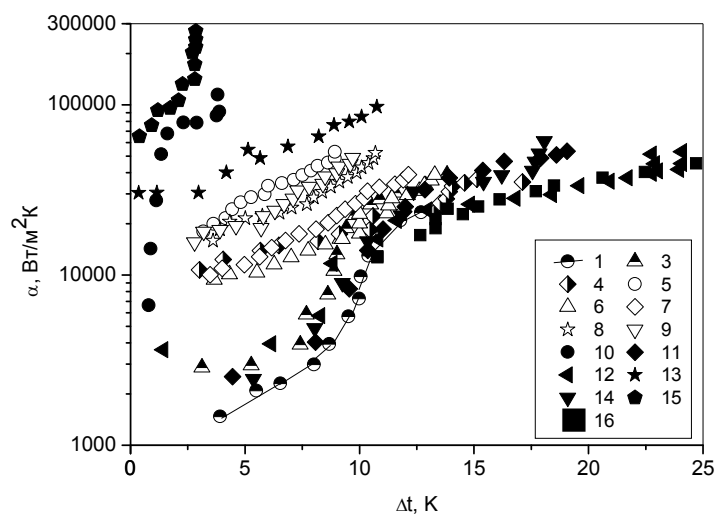


Рис.7. Интенсивность теплоотдачи при кипении в большом объеме в зависимости от разницы температуры поверхностей с различной геометрией и воды (обозначения в табл.1.)

Также высокий уровень интенсификации теплоотдачи показала поверхность №13 со сплошными ребрами, торцы которых загнуты горизонтально и образуют микроканалы. Данные поверхности близки по механизмам интенсификации к пористым покрытиям. Интенсификация теплоотдачи на подобной поверхности составила 2,5-3 раза во всем диапазоне плотности тепловых потоков.

Анализ результатов для поверхностей №5-9,11,12,14,16 с двухмерными микроребрами показал зависимость уровня интенсификации теплоотдачи от высоты микроребер, ширины зазора между микроребрами, расположения ребер и угла наклона ребер к вертикали.

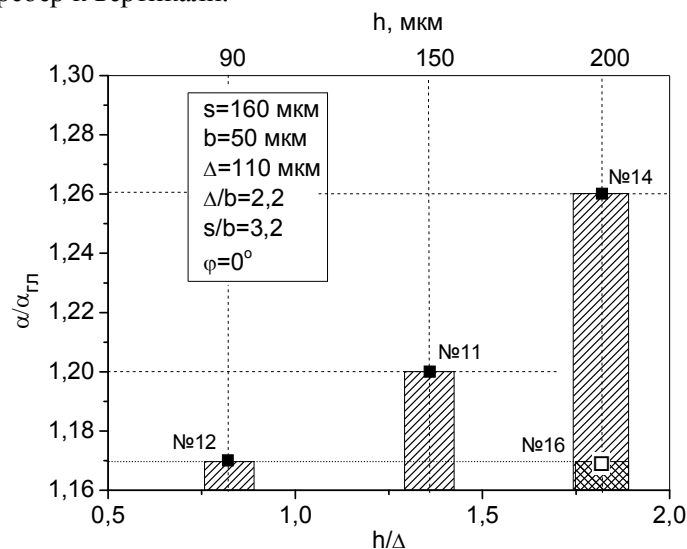


Рис.8. Влияние высоты микроребер на уровень интенсификация теплоотдачи при $q=250\text{кВт/м}^2$

Данные на рис.8 показывают, что 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 одинаковые форму и размеры микрооробрения, но на образце №14 продольные ребра – тепловыделяющие, а на образце №16 поперечные ребра - теплорассеивающие. Отмечено, что на образце №14 коэффициенты теплоотдачи обеспечивались до 30-50% 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).

Интенсификация теплоотдачи на микрооробренных поверхностях №5-9 составила от 1,2 до 2,5 раза во всем диапазоне плотностей тепловых потоков.

На основе результатов, полученных на образцах №5-9 сделана попытка проанализировать влияние ширины межреберного зазора на теплоотдачу. Для образцов №5-9 свойственно варьирование всех основных геометрических параметров. Из табл.2 видно, что 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. Однако, из табл.2 видно влияние абсолютного размера межреберного зазора b (рис.9). При увеличении зазора между ребрами (шага ребер) уменьшается уровень интенсификации теплоотдачи. Можно отметить, что увеличение интенсивности теплообмена в основном обусловлено не увеличением площади теплообмена.

Можно отметить, что увеличение угла наклона ребер к основной поверхности будет способствовать увеличению коэффициентов теплоотдачи.

Таблица 2. Анализ влияния конструктивных параметров поверхностей кипения на интенсификацию теплоотдачи при $q=250 \text{ кВт/м}^2$

Прирост теплоотдачи $\alpha/\alpha_{\text{гл}}$	№ поверхности	Толщина ребра Δ , мкм	Межреберный зазор b , мкм	Высота ребра h , мкм	Угол наклона ребра φ , °	Относительная высота ребер h/Δ	Относительная ширина межреберного зазора b/h	Относительная ширина ребра Δ/b	Увеличение площади теплообмена $F/F_{\text{гл}}$
2,02	5	25	15	95	3	3,8	0,16	1,67	5,75
1,84	9	38	22	220	3	5,8	0,10	1,72	8,33
1,72	8	55	35	230	3	4,2	0,15	1,57	6,11
1,47	7	74	46	200	3	2,7	0,23	1,61	4,33
1,28	6	97	63	310	3	3,2	0,20	1,54	4,87

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.

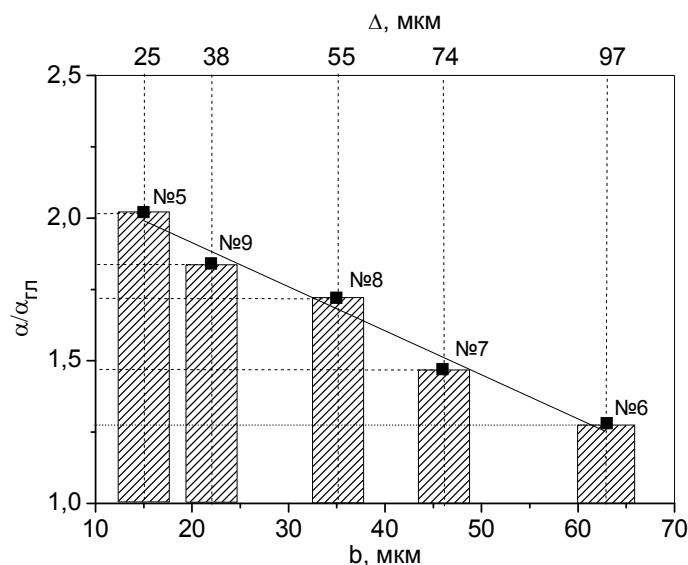


Рис.9. Влияние ширины межреберного зазора на уровень интенсификация теплоотдачи (а) при $q=250\text{кВт/м}^2$

Полученные в работе данные позволяют обосновать оптимальные условия использования данных интенсификаторов и механизмы интенсификации теплообмена.

В ходе проведения эксперимента производилась видеосъемка процесса кипения на образцах. Ниже приводятся фотографии (табл.3) развития процесса кипения на образцах №1,3 и 9. Каждая фотография соответствует экспериментальной точке на графиках. На фотографиях указывается значение плотности теплового потока.

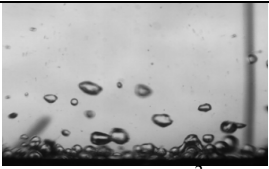
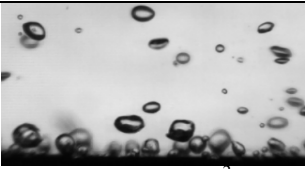
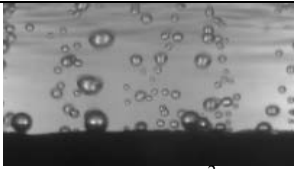
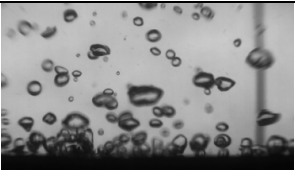
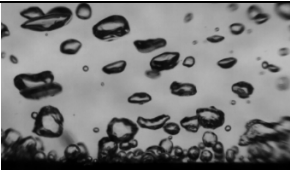
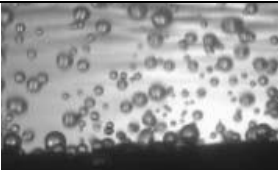
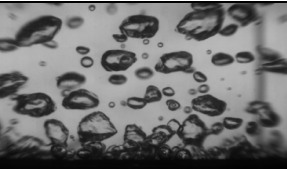
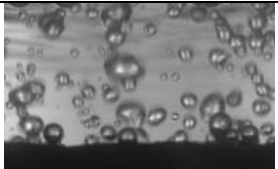
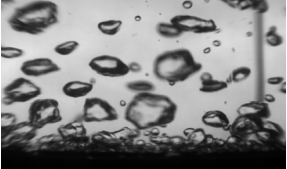
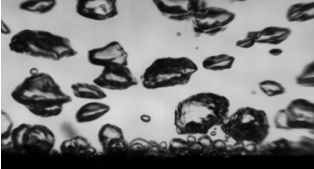
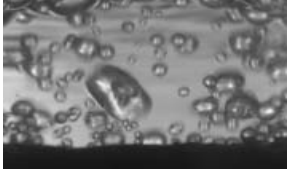
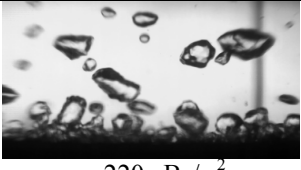
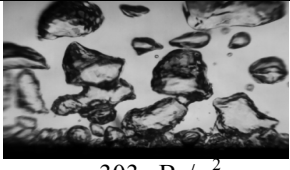
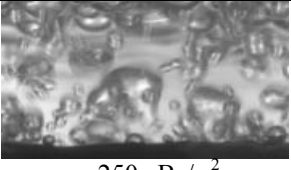
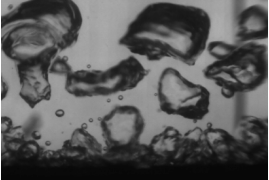
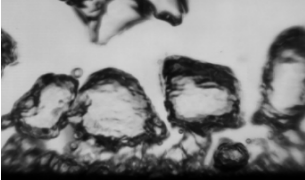

Из анализа визуализации процесса кипения установлено, что на поверхностях №5-15 пузырьковое кипение наступает при меньших температурных напорах. При этом увеличивается количество центров парообразования, уменьшаются диаметры пузырька в момент отрыва и увеличивается частота отрыва пузырьков. Особенно это отмечается на поверхностях №10,13,15. Для данных поверхностей происходит резкое уменьшение диаметра отрывного пузырька и увеличение частоты отрыва пузырьков.

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.10).

Минимальное увеличение критических тепловых потоков показано поверхностями №3 и 4 с макрошероховатости в виде систем сферических выемок – до 2 раз.

Таблица 3. Фотографии интенсивности образования пузырьков при кипении на различных теплообменных поверхностях

Кипение на гладкой поверхности №1	Кипение на поверхности с выемками №3	Кипение на поверхности с микрооребрением №9
 q=39 кВт/м ²	 q=24,7 кВт/м ²	 q=20 кВт/м ²
 q=62,4 кВт/м ²	 q=75 кВт/м ²	 q=75 кВт/м ²
 q=113 кВт/м ²	-	 q=100 кВт/м ²
 q=154 кВт/м ²	 q=164 кВт/м ²	 q=175 кВт/м ²
 q=220 кВт/м ²	 q=303 кВт/м ²	 q=250 кВт/м ²
 q=398 кВт/м ²	 q=450 кВт/м ²	 q=450 кВт/м ²

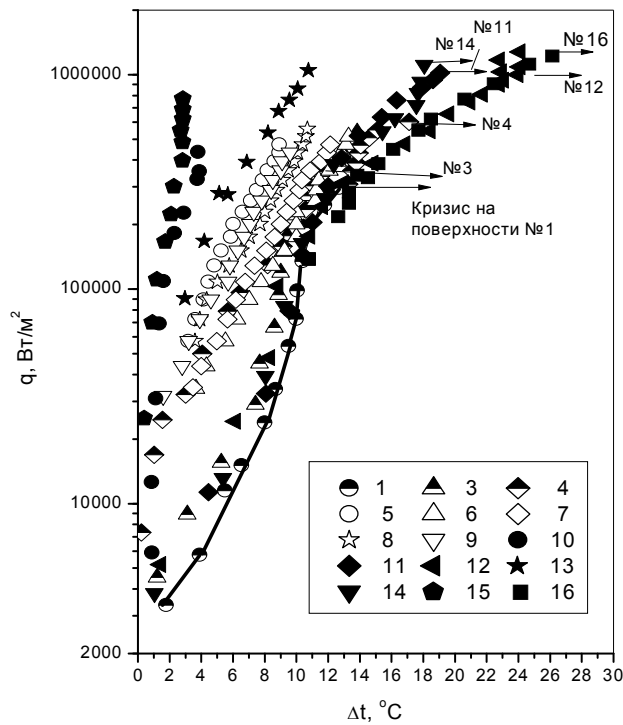


Рис.10. Тепловые потоки при кипении воды на поверхностях различной конфигурации. Обозначения в табл.1.

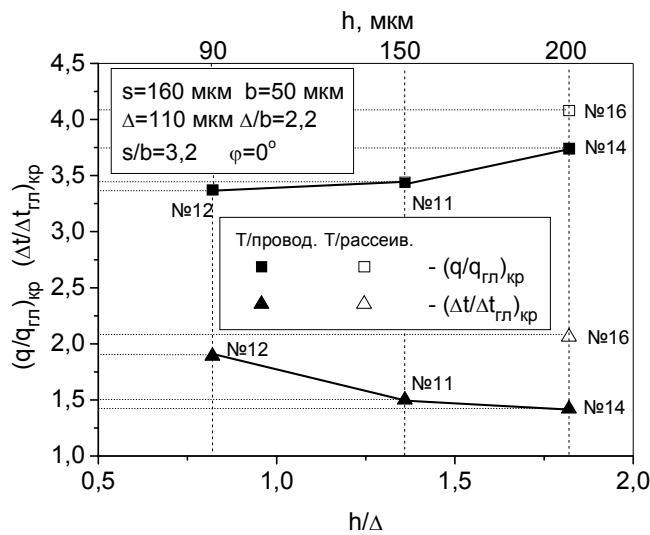


Рис.11. Влияние высоты микрорёбер на критические тепловые потоки

Для поверхностей №11-12,14,16 с микрошероховатостью в виде двухмерных микрорёбер увеличение критических тепловых потоков составило от 3,3 до 4,1 раз. На рис.11 показано, что 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 №10,13,15 не удалось.

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 (рис.12).

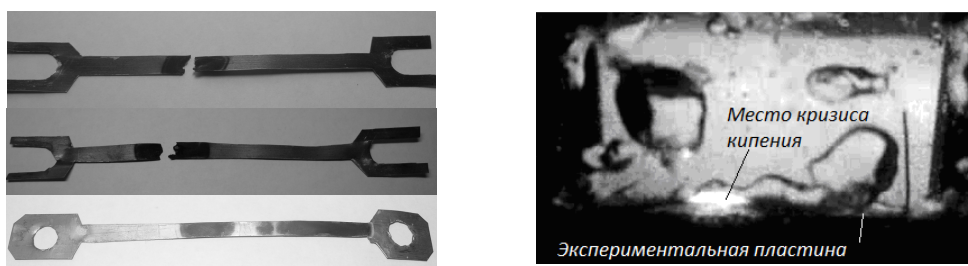


Рис.12. Экспериментальные пластины после кризиса кипения и фотография кризиса кипения, наблюдаемого в ходе эксперимента

Физические основы интенсификации теплообмена при кипении на микроструктурированных поверхностях

Интенсификация теплоотдачи при кипении на микроструктурированных поверхностях имеет значительное значение для промышленного применения и позволяет существенно уменьшить размеры систем охлаждения и теплообменного оборудования [20]. Интенсифицированные поверхности для пузырькового кипения обладают рядом несомненных преимуществ. Например, интенсификация теплоотдачи на низкорезистивных трубах по сравнению с гладкой трубой достигает от 2 до 4 раз и на трубах с пористым покрытием или деформированными ребрами малой высоты - в 10 и более раз по сравнению с гладкой трубой. Наибольшие увеличения коэффициентов теплоотдачи присущи для умеренных плотностей теплового потока. Важными параметрами, присущими для интенсификации теплоотдачи на исследованных поверхностях и важных для практического использования являются увеличение критических тепловых потоков и уменьшение уровня перегрева, необходимого для начала пузырькового кипения.

Полученные положительные эффекты не могут быть полностью приписаны только развитию поверхности теплообмена. Парообразование происходит как на внешней поверхности интенсифицированной поверхности, так и в порах или полужакрытых каналах. Следовательно, есть четыре возможных пути отвода теплоты от описанных интенсифицированных поверхностей нагрева: 1. в виде

скрытой теплоты парообразования в паровых пузырьках, сформированных в пределах полузакрытых каналов пористых покрытий или деформированных выступов; 2. в виде скрытой теплоты парообразования в пузырьках пара, которые вытесняются из пор и полузакрытых каналов и «растут» на внешней стороне покрытий и выступов; 3. в виде теплосодержания жидкости, проходящей сквозь поры и полузакрытые каналы; 4. в виде теплосодержания жидкости, нагреваемой на внешней поверхности выступов и пористых покрытий. Эффективность перечисленных факторов зависит от типа геометрии интенсифицированной поверхности и ее определяющих размеров.

При низких тепловых потоках жидкость полностью занимает все межреберные пространства, часть которых, в последствие, становятся активными отдельными центрами парообразования. При росте тепловых потоков паровые пузырьки образуются в межреберном пространстве в активных центрах парообразования. Между центрами парообразования жидкость «всасывается» в межреберное пространство за счет капиллярного эффекта и распространяется по межреберным пространствам, поступая к активным центрам парообразования. При дальнейшем увеличении тепловых потоков пар полностью заполняет межреберное пространство и рост паровых пузырьков осуществляется на верхних площадках ребер, т.е. ребра «пронизывают» паровой слой.

Заключение

В ходе проведения исследования показано, что теплообменные поверхности, полученные новым ресурсосберегающим методом формирования поверхностей, в виде двух- и трехмерных микроорребренных поверхностей и канальных структур позволяют существенно повышать теплоотдачу и критические тепловые потоки при кипении жидкостей. Наибольшая интенсификация теплоотдачи свойственная поверхностям с трехмерными столбчатыми и канальными структурами - с 3 до 9 раз. Для двухмерных микроребер интенсификация теплообмена составляет до 2,5 раз. При этом уменьшение межреберного расстояния и увеличение угла наклона увеличивают интенсивность теплообмена. Увеличение критической плотности теплового потока составило 4,1 раз.

Поступила 19.01.2012г.

Литература

1. Xin M. D., Chao Y. D., Analysis and Experiment of Boiling Heat Transfer on T-Shaped Finned Surfaces // Chem. Eng. Comm. – 1987 – vol.50 – pp.185-199.
2. Ayub Z.H., Bergles A.E. Pool Boiling from GEWA Surfaces in Water and R-113 // Wärme- und Stoffübertragung – 1987 – vol.21 – pp. 209-219.
3. Wang D.Y., Cheng J.G., Zhang H.J., Pool Boiling Heat Transfer from T - finned Tubes at Atmospheric and Super - atmospheric Pressures // ASME-HTD, Phase Change Heat Transfer – New York, ASME – vol. 159 – 1991 – pp.143-147.
4. Nakayama W., Daikoku T., Kuwahara H., Nakajima T., Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces, Part I: Experimental Investigation // J. Heat Transfer – 1980 – vol.102 – pp.445-450.

5. Nakayama W., Daikoku T., Kuwahara H., Nakajima T., Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces, Part II: Analytical Modeling // *J. Heat Transfer* – 1980 – vol.102 – pp.451-456.
6. Webb R.L., Haider I., An Analytical Model for Nucleate Boiling on Enhanced Surfaces // *ASME-HTD, Pool and External Boiling* – New York, ASME – 1992 – pp.345-360.
7. Chien L.-H., Webb R.L., A Nucleate Boiling Model for Structured Enhanced Surfaces // *Int. J. Heat Mass Transfer* – 1998 – vol.41 – pp.2183-2195.
8. Jakob M. and Fritz W. Versuche über den verdampfungsvorgang. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 1931, vol.2, pp.435-447.
9. Jakob M. Heat Transfer. – New York: Wiley, 1949.
10. Corty C., and Foust A.S. Surface Variables in Nucleate Boiling // *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.* – 1953 – Vol.51 – No.17 – pp.1-12.
11. Bergles, A. E. Techniques to Enhance Heat Transfer, in *Handbook of Heat Transfer / Rohsenow W. M., Hartnett, J. P., and Cho, Y. I., eds.* 3rd ed. – New York: McGraw-Hill – 1998.
12. Thome, J.R. Enhanced Boiling Heat Transfer – New York: Hemisphere Publishing – 1990.
13. Yilmaz, S., Hwalck, J. J., and Westwater, J.W. Pool Boiling Heat Transfer Performance for Commercial Enhanced Tube Surfaces // *ASME-80-HT-41* – New York: ASME – 1980.
14. Yilmaz, S., and Westwater, J. W. Effect of Commercial Enhanced Surfaces on the Boiling Heat Transfer Curve // *ASME-HTD-18* – New York, ASME – 1981 – pp. 73–92.
15. Mitrovic J. How it create an efficient surface for nucleate boiling? // *Intern. J. of Thermal Sciences* – 2006 – №45 – p.1-15.
16. Li C., Wang Z., Wang P.-I., Peles Y., Koratkar N. and Peterson G.P. Nanostructured Copper Interfaces for Enhanced Boiling // *J. Small* – 2008 – vol.4 – №8 – p.1084–1088.
17. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Кононов О.В. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием // *Вестник МГТУ* – 1993 - №4 – С.79-82.
18. Морской Д.Н. Процессы кипения на поверхностях, полученных методом деформационного резания // *Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, 22-25 сентября 2010 г.* – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010 – С. 163-164.
19. Морской Д.Н., Якомаскин А.А. Двухфазные термосифоны на основе улучшенных поверхностей кипения // *Сборник тезисов докладов участников общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая научная весна - 2011», посвященная 50-летию полёта Ю.А. Гагарина в космос. 4-30 апреля 2011 г.* – Том XI, часть 3 – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011 – С. 197-198.
20. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: *Интенсификация теплообмена* – Казань: Центр инновационных технологий, 2009 – 560 с.