

Каськов Сергей Иосифович

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ДЕФОРМИРУЮЩИМ РЕЗАНИЕМ**

Специальность 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва-2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Рыжков Сергей Витальевич**
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры теплофизики ФГАОУ ВО
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)»

Официальные оппоненты: **Павленко Александр Николаевич**
доктор физико-математических наук, с.н.с., член-
корреспондент РАН, заведующий лабораторией
низкотемпературной теплофизики ФГБУН
«Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения РАН»
Дедов Алексей Викторович
доктор технических наук, профессор, член-
корреспондент РАН, заведующий кафедрой «Общая
физика и ядерный синтез» ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

Защита диссертации состоится « 16 » июня 2026 г. в 14.00 часов
на заседании диссертационного совета 24.2.331.17 при МГТУ им. Н.Э. Баумана
по адресу: 105005, г. Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, УЛК, ауд. 947л.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю
диссертационного совета 24.2.331.17, также просим отправлять электронные
копии отзывов на электронную почту kharit@bmstu.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., доцент



Харитонов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Теплопередача при кипении определяет эффективную и безопасную работу промышленных теплообменных аппаратов, основанных на фазовых переходах. Такие теплообменники широко применяются в топливно-энергетическом комплексе и различных отраслях промышленности, включая парогенераторы тепловых, атомных и геотермальных станций, испарители выпарных установок для концентрирования растворов и опреснения морской воды, агрегаты для сжижения природного газа и его регазификации, чиллеры и кондиционеры промышленных и общественных зданий, иммерсионное охлаждение серверов в дата центрах. Практичность, надёжность и экономичность - главное преимущество пассивного метода для интенсификации кипения по сравнению с активным, особенно при модификации теплопередающей поверхности. Совершенствование поверхностей кипения позволяет снизить массогабаритные характеристики теплообменников, изготавливаемые из дорогостоящих цветных металлов, а разработка новых высокоэффективных поверхностных структур и их оптимизация имеет решающее значение для обеспечения безопасности и эффективной работы теплообменных установок.

Среди широкого спектра способов модификации теплопередающих поверхностей, которые применяются в устройствах с изменением агрегатного состояния теплоносителей, таких как, плазменное напыление порошкового покрытия, лазерное, электронно-лучевое и плазменное структурирование, можно выделить разработанную в МГТУ им. Н.Э. Баумана технологию лезвийно-деформирующей обработки металлов реализованную в методе деформирующего резания (ДР). Принцип технологии заключается в подрезании поверхностного слоя заготовки и его последующем деформировании, при этом подрезанный слой остается прикрепленным к заготовке по своей узкой стороне. Это позволяет формировать поверхности с различными микроструктурами, в том числе двухмерными (микрооребрение), трехмерными (штырьковыми), с подповерхностными микроканалами (подповерхностные полости) в широком диапазоне определяющих геометрических параметров. В зависимости от формы, типа и размера рельефа, при кипении в условиях свободной конвекции (в большом объеме) изменяются механизмы интенсификации теплоотдачи, связанные как с увеличением площади поверхности, изменения ее смачиваемости и роста числа центров парообразования.

Степень разработанности темы. Изменение агрегатного состояния вещества в системе «жидкость-пар» как высокоинтенсивный процесс теплообмена на модифицированных поверхностях кипения исследовался как отечественными учеными, так и их зарубежными коллегами. Большой вклад внесли Боришанский В.М., Володин О.А., Гоголин А.А., Гогонин И.И., Гортышов Ю.Ф., Данилова Г.Н., Дедов А.В., Диев М.Д., Зейгарник Ю.А., Кузма-Кичта Ю.А, Кутателадзе С.С., Лабунцов Д.А., Овсянник А.В., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Попов И.А., Присняков В.Ф., Щелчков А.В., Ягов В.В., Бергис

А.Е., Вэбб Р., Пасос Дж.К., Мин Д.Х., Кандликар С.Г., Чен Л.Х., Мехт Дж.С., Патил К.М., Дас А.К. и многие другие.

К микроструктурированным теплообменным поверхностям относятся поверхности с микромасштабной структурой, сопоставимой по размерам с шероховатостью, полученные механической обработкой или за счет нанесения покрытий. При однофазном теплообмене эффект от микроструктурирования незначителен, однако широко используется для интенсификации процессов кипения, при этом геометрические характеристики структуры поверхностного слоя существенно влияют на интенсификацию процесса кипения.

Информационный обзор показывает, что важной тенденцией развития исследований при кипении в различных гидродинамических условиях является изучение влияния различных вариантов микро-наноструктурирования теплообменной поверхности на интенсификацию процесса. Модифицированные поверхности дают возможность существенно интенсифицировать режим пузырькового кипения, как в условиях вынужденной, свободной конвекции и пленочного течения. При кипении в большом объеме увеличение коэффициентов теплоотдачи достигает до 7 раз, а значений критических тепловых потоков, как идентификаторов начала кризиса кипения до 6 раз. Отмечается отсутствие универсального подхода и методик расчета интенсифицированного теплообмена для микроструктурированных поверхностей, в то время как особенности микроструктуры и ее геометрических параметров оказывают существенное влияние на теплообмен при кипении. Недостаточность исследований процессов кипения на различных микроструктурированных поверхностях подтверждает необходимость теоретического и экспериментального исследования, направленного на поиск оптимальных характеристик модифицированных поверхностей, приводящих к наибольшей интенсивности теплообмена при кипении и повышению уровня критических тепловых потоков.

Объект исследования – кипение воды в условиях свободной конвекции на микроструктурированных поверхностях, получаемых деформирующим резанием.

Предмет исследования – определение влияния структурных и геометрических параметров теплообменной поверхности на коэффициент теплоотдачи и критические тепловые потоки.

Цель работы – повышение коэффициентов теплоотдачи и значений критических тепловых потоков при кипении воды в условиях свободной конвекции.

Задачи исследования:

1. Провести экспериментальное исследование и оценить интенсификацию теплоотдачи при кипении воды в условиях свободной конвекции на микроструктурированных поверхностях с двух-, трехмерным рельефом и с подповерхностными микроканалами.

2. Выявить влияние режимных и геометрических параметров на значение коэффициента теплоотдачи при кипении воды на микроструктурированных поверхностях с двух-, трехмерным рельефом и с подповерхностными микроканалами. Получить эмпирические зависимости для оценки влияния данных параметров на коэффициенты теплоотдачи.

3. Провести экспериментальное исследование и определить значения критических тепловых потоков при кипении воды в условиях свободной конвекции на микроструктурированных поверхностях с двух-, трехмерным рельефом и с подповерхностными микроканалами.

4. Определить влияние режимных и геометрических параметров на величины критических тепловых потоков при кипении воды на микроструктурированных поверхностях с двух-, трехмерным рельефом и с подповерхностными микроканалами. Получить эмпирические зависимости для оценки влияния данных параметров на критические тепловые потоки.

Научная новизна.

1. Получены новые экспериментальные данные по значениям коэффициентов теплоотдачи и критическим тепловым потокам при кипении воды в условиях свободной конвекции при атмосферном давлении на микроструктурированных поверхностях с подповерхностными микроканалами, полученные деформирующим резанием.

2. Получены зависимости для оценки коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении воды в условиях свободной конвекции при атмосферном давлении на микроструктурированных поверхностях с подповерхностными микроканалами. Данные зависимости позволяют производить обобщение значений КТО и КТП в пределах $\pm 30 \%$ при доверительной вероятности 0,95.

3. Экспериментально подтверждены расчетные зависимости для оценки коэффициентов теплоотдачи на микроструктурированных поверхностях с двух- и трехмерными рельефами.

4. Выявлено влияние геометрических параметров микроструктуры, особенностей рельефа и смачиваемости исследованных поверхностей на теплообмен при кипении.

Теоретическая значимость:

На основе исследования процесса кипения воды на поверхностях нового типа выявлены особенности механизма интенсификации теплообмена и влияние, как геометрических параметров структуры, так и особенностей рельефа на теплообменный процесс при изменении агрегатного состояния вещества. Расширены представления об управляющих механизмах поверхностной интенсификации теплоотдачи при кипении воды в условиях свободной конвекции.

Практическая значимость.

Использование поверхностей, изготовленных деформирующим резанием, позволяет повысить эффективность теплообменных аппаратов испарительного типа и/или снизить их металлоемкость при сокращении габаритов.

Накопленный экспериментальный материал и установленные расчетные соотношения по оценке теплообмена при кипении в зависимости от геометрических параметров микроструктурированных поверхностей актуальны для разработки теплопередающих поверхностей с целью повышения значений коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков при создании парогенераторных и выпарных установок,

термосифонов и другого оборудования, использующего процессы кипения.

Основные результаты диссертационной работы использованы при разработке перспективных научно-технических решений по созданию компактного теплообменного оборудования при выполнении Госконтракта № 12411.1007499.09.214, номер госрегистрации: 01201282499.

Методология и методы исследования.

При получении аналитических и графических зависимостей для расчета значений коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков, тепловых нагрузок и температурных напоров при парообразовании на микроструктурированных поверхностях в режиме развитого пузырькового кипения и при кризисе кипения, в основу методологии положены теоретические и экспериментальные методы исследования процесса переноса теплоты. Обработка и обобщение экспериментальных данных основана на методе получения расчетных зависимостей в критериальном и размерном виде.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование микроструктурированных поверхностей с подповерхностными микроканалами, является эффективным способом интенсификации теплообмена при кипении воды в условиях свободной конвекции.
2. Полученные зависимости при обобщении результатов экспериментальных данных для микроструктурированных поверхностей позволяют определить увеличение значений коэффициента теплоотдачи и критических тепловых потоков по сравнению с гладкой поверхностью в пределах $\pm 30 \%$ при доверительной вероятности 0,95.
3. Поверхности с трехмерным рельефом имеют значения критических тепловых потоков на 25 % выше, чем на поверхностях с подповерхностными микроканалами и двухмерным рельефом.

Достоверность. Достоверность результатов подтверждается современными методами диагностики, сертифицированным оборудованием, оценкой неопределенности измерений, сопоставлением с данными других исследований, соответствием теории тепломассообмена и воспроизводимостью экспериментальных результатов.

Личный вклад автора состоит в выполнении всех этапов диссертационного исследования. Постановка цели и определение задач сформулированы автором совместно с руководителем. Осуществлено внедрение результатов исследования в практику разработки перспективных научно-технических решений по созданию компактного теплообменного оборудования в рамках Госконтракта, руководимым автором. Разработаны технические требования на рабочий диапазон значений определяющих геометрических параметров микроструктурированных поверхностей, которые были изготовлены и представлены научной группой деформирующего резания под руководством профессора кафедры инструментальной техника и технологии д.т.н. Зубкова Н.Н.

Апробация результатов.

Результаты исследования докладывались и обсуждались на РНКТ-5, РНКТ-6 (Москва, 2010, 2014), VIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под рук-вом акад. РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена в энергомашиностроении» (Казань, 2012), 14 Международном Минском форуме по теплообмену (Минск, Беларусь, 2012), XIX школе-семинаре молодых ученых и специалистов под рук-вом акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Орехово-Зуево, 2013), 5-ой Международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Казань, 2015), 9-ой Международной теплофизической школе (Таджикистан, 2014), Thermal and Fluids Engineering Summer Conference (New York, USA, 2015), III Международной конференции «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (Казань, 2022), X Международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Архангельск, 2025), III Всероссийском конгрессе «Русский инженер» (Москва, 2025).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 6 статьях рецензируемых изданий, входящих в перечень ВАК РФ, 3 публикаций в журналах, индексируемых Scopus, 10 выступлений и докладов на конференциях и одного патента.

Объем и структура диссертационной работы: Общий объем работы 139 страницы, 129 стр. основного текста. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы в кол-ве 137 наименований и одного приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проводимых в диссертационной работе исследований, формулируется цель, определяются основные задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость полученных результатов, перечисляются основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации результатов работы и основных публикациях.

Первая глава содержит обзор литературы и анализ современного состояния исследований теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении на микроструктурированных поверхностях.

Методы и способы интенсификации теплообмена при кипении традиционны: увеличение плотности центров парообразования, управление смачиваемостью поверхностей, повышение притока жидкости в зону испарения микрослоя, увеличение теплообменной поверхности. Большинство работ по интенсификации теплоотдачи сосредоточено на поиске и применении новых технологий структурирования поверхности. В обзоре представлены результаты работ по повышению коэффициентов теплоотдачи при кипении за счет структурирования поверхности, с помощью различных технологических способов. Согласно работам М. Якоба, У. Фрица, К. Корти, А.С. Фауста, С.Г. Кандликера, М.А. Кедзиерского, А.В. Дедова, Ю.А. Кузьма-Кичты, А.Н. Павленко, И.А. Попова, В.В. Ягова, А.Е. Берглса, Дж. Р. Тома, Р. Уебба,

С. Йилмаза, Пасос Дж. К. и многих других, проведенному информационному обзору, установлено, что использование микроструктурированных поверхностей является эффективным способом интенсификации теплоотдачи при кипении в условиях свободной конвекции. Сконцентрировано внимание на поверхностях, полученных технологией лезвийно-деформирующей обработки металлов – методом деформирующего резания. Показаны возможности создания микроструктурированных поверхностей с двух-, трехмерными рельефами и подповерхностными микроканалами.

Результаты исследования теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении различных жидкостей: воды, этанола, водных растворов глицерина, фреонов, азота, ацетона, хладона NOVEC, n-гексана на модифицированных поверхностях представленные в обзорах и работах Даниловой Г.Н., Дедова А.В., Павленко А.Н., Полежаева Ю.М., Попова И.А. подтвердили интенсификацию теплоотдачи до 7 раз, с имеющимися отдельными сведениями до 9 раз, а повышение критических тепловых потоков до 6 раз.

Несмотря на большое количество и увеличивающийся рост новых работ по исследованию теплоотдачи при кипении жидкостей на микроструктурированных поверхностях, в настоящее время мало надежных расчетных рекомендаций для оценки коэффициентов теплоотдачи на данных поверхностях, в том числе с подповерхностными каналами.

Приведен обзор моделей кипения на микроструктурированных поверхностях Тома Дж. Р., Накаямы, Ксина и других, наиболее близко описывающих процессы на исследуемых поверхностях. Однако, несмотря на множество гипотез развития кипения жидкостей на микроструктурированных поверхностях, отсутствует единая модель кипения, учитывающая параметры микроструктур, смачиваемость поверхности, свойства жидкостей, образования и развития пузырьков пара в условиях свободной конвекции.

Во второй главе описан метод исследования, экспериментальный стенд и методика проведения эксперимента, предмет исследования, методика обработки и обобщения экспериментальных данных, результаты тестовых экспериментов на гладкой поверхности с последующим сравнением с имеющимися зависимостями из литературных источников. Дано описание микроструктурированных поверхностей, представлен характерный вид и поперечные срезы экспериментальных образцов, показан их рельеф и приведены значения определяющих геометрических параметров.

В качестве рабочей жидкости использовалась бидистиллированная вода. Режимные параметры кипения: атмосферное давление (10^5 Па), температура насыщения ($T_s=100$ °С). Материал образцов нержавеющей сталь: 12X18H10T, AISI1020 и 316L, титан BT1-00. Исследования проведены на 24 поверхностях имеющих различную микроструктуру:

1) микроструктурированные поверхности кипения с двухмерным рельефом: продольные микроребра различной толщины и формы, с разными углами наклона к основной поверхности (Рис.1).

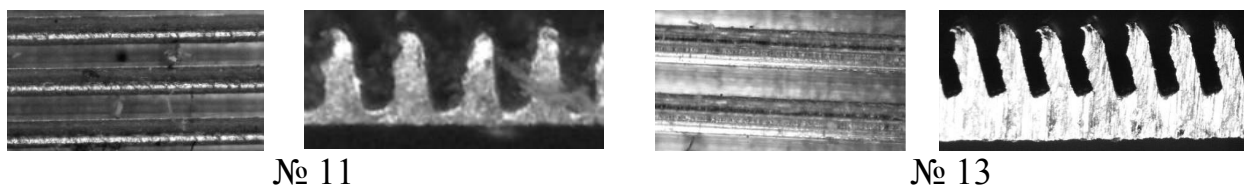


Рис. 1. Характерный вид сверху и поперечный срез образцов поверхностей кипения с двухмерным рельефом. Обозначения и параметры образцов представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Характеристики микроструктурированных поверхностей кипения с двухмерным рельефом (микроореберение)

№ образца	Материал поверхности	h, мкм	Δ , мкм	δ , мкм	θ , °	Схема микроструктуры поверхности кипения
1	BT1-00	95	15	15	87	
2	BT1-00	310	63	97	87	
3	BT1-00	200	46	74	87	
4	BT1-00	230	35	55	87	
5	BT1-00	220	22	38	87	
6	12X18H10T	150	50	110	90	
7	12X18H10T	90	50	110	90	
8	BT1-00	200	50	110	90	
9	12X18H10T	200	50	110	90	
10	BT1-00	300	110	140	90	
11	BT1-00	360	85	115	90	
12	316L	500	200	200	80	
13	316L	500	200	200	80	

2) микроструктурированные поверхности с трехмерными рельефами: микроштырьки (микрошипы) переменной толщины и формы, с различными углами наклона к основной поверхности (Рис.2);

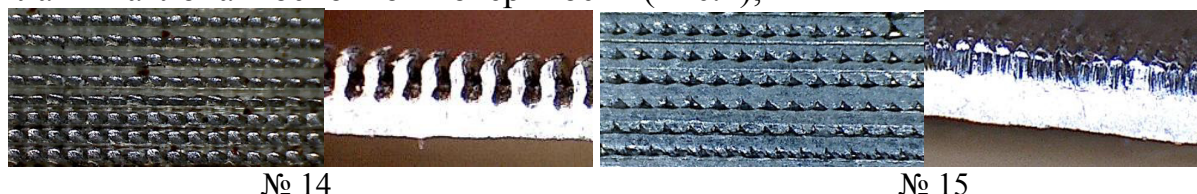


Рис. 2. Характерный вид сверху и поперечный срез образцов поверхностей кипения с трехмерным рельефом. Обозначения и параметры образцов представлены в Табл. 2.

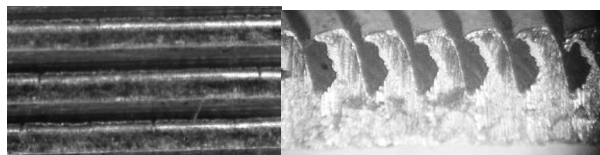
Таблица 2. Характеристики микроструктурированных поверхностей кипения с трехмерным рельефом

№ образца	Материал поверхности	h, мкм	Δ , мкм	δ , мкм	u, мкм	s, мкм	θ , °	Схема микроструктуры поверхности кипения
14	AISI1020	420	350	145	120	200	70	
15	AISI1020	570	350	140	180	140	80	
16	AISI1020	480	240	105	120	200	70	
17	316L	400	400	200	300	300	80	
18	316L	400	400	200	300	300	83	

3) микроструктурированные поверхности с подповерхностными микроканалами (Рис.3).



№ 20



№ 24

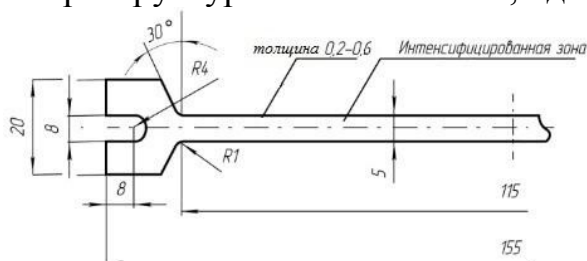
Рис. 3. Характерный вид сверху и поперечный срез образцов с подповерхностными микроканалами. Обозначение и параметры образцов представлены в Табл. 3.

Таблица 3. Характеристики микроструктурированных поверхностей кипения с подповерхностными микроканалами

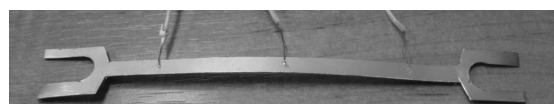
№ образца	Материал поверхности	h, мкм	Δ , мкм	δ , мкм	k, мкм	θ , °	Схема микроструктуры поверхности кипения
19	316L	300	44	26	10	85	
20	BT1-00	360	85	115	15	65	
21	BT1-00	200	35	65	10	83	
22	316L	300	5	95	5	90	
23	316L	350	5	75	5	90	
24	BT1-00	200	40	160	10	60	

Обозначение определяющих параметров для различных рельефов: h – высота элементов микроструктуры (микроребер, микроштырьков); Δ – средняя ширина зазора между элементами микроструктуры; δ – средняя толщина элемента микроструктуры (микроребра, микроштырьки); θ – угол наклона элементов микроструктуры к горизонтальной поверхности образца; k – ширина устья между элементами микроструктур. u – поперечный зазор между двумя соседними штырьками одного ряда; s – продольная ширина одного штырька.

Исследования проводились на образцах, которые имели толщину от 0,2 до 0,6 мм, длину рабочей части (оребренной) 115 мм и ширину от 5 до 10 мм. Геометрическая форма образца, расположение оребренной зоны и термопар показаны на Рис. 4. Увеличение поверхности $F_{mc}/F_{гл}$ за счет создания микроструктуры составило от 2,1 до 9,6.



а)



б)

Рис. 4. Геометрическая форма экспериментального образца с интенсифицированной зоны (а), расположение термопар (б).

Для контроля температуры термопары располагались как со стороны, контактирующей с водой (три термопары в межреберных пространствах за

счет зачеканки в поверхность), так и три термопары со стороны теплоизолирующего слоя (контактная сварка). Визуальный контроль и фото-видеофиксация процесса кипения осуществлялись через смотровое окно. Нагрев образцов осуществлялся пропусканием тока с измерением потребляемой мощности. Ширина и толщина рабочего участка образца были выбраны из условия получения необходимых тепловых потоков на поверхности теплообмена.

Экспериментальные исследования выполнялись на установке, схема которой представлена на Рис. 5. Установка представляет собой теплоизолированную емкость 1 размером 250х150х200 мм, заполняемую водой.

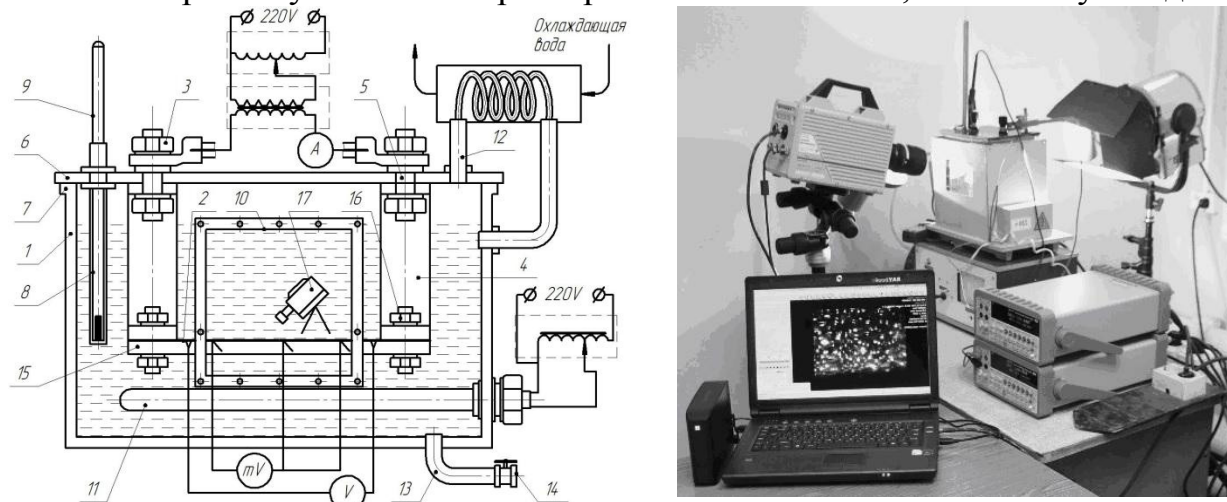


Рис. 5. Схема рабочего участка и фотография экспериментальной установки:

1 - емкость, 2 - рабочая поверхность, 3, 5, 16 - крепление, 4 - токоподводы, 6 - крышка емкости, 7 - уплотняющий бурт, 8, 9 – термометр с гильзой, 10 - смотровые окна, 11 - ТЭН, 12 - штуцер, 13 - сливной патрубкок, 14 - вентиль, 15 - текстолитовая пластина, 17 - устройство фото-видеофиксации

Внутри емкости 1 находится текстолитовая пластина 15, размером 155х30х6 мм, на которой устанавливаются образцы 2 рабочих поверхностей. Под образцами, для исключения попадания жидкости и повышения теплоизоляции, наносится слой герметика. Для оценки тепловых потерь температура текстолитовой пластины со стороны воды измерялась хромель-капельевой термопарой. Напряжение на образец подается от клемм 3 через медные плоские контакты 4 толщиной 3 мм и шириной 20 мм к пластине 2. Электрические контакты закреплены с помощью резьбового соединения 5 на электроизолирующей крышке 6. На крышке имеется уплотняющий бурт 7. При проведении эксперимента ртутный термометр 9 устанавливается в гильзу 8 так, чтобы ртутный резервуар находился на одной глубине с экспериментальной пластиной 2, с целью определения и контроля температуры теплоносителя непосредственно в зоне расположения пластины. Наблюдение за процессом кипения производится через два смотровых окна 10. Подогрев теплоносителя до температуры насыщения осуществляется с помощью регулируемого ТЭНа 11. Пары кипящего теплоносителя охлаждаются в змеевиковом конденсаторе,

проточной водой. Конденсатор соединяется с полостью камеры 1 через штуцер 12, после чего конденсат из выхода змеевика стекает обратно в экспериментальную камеру. Заполнение и опорожнение емкости теплоносителем осуществлялось через сливной патрубок 13, который перекрывается вентилем 14. Измеряемые показатели выводятся на специализированное устройство сбора и обработки информации компании National Instruments.

Для результатов исследований использовались данные приработанных поверхностей, прошедших кипячение в условиях умеренных тепловых нагрузок в течение 24 часов. Особенностью обработки экспериментальных данных для определения коэффициентов теплоотдачи являлось то, что средняя температура поверхности $\overline{t_w}$ учитывала не только распределение температуры по поверхности (три сечения), но и изменение температуры t_f во времени. Другой особенностью, учитываемой при обработке эксперимента, является гистерезис кривой кипения. При обобщении учитывалась кривая кипения при снижении теплового потока. Эксперименты проведены при температуре насыщения – недогрева жидкости не происходило. Еще одним фактором, влияющим на уровень теплоотдачи, является стохастический характер протекания процесса. Поэтому опыты повторялись многократно. Кроме этого, для исключения влияния форм и геометрических параметров поверхностей опыты производились на нескольких (до пяти) образцах в каждой партии.

Исходными данными для определения коэффициента теплоотдачи при кипении являются: сила тока на нагреваемой пластине I , А; падение напряжения ΔU , В; средняя температура исследуемой поверхности $\overline{t_w}$, К; площадь исследуемой поверхности без учета развития F , м².

Коэффициент теплоотдачи при кипении рассчитывался по формуле:

$$\alpha = Q / (F \cdot \Delta t), \quad (1)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F – площадь поверхности пластины между токоподводами, м² (без учета увеличения поверхности за счет оребрения); Δt – разность между средней температурой поверхности образца и воды, К.

Q – тепловой поток, выделяющийся на пластине, Вт, определяемый по формуле:

$$Q = I \cdot \Delta U - Q_{\text{пот.}}, \quad (2)$$

где: I – сила тока, подаваемого на пластину, А; ΔU – падение напряжения на пластине, В; $Q_{\text{пот.}}$ – тепловые потери через текстолитовую пластину.

Разность между средней температурой поверхности образца и воды Δt , определяется по формуле:

$$\Delta t = \overline{t_w} - t_f, \quad (3)$$

где t_f – температура воды (температура насыщения при атм. давлении), К; $\overline{t_w}$ – средняя температура поверхности кипения, К.

Неопределенность косвенного измерения α с учетом отсутствия неопределенностей типа А при доверительной вероятности $P = 0,95$ и коэффициентом охвата $k = 2$ находится на уровне до 19,31 %, а тепловых потоков

до 10,67 %. В качестве тестовой поверхности использовались гладкая пластина из нержавеющей стали и титана толщиной 0,2 мм и шириной 10 мм.

В третьей главе приведены результаты визуализации парообразования на поверхностях с различными рельефами, которые позволили объяснить механизм интенсификации теплообмена. В главе представлены экспериментальные данные по КТО при кипении воды на поверхностях с различным рельефом. Для инженерных приложений предложены зависимости для расчета увеличения коэффициентов теплоотдачи на микроструктурированных поверхностях по сравнению гладкой поверхностью.

Для проведения обобщения экспериментальных данных по коэффициентам теплоотдачи в безразмерном виде геометрические параметры необходимо нормировать по характерному линейному размеру. В качестве такого размера принята постоянная Лапласа $l_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')}}$, коррелирующая с отрывным диаметром пузырька. Величина l_0 характеризует наличие капиллярного эффекта и, тем самым, определяет способность микроструктуры поверхности «подкачивать» жидкость к центрам парообразования, включая мениски и области сухих пятен под паровыми пузырьками, влияя на процесс теплоотдачи.

Режимные параметры учитывались безразмерным параметром K_q определяющимся осредненной скоростью движения жидкости, обусловленной процессом парообразования. При использовании характерным размером постоянной Лапласа l_0 параметр K_q рассчитывался как $K_q = q \cdot l_0 / (r \cdot \rho'' \cdot \nu')$, где ρ'' - плотность пара, ν' - кинематический коэффициент вязкости жидкости, r - скрытая теплота парообразования, q – плотность теплового потока.

Выбор зависимости для расчета нормирующего коэффициента теплоотдачи для гладкой поверхности α_0 , производился путем сравнения полученных экспериментальных данных для гладких образцов с известными зависимостями для коэффициентов теплоотдачи. При использовании масштаба l_0 в качестве нормирующего коэффициента теплоотдачи α_0 рекомендуется принимать зависимость В.М. Боришанского, имеющую наименьшее расхождение экспериментальных и расчетных данных.

На Рис. 6. представлен результаты экспериментальных исследований теплоотдачи при кипении на исследованных поверхностях.

Зависимость для двухмерного рельефа:

$$\alpha/\alpha_0 = 4,71 \cdot K_q^{-0,155} \cdot (\theta/90)^{0,522} \cdot (h/l_0)^{0,22} \cdot (\Delta/l_0)^{0,19} \cdot (\delta/l_0)^{-0,36}, \quad (4)$$

где параметры микроструктуры имеет следующие значения: $q = 3800 - 2,17 \cdot 10^6$ Вт/м², $K_q = 5 - 11500$, $\theta/90 = 0,72 - 1$, $h/l_0 = 0,09 - 1,45$, $\Delta/l_0 = 0,002 - 1,29$, $\delta/l_0 = 0,01 - 1$, $Pr = 1,75 - 1,79$, $F/F_0 = 1,66 - 9,75$.

Зависимость для трехмерного рельефа:

$$\alpha/\alpha_0 = 3,2 \cdot K_q^{-0,2} \cdot (\theta/90)^{-1,64} \cdot (h/l_0)^{0,395} \cdot (\Delta/l_0)^{0,08} \cdot (\delta/l_0)^{0,18} \cdot (u/l_0)^{-0,47} \cdot (s/l_0)^{-0,47}, \quad (5)$$

где параметры микроструктуры имеют диапазон изменений $q = 2400 - 3,5 \cdot 10^6$ Вт/м², $K_q = 8,7 - 22030$, $\theta/90 = 0,77 - 1$, $h/l_0 = 0,09 - 0,71$, $\Delta/l_0 = 0,002 - 0,3$, $\delta/l_0 = 0,042 - 0,42$, $u/l_0 = 0,009 - 0,28$, $s/l_0 = 0,02 - 0,79$, $Pr = 1,75 - 1,79$, $F/F_0 = 2,23 - 4,8$

Зависимость для подповерхностных микроканалов:

$$\alpha/\alpha_0 = 2,1 \cdot K_q^{-0,214} \cdot (h/l_0)^{-1,1} \cdot (\Delta/l_0)^{0,13}, \quad (6)$$

где параметры микроструктуры имеют диапазон изменений $q = 2400 - 3,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $K_q = 80 - 2000$, $\theta/90 = 0,66 - 1$, $h/l_0 = 0,06 - 0,1$, $\delta/l_0 = 0,007 - 0,046$, $k/l_0 = 0,0014 - 0,043$, $\Delta/l_0 = 0,001 - 0,024$, $Pr = 1,75 - 1,79$, $F/F_0 = 2,1 - 9,6$

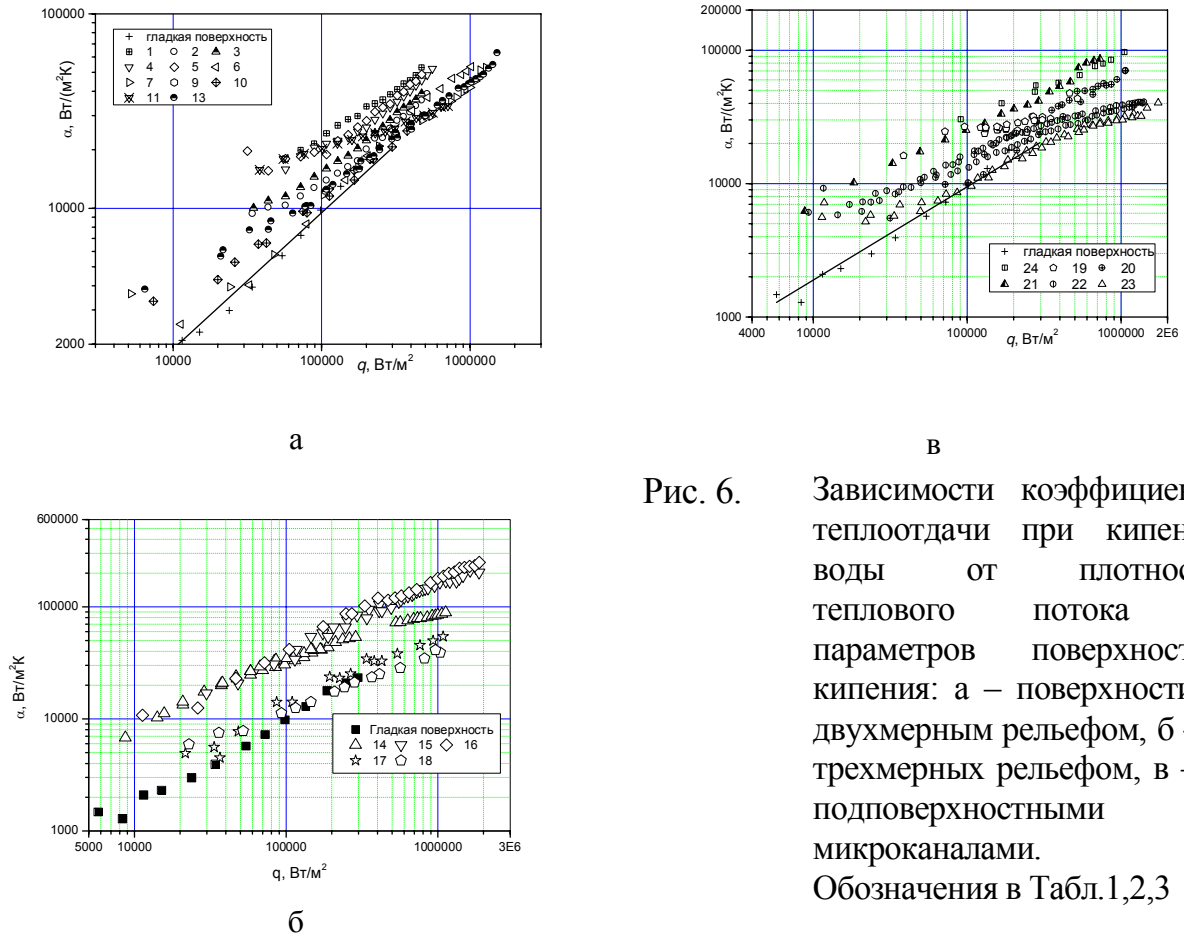


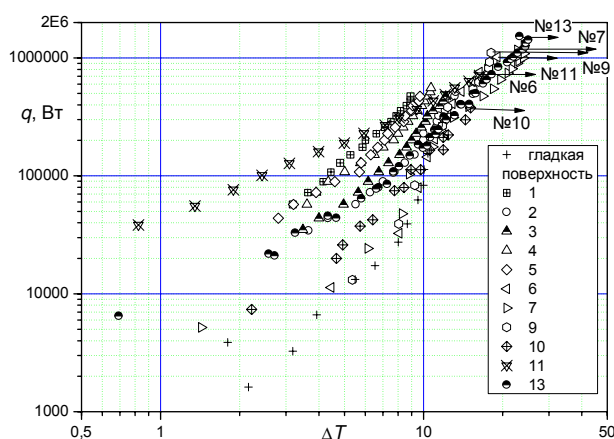
Рис. 6. Зависимости коэффициента теплоотдачи при кипении воды от плотности теплового потока и параметров поверхностей кипения: а – поверхности с двухмерным рельефом, б – с трехмерных рельефом, в – с подповерхностными микроканалами. Обозначения в Табл.1,2,3

Показано, что в исследуемом диапазоне, с увеличением относительного зазора Δ/l_0 элементов микроструктуры, как для двух-, трехмерного рельефа и так и для подповерхностных микроканалов, КТО увеличивается. Анализ моделей кипения показал, отвод теплоты производится как на верхних площадках элементов рельефа микроструктур, так и на боковых. Увеличение Δ/l_0 позволяет улучшить отвод пара из зазоров и обеспечить повышение коэффициента теплоотдачи, хотя с увеличением Δ/l_0 уменьшается влияние капиллярного эффекта на подвод новых порций жидкости в зазоры. Увеличение относительной высоты элементов рельефа h/l_0 увеличивает площадь двухмерных и трехмерных рельефов кипения и, соответственно, количество отводимой теплоты. Однако для поверхностей с подповерхностными каналами влияние обратное и связано со сложностью отвода пара и «запариванием» высоких каналов. Приближение угла θ к 90° на поверхностях с двухмерным рельефом повышает уровень теплоотдачи вследствие уменьшения удержания крупных пузырей пара в зазорах между элементами микроструктуры. Однако на трехмерном рельефе влияние обратное и может быть объяснено только корреляцией угла θ с другими

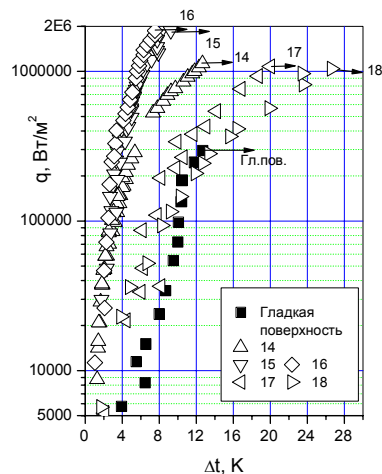
параметрами. Увеличение толщины элементов двумерного рельефа δ/l_0 должно было бы приводить к увеличению площади теплообмена по внешним граням рельефа и увеличению эффективности микроструктуры как микрооребрения. Однако, вероятнее всего, на уровень теплоотдачи влияет больше плотность центров парообразования, чем увеличение поверхности теплообмена. С уменьшением значений δ/l_0 возрастает плотность центров парообразования на поверхности теплообмена из-за более плотного расположения основных элементов микроструктуры поверхности: зазоров между микроребер рельефа.

Исследовано влияние положения поверхностей. Для двумерного рельефа и подповерхностных микроканалов различие в коэффициентах теплоотдачи при различных ориентациях практически исчезает, а для поверхности с трехмерным рельефом коэффициенты теплоотдачи выше до 4 раз на поверхности, обращенной зоной кипения вверх.

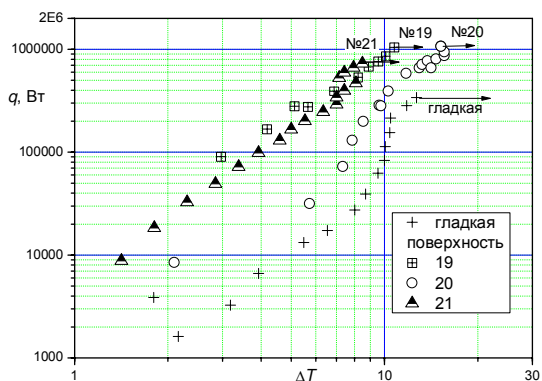
В четвертой главе рассмотрены критические тепловые потоки. Получены обобщающие зависимости и произведена оценка влияния положения поверхности на их значение. Результаты в виде кривых кипения представлены на Рис.7. Особенностью являлось наступление кризиса при более низких тепловых потоках, что характерно для тонких образцов.



а



б



в

Рис. 7 Зависимость плотности тепловых потоков от перегрева поверхности при кипении воды на поверхностях с двумерным (а), трехмерным (б) рельефом и подповерхностными микроканалами (в). Обозначения в Табл. 1,2,3.

Зависимость критического теплового потока для двухмерного рельефа:

$$q_{\text{крит}}/q_{\text{крит}0} = 14,4 \cdot (\theta/90)^{1,36} \cdot (h/l_0)^{0,33} \cdot (\Delta/l_0)^{0,26} \cdot (\delta/l_0)^{0,43} \cdot \text{Pr}^{-0,66}, \quad (7)$$

где $\theta/90 = 0,72 - 1$, $h/l_0 = 0,09 - 1,45$, $\Delta/l_0 = 0,002 - 1,29$, $\delta/l_0 = 0,01 - 1$, $\text{Pr} = 1,75 - 1,79$, $F/F_0 = 1,66 - 9,75$

Зависимость критического теплового потока для трехмерного рельефа:

$$q_{\text{крит}}/q_{\text{крит}0} = 11,2 \cdot (\theta/90)^{2,26} \cdot (h/l_0)^{0,35} \cdot (\Delta/l_0)^{-0,19} \cdot (\delta/l_0)^{-0,245} \cdot (u/l_0)^{-0,4} \cdot (s/l_0)^{0,82} \cdot \text{Pr}^{-0,66}, \quad (8)$$

где $\theta/90 = 0,77 - 1$, $h/l_0 = 0,09 - 0,71$, $\Delta/l_0 = 0,002 - 0,3$, $\delta/l_0 = 0,042 - 0,42$, $u/l_0 = 0,009 - 0,28$, $s/l_0 = 0,02 - 0,79$, $\text{Pr} = 1,75 - 1,79$, $F/F_0 = 2,23 - 4,8$

Зависимость для подповерхностных микроканалов

$$q_{\text{крит}}/q_{\text{крит}0} = 19,8 \cdot (\theta/90)^{-0,2} \cdot (h/l_0)^{0,35} \cdot (\Delta/l_0)^{0,15} \cdot (\delta/l_0)^{-0,245} \cdot (k/l_0)^{0,35} \cdot \text{Pr}^{-0,66}, \quad (9)$$

где $\theta/90 = 0,66 - 1$, $h/l_0 = 0,06 - 0,1$, $\delta/l_0 = 0,007 - 0,046$, $k/l_0 = 0,0014 - 0,043$, $\delta/l_0 = 0,0014 - 0,024$, $\text{Pr} = 1,75 - 1,79$, $F/F_0 = 2,1 - 9,6$

Погрешность обобщения составила ± 35 % при доверительной вероятности 0,95

Анализ зависимостей показывает, что в исследуемом диапазоне значений Δ/l_0 с увеличением относительного зазора между элементами рельефа Δ/l_0 критические тепловые потоки на микроструктурированных поверхностях, как двухмерной, так и трехмерной структуры, уменьшаются, что связано с уменьшением капиллярного эффекта. Для трехмерной поверхности это относится и для относительного зазора u/l_0 . Именно приток жидкости под паровой пузырь по капиллярам микроканалов в структуре, отодвигает образование сухих пятен и наступление кризиса кипения. Увеличение относительной высоты элементов рельефа h/l_0 также способствует лучшей смачиваемости поверхности.

Однако обращает на себя внимание различное влияние относительной толщины δ/l_0 структур (ребер, штырьков) в зависимостях для поверхностей с двухмерными и трехмерными рельефами. Увеличение толщины элементов рельефа способствует увеличению площади поперечного сечения элементов микроструктур (ребер, штырьков) и тепловых потоков, так как увеличивается коэффициент эффективности работы ребер и штырьков и передаче большего количества теплоты. Но для трехмерных рельефов площадь поперечного сечения обусловлена $\delta \cdot s$, то есть взаимным влиянием параметров δ/l_0 и s/l_0 , и как для двухмерных поверхностей влияние s/l_0 более сильное, как и более большие значения параметра s/l_0 . Корреляция δ/l_0 и s/l_0 для трехмерного рельефа учтена как $(\delta/l_0)^{-0,245} \cdot (s/l_0)^{0,82}$, в то время для двухмерного рельефа как $(\delta/l_0)^{0,43}$, но в обоих случаях видно, что увеличение толщины элементов рельефа повышают количество переносимой теплоты.

Выполнены исследования влияния ориентации поверхности на критические тепловые потоки при кипении воды. На гладких пластинах, ориентированных поверхностью кипения вверх, кризис кипения наступал при плотностях теплового потока в 4 раз больше, чем на пластинах, ориентированных поверхностями кипения вниз, и в 1,9 раза выше, чем на боковой. Образцы с двухмерными рельефами, ориентированные вверх, имеют КТП на 32 % выше, чем образцы ориентированные поверхностью

вниз. Но критические тепловые потоки на поверхности кипения расположенной вертикально оказались практически в 3 раза выше. Поверхности с трехмерным рельефом, ориентированные поверхностью вверх, имеют КТП также в 3,75 раз выше, чем ориентированные вниз и в бок. У подповерхностных микроканалов, ориентированными вверх, критические тепловые потоки в 2,5 раза выше, чем на образцах, ориентированных в бок, и которые, в свою очередь, имеют КТП в 2 раза выше, чем поверхности, ориентированные вниз.

При исследовании кипения уделено внимание смачиванию микроструктурированных поверхностей. Определение угла смачиваемости проводилось на основе анализа видеоизображения с использованием кругового метода. Показано, что микроструктурирование поверхностного слоя улучшает смачиваемость за счет действия капиллярных сил. Это свойственно как для двух-, трехмерного рельефа, так и для подповерхностных микроканалов. Смачиваемость повышается за счет особенностей трехмерного рельефа, наличия дополнительных микрозазоров между штырьками, растекания капель не только в одном направлении, а по всей теплообменной поверхности. Увеличение смачиваемости обосновывает дополнительное повышение эксплуатационных характеристик поверхностей с трехмерным рельефом.

В приложении приведены акты использования результатов работы.

Основные выводы по работе.

1. Получены зависимости для оценки коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении воды в условиях свободной конвекции при атмосферном давлении на микроструктурированных поверхностях с подповерхностными микроканалами, полученные деформирующим резанием. Данные зависимости позволяют проводить обобщение значений коэффициента теплоотдачи и критических тепловых потоков в пределах $\pm 30\%$ при доверительной вероятности 0,95.
2. Максимальная интенсификация теплоотдачи для подповерхностных микроканалов составила 2,3 раза по сравнению с поверхностями без микрорельефа, а увеличение значений величины критических тепловых потоков составило от 2,3 до 3,1 раза.
3. Установлено, что использование поверхностей, с двух- трехмерным рельефом и с подповерхностными каналами, является эффективным способом интенсификации теплообмена при кипении воды в условиях свободной конвекции. Максимальная интенсификация теплоотдачи составила 5,3 раза для трехмерного и 1,7 раза для двухмерного рельефа.
4. Увеличение значений величины критических тепловых потоков составило от 1,3 до 5,9 раз для трехмерного и от 3,3 до 4,1 раз для двумерного рельефа.
5. Получены зависимости для оценки увеличения коэффициентов теплоотдачи при пузырьковом кипении воды в условиях свободной конвекции и значений критических тепловых потоков на поверхностях с подповерхностными микроканалами в диапазоне изменения геометрических параметров рельефа $\theta = 60...90^\circ$, $h = 200...360$ мкм, $\delta = 26...160$ мкм,

$k = 5 \dots 15$ мкм, $\Delta = 5 \dots 85$ мкм. Выявлено влияние ориентации поверхностей в пространстве на теплоотдачу и критические тепловые потоки.

**Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:
В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:**

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

2. Каськов С.И. Теплообмен при кипении жидкости на микроструктурированных поверхностях. Ч. 1. Теплоотдача при кипении воды / И.А. Попов, Н.Н. Зубков, С.И. Каськов, А.В. Щелчков // Теплоэнергетика. 2013. № 3. С. 1-9.

Версия: Heat Transfer during the Boiling of Liquid on Microstructured Surfaces. Part 1: Heat Transfer during the Boiling of Water I.A. Popov, N.N. Zubkov, S.I. Kas'kov, A.V. Shchelchikov // Thermal Engineering. 2013. Vol. 60, No. 3. P. 157–165.

3. Каськов С.И. Теплообмен при кипении жидкости на микроструктурированных поверхностях. Ч. 2. Визуализация кипения и критические тепловые потоки / И.А. Попов, Н.Н. Зубков, С.И. Каськов, А.В. Щелчков // Теплоэнергетика. 2013. № 4. С. 1-10.

Версия: Heat Transfer during the Boiling of Liquid on Microstructured Surfaces. Part 2: Visualization of Boiling and Critical Heat Fluxes. I.A. Popov, N.N. Zubkov, S.I. Kas'kov, A.V. Shchelchikov // Thermal Engineering. 2013. Vol. 60, No. 4. P. 285-294.

4. Каськов С.И. Микроканальный щелевой теплообменник / Н.Н. Зубков, А.И. Овчинников, С.И. Каськов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 2 (26). С. 11.

5. Kas'kov S.I. Analysis of arrangements of heaters with tubes finned by deforming cutting / N.N. Zubkov, S.I. Kas'kov, S.M. Nikitenko, M.S. Nikitenko // Journal of engineering thermophysics. Vol. 29, No 4, 2020. P. 600-611.

6. Каськов С.И. Теплообмен при кипения воды на горизонтальной микроструктурированной поверхности с полузакрытыми каналами / И.А. Попов, С.И. Каськов, А.В. Щелчков, Ю.С. Степанова, Р.А. Аксянов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2025. № 2. С. 10-15

Патенты

7. Компактный теплообменник Патент № 135401 РФ / Зубков Н.Н., Каськов С.И., заявл. 04.07.2013, опубл. 10.12.2013, Бюл. № 34.

В других изданиях

8. Каськов С.И. (руководитель) Отчет об ОКР по теме: «Разработка перспективных научно-технических решений по созданию компактного теплообменного оборудования для судовых систем теплоснабжения с использованием высокотемпературных органических теплоносителей (ВОТ)». Шифр «Теплота-теплообменник» Госконтракт № 12411.1007499.09.214. № госрегистрации 01201282499

Подписано в печать: 14.04.2026

Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана