

Некоммерческое акционерное общество «Алматинский Университет
Энергетики и Связи имени Гумарбека Даукеева

УДК 621.311.22; 536.248.2

На правах рукописи

ДЖАМАНКУЛОВА НЕЛЛЯ ОРНАЛИЕВНА

**Разработка и исследование пористого теплообменника
для энергетических предприятий**

8D07102 – Теплоэнергетика

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научный консультант:
доктор технических наук,
профессор Генбач А.А.,
Зарубежный научный
консультант: доктор PhD,
профессор Bakić V. V.

Республика Казахстан
Алматы, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ	6
ВВЕДЕНИЕ	7
1 КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА, ГИДРОДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ В ПОРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА	15
1.1 Пористые поверхности теплообмена	15
1.2 Интенсификация теплообмена с помощью пористых элементов	17
1.3 Экспериментальные установки для исследования теплообмена в капиллярно-пористой системе	24
1.4 Различные подходы к механизму процесса парообразования	30
1.5 Эффективные способы охлаждения поверхностей нагрева высокофорсированных установок	33
1.6 Испарительное охлаждение металлургических печей	42
Выводы по разделу 1	47
2 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ (ФИЗИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ) ПРОЦЕССА ПАРООБРАЗОВАНИЯ (ТЕПЛОМАССООБМЕНА, ГИДРОДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ) В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ	47
2.1 Характеристики одиночного парового пузыря в ячейках капиллярно-пористой структуры.....	47
2.2 Модель процесса теплообмена при микрослоевом испарении....	49
2.3 Математическая и физическая модели процесса парообразования.....	50
2.3.1 Модель зарождения паровых пузырьков (физическая модель	50
2.3.2 Математическая модель процесса парообразования для условий предельного состояния поверхности теплообмена	53
2.4 Механизм процесса парообразования в пористой структуре теплообменника (тепломассообмена, гидродинамики и прочности	56
Выводы по разделу 2	59
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ	60
3.1 Исследование процессов парообразования в пористых структурах, работающих с избытком жидкости	60
3.2 Устройство для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок	63

3.3	Экспериментальная установка для исследования капиллярно-пористых структур для охлаждения кессона	67
	Выводы по разделу 3	73
4	ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ	75
4.1	Результаты исследования и их обсуждение	75
4.2	Обсуждение экспериментальных данных для процессов кипения в пористых структурах	77
	Выводы по разделу 4	85
5	АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛООБМЕН, ГИДРОДИНАМИКУ И ПРОЧНОСТЬ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ	86
5.1	Анализ критериальных уравнений процессов кипения в пористых структурах	86
5.2	Анализ голографических интерферограмм и кинограмм процессов кипения в пористых структурах	86
5.3	Анализ результатов аналитического исследования	90
5.4	Анализ плотности теплового потока при кипении одиночного парового пузыря в ячейках пористой структуры	93
	Выводы по разделу 5	96
6	ОБСУЖДЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ	98
6.1	Определение параметров кипения	98
6.2	Предельное состояние капиллярно-пористой структуры под индивидуальным паровым пузырем	101
6.2.1	Расчет предельного состояния поверхности теплообмена	102
	Выводы по разделу 6	106
7	ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ	107
7.1	Применение капиллярно-пористых систем в металлургическом производстве	107
7.2	Капиллярно-пористые теплообменники для охлаждения плавильных агрегатов	114
	Выводы по разделу 7	123
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	126
	ПРИЛОЖЕНИЯ	139

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 α – коэффициент линейного расширения, К^{-1} ;
 α' – угол микрослоя с поверхностью, град.;
 α'' – коэффициент избытка воздуха;
 b_r', b_r – ширина ячейки сетки на просвет (размер поры), м;
 $\delta_{\text{ф}}$ – гидравлический размер пор и толщина фитиля, м;
 β – угол наклона системы охлаждения к вертикали, град;
 C – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кгК})$;
 $C_{\text{пр}}$ – производственная себестоимость;
 $C_{\text{т}}$ – технологическая себестоимость;
 δ – толщина структуры, размер (толщина) частиц, м;
 \bar{D}_o^3 – средний отрывной диаметр паровых пузырей в КПС, м;
 d – размер (диаметр) зерен структуры, м;
 E – модуль Юнга (упругости), $\text{Н}/\text{м}^2$;
 ε – пористость;
 $F, F_{\text{п}}$ – поверхность нагрева (охлаждения) и поверхность занятая паром, м^2 ;
 $F_{\text{ф}}$ – сечение пористой структуры (фитиля), м^2 ;
 \bar{f} – средняя частота генерации пузырей, с^{-1} ;
 G – удельный расход, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$;
 $G_{\text{ж}}$ – удельный расход жидкости, $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$;
 g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;
 h, L – высота и длина поверхности нагрева, м;
 h – высота, толщина (глубина проникновения температурной волны в стенку), м;
 $2h$ – толщина пластины, м;
 h'' – глубина проникновения температурной волны в поверхность охлаждения, м;
 θ – угол смачивания (динамический угол), град.
 $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности стенки, $\text{Вт}/(\text{мК})$;
 $\lambda_{\text{кр}}$ – критическая длина волны между паровыми столбиками, м;
 $\lambda_{\text{ж}}, \lambda_{\text{эф}}$ – коэффициент теплопроводности жидкости и эффективный коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{мК})$;
 K – коэффициент проницаемости, м^2 ;
 K_y – условный коэффициент проницаемости, м^2 ;
 ν – коэффициент Пуассона (поперечного сжатия);
 $\nu_{\text{ж}}$ – коэффициент кинетической вязкости жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$;
 m – расход, $\text{кг}/\text{с}$;
 $m_{\text{ж}}^6$ – расход жидкости в баке, $\text{кг}/\text{с}$;
 m_1, m_2 – расходы жидкости на входе в верхнюю и нижнюю магистрали, $\text{кг}/\text{с}$;

$m_{сл}$ – расход жидкости на сливе, кг/с;
 m_k – расход конденсата, кг/с;
 $m_{ц.в.}$ – расход циркуляционной воды, кг/с;
 $m_{п}$ – расход пара, кг/с;
 $\tilde{m} = m_{ж}/m_{п}$ – избыток жидкости;
 \bar{n} – средняя плотность центров парообразования, m^{-2} ;
 η – коэффициент полезного действия (КПД), %;
 ρ – плотность, kg/m^3 ;
 P – давление, N/m^2 ;
 ΔP – перепад давления (действующий напор), N/m^2 ;
 $\Delta P_{g+кап}$ – суммарный действующий напор (массовый и капиллярный), N/m^2 ;
 σ – коэффициент поверхности натяжения, N/m ;
 τ – время, с;
 q – тепловая нагрузка, Wt/m^2 ;
 $q_{кр}$ – критический тепловой поток, Wt/m^2 ;
 $\bar{\varphi}'$ – среднее расходное влагосодержание;
 R, r – радиус, м;
 $R_{с.п.}$ – радиус «сухого» пятна, м;
 R – радиус мениска жидкости, м;
 \bar{r} – теплота парообразования, $Dж/кг$;
 T – температура, K ;
 $t_{ст}$ – температура стенки, $^{\circ}C$;
 $t_{ж}^{\circ}$ – температура жидкости в баке, $^{\circ}C$;
 T_n – температура насыщения, K ;
 ΔT – температурный напор ($\Delta T = T_{ст} - T_n$), K ;
 $\Delta T_{кр}$ – критический температурный напор, K ;
 V – скорость, m/c ;
 W – объём сегмента, m^3 ;
 \bar{W} – средняя скорость, m/c ;
 x, y, z – координаты по направлению движения жидкости и пара, м.
ТТ, т.т. – тепловая труба;
КПСО – капиллярно-пористая система охлаждения;
КПП – капиллярно-пористые покрытия;
КПС – капиллярно-пористые структуры;
СКС-1М – скоростная киносъёмочная камера;
ТЛ-4 – ртутный термометр;
РЭД – ротаметр;
ИВ – игольчатый вентиль;
А – амперметр;
Р – расходомер;
Г – гальванометр;
ст. – стенка;
ж. – жидкость;

п. – пар;
кр.сеч. – критическое сечение;
ср. – средний;
у. – условный;
пр.сж. – предельное состояния от сил сжатия;
пр.раст. – предельное состояние от сил растяжения;
кр. – критический (кризис);
г. – гидродинамический;
g+кап. – массовый и капиллярный;
с.п. – “сухое” пятно;
пл. – плавление (пластина);
б. – бак;
сл. – слив;
вх., вых. – вход, выход;
и. – изоляция;
эл. – электрический;
диф. – дифференциальная;
воз. – воздух;
эф. – эффективный;
ф. – фитиль;
н. – насыщение.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

1. «Инструкция по оформлению диссертации и автореферата», Высший аттестационный комитет. – Алматы:2004 г., №377-3 ж.
2. ТУ 14-4-507-99 Сетки тканые с квадратными ячейками микронных размеров.
3. ГОСТ 6613-86. Ограничение срока действия снято по протоколу N 2-92 Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (ИУС 2-93).
4. ГОСТ 7.1 – 2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач, поставленных правительством Казахстана в области энергетики, необходимы принципиально новые устройства, способные существенно интенсифицировать теплообменные процессы, повысить надежность работы теплоэнергетического оборудования и обеспечить экологическую защиту от загрязнения промышленными выбросами. Это позволит осуществить перевод производства на преимущественно интенсивный путь развития, обеспечивающий ускорение темпов экономического роста на базе научно-технического прогресса. Научно-технический прогресс сопровождается ростом выработки энергии для нужд человечества. Строятся и вводятся в эксплуатации мощные тепловые электрические станции на базе низкосортных и низкокалорийных углей Экибастузского угольного бассейна и других энергетических комплексов. Решение таких глобальных задач немислимо без бережного, тщательно продуманного отношения к окружающей природной среде.

Перспективы применения пористых систем рассмотрены многими авторами, выполненных на основе тепловых труб для обеспечения надежности работы теплообменного оборудования паровых котлов, снижения концентрации оксидов азота в топочных камерах.

Высокая интенсивность, надежность, компактность, простота в изготовлении и эксплуатации это основные преимущества пористых систем. Перечисленные свойства повышают режимные и технологические показатели в процессе выработки энергии.

Анализ состояния вопроса и постановка задач исследования

Достижение максимального народнохозяйственного эффекта, а также снижение материалоемкости и энергоемкости на единицу продукции является важнейшим требованием при создании новых конструкций машин, аппаратов и устройств. Следовательно, необходимо проводить работу по исследованию, конструированию и внедрению более экономичных устройств, которые позволят интенсифицировать процессы.

Применение КПП позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи по сравнению с кипением на гладкой поверхности в 1,5-10 раз. Кроме того, существенно снижается величина разности температур, при которой устанавливается развитое кипение (0,5-1,5 К), что имеет большое значение для повышения энергетических показателей различных производств [1]. По данному вопросу имеется много публикаций [2-4].

Одним из наиболее материалоемких видов оборудования многих производств является теплообменная аппаратура. Применение капиллярно-пористых покрытий (КПП) на поверхностях с высоким нагревом является перспективным направлением для интенсификации теплообмена в процессах кипения. «Устройства, осуществляющие высокоинтенсивный теплообмен благодаря наличию КПП, применяются или могут быть применены во многих

отраслях народного хозяйства: радиоэлектронной, авиационной, космической, химической и нефтехимической, пищевой, энергетической и других» [5, с.2].

«Несмотря на это, в ней содержится недостаточно расчетных и экспериментальных данных, чтобы обеспечить надежное проектирование теплообменных аппаратов с КПП. Данные различных авторов, полученные для конкретных условий, носят разрозненный характер и не могут быть рекомендованы для случаев, заметно отличающихся от условий проведенных экспериментов. Зачастую данные носят противоречивый характер. Как показал анализ, помимо традиционных факторов, влияющих на интенсивность процесса кипения, в данном случае едва ли не решающее значение имеют технологические особенности создания КПП.» [5, с.3].

Вопросами исследования физики процесса пузырькового кипения на локально обогреваемых поверхностях занимались многие исследователи под руководством видных советских и зарубежных ученых. Большой вклад в изучения этого вопроса внесли советские ученые В.И. Толубинский, Д.А. Лабунцов, В.А. Григорьев, В.И. Субботин, В.И. Бараненко, Ю.Н. Островский и многие другие.

Большое число публикаций посвящено изучению пульсаций температуры поверхности под действующим центром парообразования [6-9]. «Для получения таких колебаний температуры исследователи применяли малоинерционные и малогабаритные теплоотдающие поверхности, размеры которых, в некоторых случаях, были соизмеримы с отрывными диаметрами паровых пузырей. Однако, несмотря на большое количество работ по исследованию пульсаций температуры при кипении жидкостей на поверхностях малого размера, наблюдается значительный разброс опытных данных. В разных исследованиях получены отличающиеся друг от друга результаты, которые слабо коррелируют между собой» [10].

Промышленное производство и окружающая его среда требуют серьезного улучшения экологических условий, безопасности труда, экономии природных ресурсов (топлива, воды, воздуха, тепла). В связи с этим, необходимы новые способы и устройства, которые реализуются с высокой эффективностью путем применения пористых систем. Известное многообразие конструктивных решений не удовлетворяет возрастающим требованиям времени, к тому же существующие исследования имеют ограниченное применение, часто носят противоречивый характер в связи с ограниченным диапазоном изменения входящих параметров, полученных при различных методических подходах. Механизмы теплопередачи и физическая природа явлений имеют разные объяснения и требуют единого обобщения. Предложенные модели процессов не учитывают многих особенностей тепломассопереноса. Отсутствуют результаты исследований внутренних характеристик в пористых структурах, как правило, не учитываются гравитационное поле, недогрев и скорость потока, теплоаккумулирующие свойства стенки, эффективны существующие интенсификаторы теплопередачи.

Необходима оптимизация пористых структур для каждого нового интенсификатора, поэтому возникает необходимость решить такие задачи:

1. разработать эффективные способы и устройства для приближения производства к экологически чистому и безопасному;
2. выполнить исследования с использованием единой методики интегральных и внутренних характеристик;
3. выявить механизм процессов для возможных режимов, их смены раскрыть природу явлений, как в чистом виде, так и в совокупности, особо обратив внимание на комбинированное воздействие капиллярных и массовых сил, а также на режимные и конструктивные характеристики, что в целом имеет научный и практический интерес;
4. построить физические, математические и расчетные модели для всех режимов теплопередачи, сравнить широкий класс явлений с проведением уточнений экспериментальными данными;
5. использовать результаты оптических методов исследований.

Актуальность исследования

1. Детали и узлы металлургических агрегатов особенно в плавильных агрегатах работают при высокой температуре и соответственно требуют интенсивного охлаждения.
2. В настоящее время используются водяная и испарительная системы охлаждения. Для этой цели подходят системы с пористой (сетчатой) структурой которые нашли успешное применение в случаях, когда требовалось повышение интенсивности охлаждения.
3. Необходимость обеспечения взрывобезопасности работы плавильных агрегатов в металлургии за счет исключения попадания воды в расплав и штейн, которое приводит к взрыву печи для водяной и испарительной систем охлаждения при выполнении их в виде кессонов.
4. Необходимость предупреждения перегрева и пережога сильно нагретых поверхностей стенок энергооборудования.
5. Вопросы разработки перспективных конструкций теплообменников с пористой структурой охлаждения являются актуальными.
6. В этом случае может быть эффективна капиллярно-пористая система охлаждения, которая содержит малое количество жидкости, взрывобезопасна и обладает высокой форсировкой и интенсивностью теплообмена.

Целью исследования является разработка теплообменного устройства на пористых элементах и исследование теплообмена парообразованием в пористых структурах при совместном действии капиллярных и массовых сил.

Задачами исследования являются:

1. исследование процессов тепло- и массопереноса при парообразовании в капиллярно- пористых структурах;
2. построение физических и математических моделей, описывающих процесс теплообмена в капиллярно- пористых структурах;

3. разработка экспериментальной установки и ее элементов для исследования процессов тепло- массообмена парообразованием;

4. исследование механизма процессов теплообмена парообразованием с помощью голографии и скоростной киносъемки;

5. расчет тепловых потоков и их управление с помощью термогидравлических характеристик кипения в сетчатых капиллярно- пористых структурах.

Методы исследования, которые применяются в научном исследовании и предполагаются в данном исследовании - эмпирический, экспериментально-теоретический, теоретический, виртуальный:

- эмпирический (измерение, счет, сравнение);
- экспериментально-теоретический (эксперимент, анализ (аналитический метод), аналогия, моделирование);
- теоретический (обобщение).

Научная новизна проведенных исследований

1. Разработаны математические и физические модели процесса парообразования в капиллярно-пористых системах:

- модель микрослоевого испарения; модель зарождения парового пузыря на парогенерирующей поверхности в ячейках пористой структуры;
- математическая модель процесса теплообмена; модель капиллярно-пористого покрытия для предельного состояния поверхности нагрева (задача термоупругости);

2. Исследован механизм теплообмена парообразованием с помощью голографии и скоростной киносъемки;

3. Создана экспериментальная установка для исследования процессов теплообмена в пористых структурах в модели кессона;

4. Получены уравнения тепловых потоков с помощью термогидравлических характеристик процесса кипения (D_0 , f , n , R) в сетчатых пористых структурах;

5. Получены уравнения для расчета теплообмена и гидравлического сопротивления пористой системы охлаждения на основе интегральных характеристик (q , α , ΔT);

6. Обсуждены опытные данные для процессов парообразования в исследуемой пористой системе и дана сравнительная оценка с кипением в большом объеме, в тепловых трубах и тонкопленочных испарителях;

7. Разработаны рекомендации и технические решения для теплообменных устройств с капиллярно- пористыми системами охлаждения.

Научная и практическая значимость диссертационной работы.

Промышленное производство и окружающая его среда требуют серьезного улучшения экологических условий, безопасности труда, экономии природных ресурсов (топлива, воды, воздуха, тепла). В связи с этим, необходимы новые способы и устройства, которые можно реализовать с высокой эффективностью путем применения пористых систем. Существующее многообразие конструктивных решений теплообменных аппаратов не

удовлетворяет возрастающим требованиям времени, к тому же существующие исследования имеют небольшое применение, в связи с ограниченным диапазоном изменения входящих параметров, полученных при различных методических подходах.

Практическая значимость и применение результатов работы дают возможность провести расчет тепловых потоков для выявления пути их управления с помощью термогидравлических характеристик кипения и парообразования в сетчатых капиллярно-пористых структурах теплообменников, широко применяемых в энергетическом производстве, в частности для охлаждения плавильных агрегатов. Возможности проектирования перспективных систем охлаждения для металлургических агрегатов на основе испарительной системы охлаждения. Разработанные на базе полученных результатов позволяют сделать рекомендации и технические решения для разработки капиллярно-пористых систем охлаждения высокотеплонагруженных парогенерирующих поверхностей на примере кессонов плавильных агрегатов. защищённые патентом.

Научные положения, выносимые на защиту:

– математические и физические модели процесса парообразования в капиллярно-пористых системах: модель микрослоевого испарения; модель зарождения парового пузыря на парогенерирующей поверхности в ячейках пористой структуры; математическая модель процесса теплообмена; механизм процесса парообразования в пористой структуре теплообменника (тепломассообмена, гидродинамики и прочности); модель капиллярно-пористого покрытия для предельного состояния поверхности нагрева

– экспериментальная установка для исследования процессов теплообмена в пористых структурах в модели кессона;

– уравнения тепловых потоков с помощью термогидравлических характеристик процесса кипения (D_0, f, n, R) в сетчатых пористых структурах;

– уравнения для расчета теплообмена и гидравлического сопротивления пористой системы охлаждения на основе интегральных характеристик ($q, \Delta T$);

– обсуждение опытных данных для процессов парообразования в исследуемой пористой системе и дана сравнительная оценка с кипением в большом объеме, в тепловых трубах и тонкопленочных испарителях;

– разработанные рекомендации и технические решения капиллярно-пористых систем охлаждения, защищённые патентом, для высокотеплонагруженных парогенерирующих поверхностей на примере кессонов плавильных агрегатов.

Личный вклад соискателя заключается в обосновании актуальности работы, патентном поиске, в обзоре экспериментов различных авторов, анализе и обобщении литературных данных; создании экспериментальной установки и проведении экспериментальных исследований процессов теплообмена в пористых структурах в модели кессона; проведении анализа и исследования полученных результатов по разработке новой высокофорсированной капиллярно-пористой системы охлаждения, построении моделей и получении

расчетных зависимостей на основе интегральных характеристик (q , ΔT); разработке методики моделирования, аналогии, обработки интерферограмм, кинограмм на основе оптических методов; подготовке научных публикаций.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты работы представлялись и обсуждались на научно-практических международных и зарубежных конференциях и семинарах:

1. Международная конференция «Proceedings of the 5-th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD» (Bulgaria, 2016);

2. Международная конференция «Međunarodna konferencija Elektrane - 2016» (Belgrade – Serbia, 2016);

3. Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития науки и производства» (Кемерово – Россия, 2017);

4. Зарубежная конференция «The 55th Annual Science Conference of Ruse University Smart Specialization-Innovative strategy for regional economic transformation» (Ruse – Bulgaria, 2016);

5. Зарубежная конференция с международным участием «18th Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia, Energy – Efficiency – Ecology» (Sokobanja – Serbia, 2017);

6. Международная конференция «First International Scientific Conference «Alternative Energy Sources, Materials and Technologies (AESMT'18)» (Plovdiv – Bulgaria, 2018);

7. Международная конференция «The 7th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD 2018» (Drobeta Turnu Severin – Romania, 2018);

8. Зарубежная конференция с международным участием «The 3rd SDEWES conference on sustainable development of energy, water and environment system» (Novi Sad – Serbia, 2018);

9. Зарубежная конференция с международным участием «EENVIRO 2018 – Sustainable Solutions for Energy and Environment» (Cluj Napoca – Romania, 2018);

10. Международная конференция «XXIII International Conference Energy, Ecology, Comfort, Self – Confidence» (Sozopol – Bulgaria, 2018);

11. X Международная научно-техническая конференция АУЭС, посвященная памяти Первого ректора Г.Ж. Даукеева (Алматы – Казахстан, 2018);

12. Международная конференция «The 8th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD 2018» (Targoviste – Romania, 2019);

13. Зарубежная конференция с международным участием «The XXIInd National Conference on Thermodynamics with International Participation NACOT 2019» (Galati – Romania 2019)

14. Зарубежная конференция с международным участием «The 4th International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems (CIEES), (Plovdiv- Bulgaria, 2023).

Научные публикации. по теме диссертационной работы опубликованы результаты научных исследований в 52 научных статьях и материалах научных конференций: 2 статьи в журнале по базе Web of Science (Thomson Reuters); 10 статей в журналах по базе Scopus; 21 статья в журналах рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки КОКСОН МНнВО РК; 19 публикаций в материалах международных и зарубежных научно-практических конференций 1 патент на изобретение РК; 7 научно-исследовательских отчетов (ОНИР).

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 разделов, заключения, списка использованной литературы и приложений. Основной текст диссертационной работы изложен на 138 страницах, а также приложений, 6 таблиц, 65 рисунков и список использованных литературы из 177 наименований.

1 КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА, ГИДРОДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ В ПОРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Пористые поверхности теплообмена

Задачи экономии ресурсов, применения малоотходных и безотходных технологий и техники, энергосберегающие и прогрессивные методы хозяйствования приобретают важное значение для современного развития общества. Среди технологического оборудования многих современных отраслей народного хозяйства заметное место принадлежит теплообменникам, от эффективности работы которых в значительной степени зависят технико-экономические показатели крупных установок и систем энергетическом производстве. «Создание высокоэффективных теплообменников во многих случаях требует решения задачи интенсификации процессов тепломассопереноса. В настоящее время известно несколько путей повышения интенсивности теплообмена: искусственная турбулизация потока, предотвращение отложений, оребрение поверхности и некоторые другие». Использование фазового превращения одного или двух теплоносителей имеет широкое применение в теплообменных аппаратах процессов кипения и конденсации является одним из наиболее эффективных способов теплопередачи.

Большой интерес к данному вопросу отражен в работах исследователей [11-13] где показано, что по результатам «испытаний было достигнуто значительное усовершенствование эффективности тепломассообмена для нефтехимических процессов, криогенных установок для разделения воздуха и некоторых других областей» [11, с. 51].

Пористое покрытие труб использовалось в теплообменниках, которые разработали и производили фирма "Linde" (филиал компании "Union carbide") (США). Пористая поверхность со стороны кипения использовалась в виде слоя пористого металла на стенках труб теплообменных аппаратов, что значительно уменьшило тепловое сопротивление со стороны кипящей жидкости. Применение таких теплообменников привело к увеличению коэффициента теплопередачи и позволило уменьшить их стоимость до 50% [14].

«Одним из перспективных направлений интенсификации теплообмена при кипении является применение капиллярно-пористых покрытий на греющих поверхностях» [5, с.4]. Высокоинтенсивный теплообмен может быть осуществлен на различных устройствах с применением капиллярно-пористых покрытий. Такие установки и устройства используются или могут быть использованы в различных отраслях народного хозяйства: в энергетической, авиационной, космической, химической и нефтехимической, пищевой и др.

«Расчеты специалистов фирмы, проведенные применительно крупным заводам переработки углеводородного сырья, показали, что введение в эксплуатацию теплообменников нового типа приведет наряду со значительной экономией дорогостоящих материалов и производственных площадей также к

заметному снижению общих энергетических затрат. Последнее оказалось возможным из-за уменьшения оптимальных значений температурных перепадов в основных теплообменниках, что, в свою очередь, имело причиной замечательное свойство новых поверхностей - устойчивое парообразование при минимальных ΔT » [14 с. 3].

«В течение нескольких лет с момента первой публикации в 1964 году о принципах действия тепловой трубы» [15], тему парообразования в объеме фитиля ее испарителя старались не поднимать, но необходимость повышения предела по передаваемым радиальным тепловым потокам привела к изучению условий существования этого режима.

Первые сообщения, опубликованные в начале 60-х годов, свидетельствовали о некоторых интересных особенностях процесса парообразования на поверхностях, покрытых капиллярно-пористыми материалами. Но только десятилетия спустя были оценены перспективность и многие существенные преимущества перед традиционным кипением на гладкой поверхности.

Многочисленные испытания показали «возможность резкого (до 10 раз) увеличения коэффициента теплоотдачи для пористой поверхности, что, фактически, сняло проблему термического сопротивления со стороны кипящего теплоносителя в испарителях и конденсаторах-испарителях. В сочетании с традиционными методами интенсификации теплообмена со стороны второго теплоносителя (гофрировка поверхности, увеличение скорости потока) это позволило для одного из вариантов нового трубчатого элемента повысить суммарный коэффициент теплопередачи в 4,5 раза по сравнению с гладкой трубкой и в 2,5-3,5 раза по сравнению с традиционной оребренной трубкой» [16, с. 5].

Проведенные «испытания доказали также исключительную конструктивную жесткость и прочность таких покрытий, полную воспроизводимость качества теплообменных поверхностей, отсутствие какого-либо ухудшения показателей или разрушения пористой поверхности на протяжении длительного срока эксплуатации. Для стимулирования дальнейшего изучения возможностей промышленного применения нового принципа исключительную важность имели данные о невосприимчивости пористых покрытий к загрязнению жидкой среды» [16, с. 6].

Это привело к дальнейшему значительному увеличению экспериментальных и теоретических исследований, а также к изучению влияния различных характеристик капиллярно-пористых покрытий на закономерности процесса с целью максимально реализовать его преимущества. Второй важной причиной, которое привело к росту исследований в данной области, стала все увеличивающаяся потребность в использовании высокоэффективных теплопередающих устройствах - тепловых трубах, основным элементом которых является пористый фитиль.

«Разработка низкотемпературных и криогенных тепловых труб вообще оказалась невозможной без исследования этого процесса, так как из-за специфических свойств теплоносителей в этой области температур (в основном, низкой теплопроводности), передать даже относительно небольшие тепловые потоки в испарителе можно было лишь в режиме внутрифитильного парообразования. Очевидно, что различия в способах подвода жидкости к обогреваемой стенке для тепловых труб и погруженных поверхностей могут оказывать влияние на протекание процесса. В соответствии с этим различают случаи парообразования на поверхностях с капиллярно-пористым покрытием при капиллярной подаче жидкости (тепловая труба) и расположении свободного уровня жидкости выше границы покрытия. Следует отметить, что принцип капиллярного насоса может использоваться не только в тепловых трубах, а в общем случае организации процесса парообразования, когда капиллярные силы являются единственно определяющими при транспортировке жидкости к тепловыделяющей поверхности» [16, с. 7].

1.2 Интенсификация теплообмена с помощью пористых элементов

Использование в теплообменных устройствах пористых материалов является одним из перспективных и эффективных способов интенсификации тепломассообменных процессов. «Широкий диапазон структурных, теплофизических, гидравлических, химических, оптических и других свойств пористых материалов, простота изготовления из них элементов конструкций, высокая интенсивность теплообмена – всё это дает возможность использовать пористые теплообменные элементы в различных экстремальных условиях». [17, с.13]. В настоящее время существует большое разнообразие теплообменных устройств с пористыми элементами по назначению, конструктивному оформлению, свойствам и фазовому состоянию теплоносителя. На рисунке 1.1 показаны различные способы подвода внутрь проницаемой структуры.

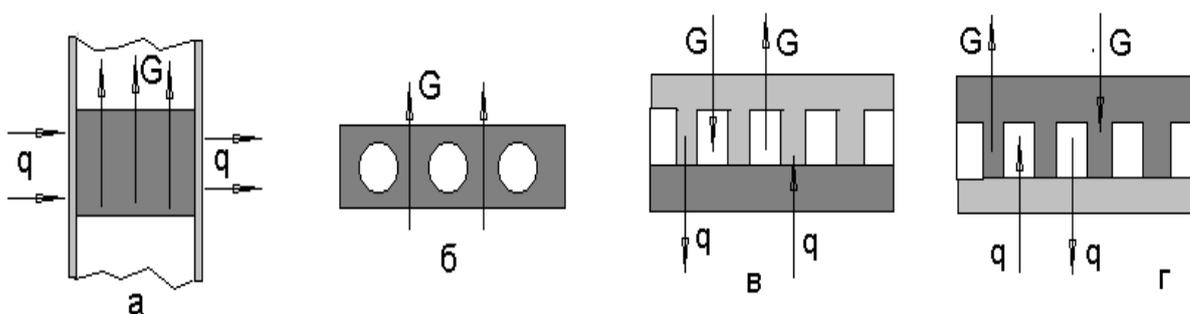


Рисунок 1.1 – Пористые теплообменные элементы с подводом (отводом) теплоты внутрь проницаемой матрицы теплопроводностью от боковой сплошной стенки [9,17 с.14]

а – канал с проницаемой вставкой; б – межтрубное пространство, заполненное пористой матрицей; в – поверхность с ребрами, вершины которых

соединены с проницаемой перегородкой; г – поверхность, покрытая слоем пористого материала, в котором имеются каналы

«Рассмотрим пористые теплообменные элементы с подводом (отводом) теплоты внутрь пористого материала теплопроводностью от имеющей с ним идеальной тепловой контакт герметичной нагреваемой (охлаждаемой) поверхности (рис. 1.1). Здесь можно выделить четыре основных варианта: канал с проницаемой вставкой (рис. 1.1а); межтрубное пространство, заполненное пористой матрицей (рис. 1.1б); поверхность с ребрами, вершины которых соединены с проницаемой перегородкой (рис. 1.1.в); поверхность, покрытая слоем пористого материала, в котором имеются каналы (рис. 1.1г). В последних двух вариантах теплоноситель проходит сквозь пористую структуру и движется по каналам вдоль поверхности.

Основное назначение ПТЭ с подводом теплоты от сплошной стенки – интенсификация теплообмена между поверхностью и омывающим ее потоком теплоносителя. Здесь качественно меняется механизм переноса теплоты: она от непроницаемой стенки передается с помощью теплопроводности» [17, с. 14].

Теплота переносится «через каркас внутрь проницаемой матрицы и затем поглощается потоком теплоносителя за счет интенсивного внутрипорового теплообмена. Пористый наполнитель должен иметь высокую теплопроводность и идеальные тепловой и механический контакты со стенкой [17, с. 15].

Существует пример, когда теплообменная поверхность содержит поверхность нагрева и контактирует с ней, с одной стороны, капиллярно-пористую структуру. Для «интенсификации процесса теплоотдачи при кипении жидкости, между капиллярно-пористой структурой и поверхностью нагрева дискретно на равном расстоянии установлены проставки, а сама капиллярно-пористая структура имеет контакт с поверхностью нагрева на участках, которые расположены посередине между смежными проставками» [18].

Возможность интенсификация процесса теплоотдачи при кипении жидкости и система передачи тепла может быть использована в теплообменниках с кипящим теплоносителем, например опреснителях, испарителях холодильных машин и т.д. На рисунке 1.2 изображена «теплообменная поверхность, поперечное сечение, и работает следующим образом. При подводе тепла к поверхности 1 начинается прогрев жидкости, находящейся со стороны структуры 2, и формирование в ней теплового пристенного слоя. В местах расположения проставок 3 толщина теплового слоя оказывается большей, чем на участках 4, благодаря чему обеспечивается включение в работу большего числа центров парообразования, чем на поверхности без проставок 3. Интенсивность теплоотдачи из-за включения в работу большего числа центров парообразования может возрасти в несколько раз особенно при низких плотностях теплового потока» [18, с. 2].

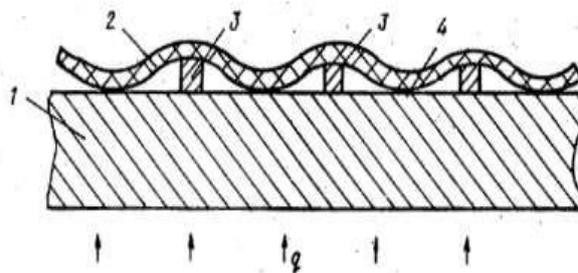


Рисунок 1.2 – Теплообменная поверхность [18]

В настоящее время известно большое количество рекуперативных теплообменных аппаратов на основе пористых материалов. В таблице 1 приведена классификация патентов, описывающих способ интенсификации теплообмена с помощью пористого покрытия, рекуперативные теплообменники на основе пористых покрытий, а также конструктивное исполнение поверхности теплообмена и способ охлаждения для теплонагруженных поверхностей теплообменных аппаратов.

Таблица 1.1 – Патенты, описывающие способ интенсификации теплообмена с помощью пористого покрытия

№	№ патента	Описание способа интенсификации теплообмена с помощью пористого покрытия	Авторы патента, авторского свидетельства
1	2	3	4
1	а.с. №1247250 (СССР,1985)	Поверхности теплообмена, содержащие ребра, на боковую поверхность которых нанесено пористое покрытие, переменная толщина которого монотонно увеличивается от основания ребра к вершине.	Б.Н Букин, А.Ф. Заленев, Г.Р. Круглов, АВ. Тихонов, Ю.В. Шнайдер
2	а.с. № 731263 (СССР, 1978)	Теплообменное устройство с пористыми вставками, которые устанавливаются в каналах с перекрытием сечения и выполнены с переменной по длине канала пористостью	Ю.И. Ланда, Д.М. Боуш, В.М. Вольнер

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
3	а.с. № 808824 (СССР, 1979)	Пластинчатый теплообменник, в корпусе которого установлен пакет пористых пластин	Синцов А.Л., Поляев В.М., Куропатенков А.В., Киселев А.И.
4	а.с. № 1190181 СССР, 1984)	Капиллярно -пористая структура контактирует с поверхностью теплообмена, в зоне контакта имеет большую пористость, чем остальная поверхность, что позволяет повысить критические тепловые нагрузки при кипении жидкости	Толубинский В.И., Антоненко В.А., Иваненко Г.В., Кудрицкий Г.Р.
5	а.с. № 375460 (СССР, 1973)	Теплообменник содержит кожух с теплообменным каналом, снабженным на внутренней поверхности тепловоспринимающей стенки капиллярно –пористым покрытием из металлических сеток	Мауэрман М.М., Ревякин А.В., Тарасов В.С.
6	а.с. № 1272085, (СССР, 1985)	Повышение эффективности теплообмена путем обеспечения равномерности распределения воды в объеме градирни, которое достигается снабжением дополнительными продольными многослойными сетками и поперечными перегородками из этих сеток	Генбач А.Н., Генбач А.А.
Рекуперативные ТО на основе пористых покрытий			
7	патент № 36881083 (США, 1972)	Оребренные поверхности теплообменника покрываются пористым материалом	-
8	патент № 251842 (ФРГ, 1982),	Пористое покрытие, нанесенное непосредственно на поверхность теплообменника	-

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
9	№ 926502 СР, 1982)	Теплообменник «труба в трубе» содержит наружную трубу и внутреннюю трубу с наружным спиральным оребрением из спеченного металлического порошка	Неганов Б.С.
10	А.с. № 504913 (СССР, 1976)	Охлаждающую поверхность располагают внутри пористой проницаемой плиты с целью повышения экономичности работы сублимационного конденсатора	Балахонова В.И., Еременко В.А., Новиков П.А., Смольский Б.М., Щербаков Л.А.
11	А.с. № 547585 (СССР, 1977)	Для оптимизации парогенерации и пароперегрева в камере установлены с зазором два слоя пористых пористой металлокерамики	Васильев Л.Л., Расин О.Г.
12	А.с. № 644997 (СССР, 1979)	Внутри корпуса парогенератора установлен нагреватель с плотно прилегающей по его периметру пористой обечайки из металлокерамики	Павленко В.И., Ясь Д.С., Мерций С.Д., Шевченко А.П.
13	А.с. № 918760 (СССР, 1982)	Для повышения надежности конденсатора, внутри полости которого устанавливаются перфорированный экран и пористая перегородка	Майоров В.А.
14	А.с. № 872937 (СССР, 1982)	ТЭ, содержит пакет перфорированных пластин, чередующихся с проставками, которые покрыты снаружи пористым материалом	Алексеев В.П., Заблоцкая Н.С., Сотников А.А.
15	А.с. № 2900430 ФРГ, 1981)	Вязаная металлическая сетка из теплопроводных частиц	-

Продолжение таблицы 1.1

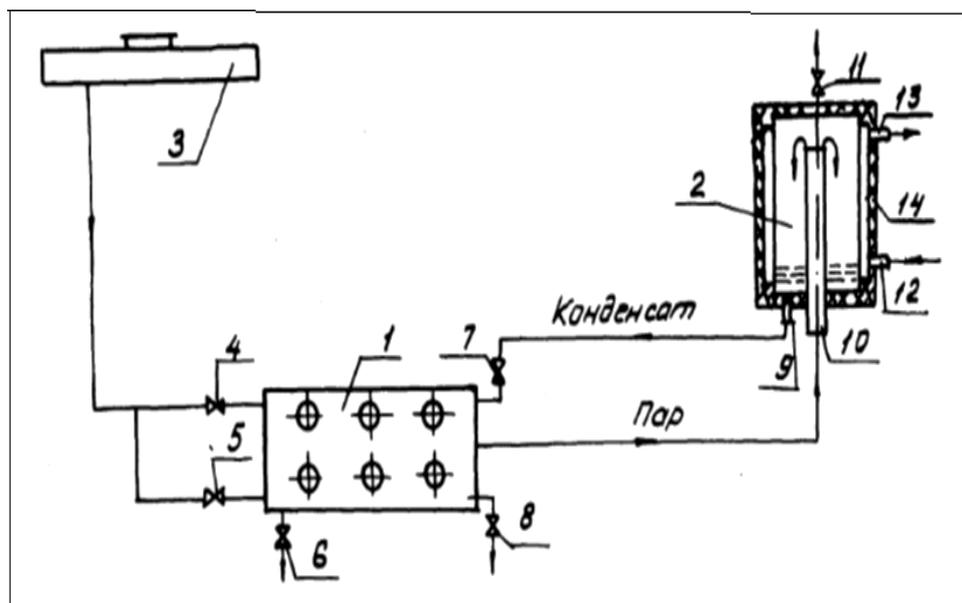
1	2	3	4
16	патент № 4291758 (США, 1981)	Спаянная засыпка из мелкозернистого материала	Fujii M., Ogawa Y., Morihiro Y.
Конструктивное исполнение поверхности теплообмена			
17	патент № 486205 (СССР, 1975),	Устанавливаются выемки и каналы под пористым покрытием поверхности теплообмена	Малюс-Малицкий К.П., Сальников В.Н., Удрис Э.П.
18	А.с. № 712641 (СССР, 1980)	ТЭ, содержит пластину с многослойным оребрением в виде шаров. Для повышения компактности и интенсификации теплообмена шары в смежных слоях выполняются разного диаметра, причем диаметр шаров четных слоев равен 0,7 от диаметра шаров нечетных слоев	Берегуля И.С.
19	Патент № 4359086 США, 1982)	На поверхности теплообмена делаются отверстия, образующие слой из полостей напыленных тонким пористым покрытием	Sanborn D. F., Holman J. L.M., Ware C.D.
20	а.с. № 1183822 СССР, 1985)	Наличие переменной пористости, чередующееся по длине и высоте	Зарипов В.К., Шаповал А.А., Семена М.Г., Гершуни А.Н.
21	а.с. № 1223020 СССР, 1985)	Охлаждаемая поверхность имеет переменную пористость	Синцов А.Л., Поляев В.М., Куропатенков А.В.
22	А.с. 836501 (СССР, 1981)	внутренний корпус кожухотрубного теплообменника имеет участки, в котором чередуются в последовательном порядке конфузорные и диффузорные теплоотдающие и	Менжук В.Н., Куриленко А.А.

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3	4
		теповоспринимающие поверхности	-
23	Патент RU2 433 949 C1 (РФ, 2011)	Способ формирования пористого покрытия из наночастиц	Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Паршин Н.Я., Турчин В.Н., Игнатъев Д.Н., Штефанов Ю.П.
24	Патент RU2727406C1 (РФ, 2019)	Способ формирования нанорельефа на теплообменных поверхностях изделий	Кузма-Кичта Ю.А., Иванов Н.С., Киселев Д.С., Лавриков А.В.
Способ охлаждения для теплонагруженных поверхностей			
25	А.с. 550425 (СССР, 1977)	Способ охлаждения теплонагруженных поверхностей путем подачи на них газо-жидкостной смеси	Андоньев С.М., Андоньев В.С., Новохацкий Е.М., Грицук Л.Д.
26	А.с. № 407175 (СССР, 1974)	Способ испарительного охлаждения теплонагруженных элементов металлургических печей	Новохацкий Е.М., Грицук Л.Д., Андоньев В.С., Язев В.А.
27	Патент США № 3508606	Теплообменник, состоящий из овальных труб, перегороденных внутри пористой вставкой	-
28	Патент Англия № 1119533	Трубы теплообменника состоят из пористой наружной трубчатой оболочки и внутренней сплошной металлической трубы, имеющей продольные гофры	-
29	Патент США № 3415316	Блочный теплообменный элемент, со слоем теплопроводного пористого материала	-

1.3 Экспериментальные установки для исследования теплообмена в капиллярно-пористой системе

На рисунке 1.3 представлен экспериментальный стенд авторов [19] для изучения процессов тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых системах охлаждения. На этом стенде проведены испытания с охлаждающим элементом в виде секций, имеющих капиллярно-пористую структуру и установленные на реальном объекте.



1 – охлаждающий элемент; 2– конденсатор; 3– бак питательной вода; 4,5 – игольчатые вентили нижней и верхней питающей артерий; 6,7,8– зажимы; 9– патрубок слива конденсата; 10– патрубок для входа пара; 11– трубка для удаления воздуха; 12, 13– патрубки для подвода и отвода циркуляционной воды; 14– тепловая изоляция

Рисунок 1.3 – Схема экспериментальной установки [19]

Авторы работы [20] изучали влияние давления в капиллярно-пористых системах охлаждения на процесс теплообмена. На рисунке 1.4 показана схема измерений в испарительно-конденсационной системе охлаждения.

Влияние высоты расположения поверхности нагрева на свойства капиллярно-пористых систем изучалось на установке, внешний вид которой приведен на рисунке 1.5, а поперечный разрез представлен на рисунке 1.6.

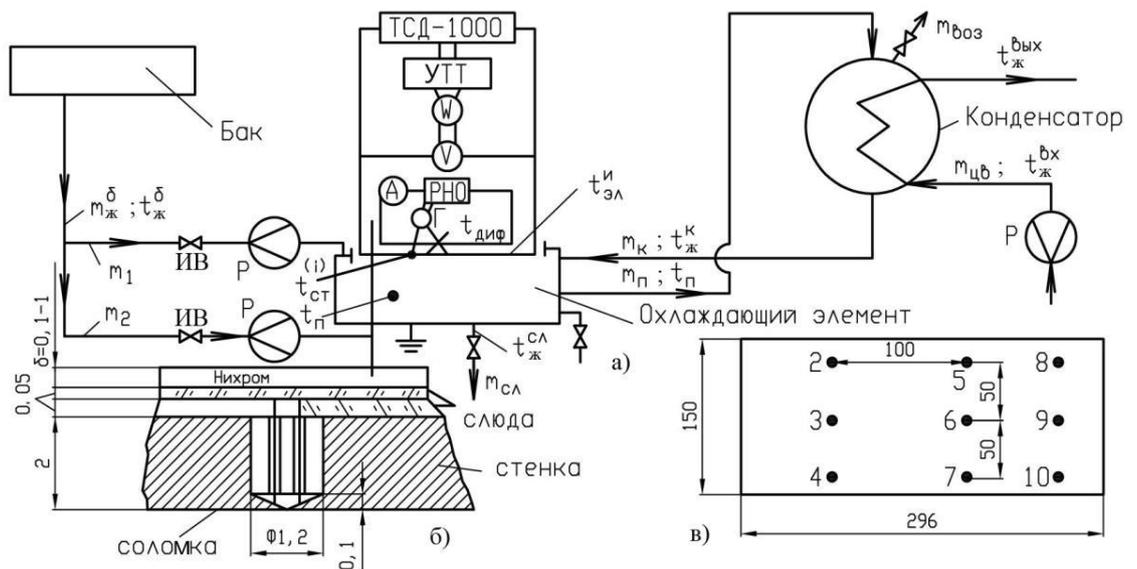


Рисунок 1.4 - Замкнутая испарительно – конденсационная капиллярно – пористая система охлаждения и схема измерений [20]

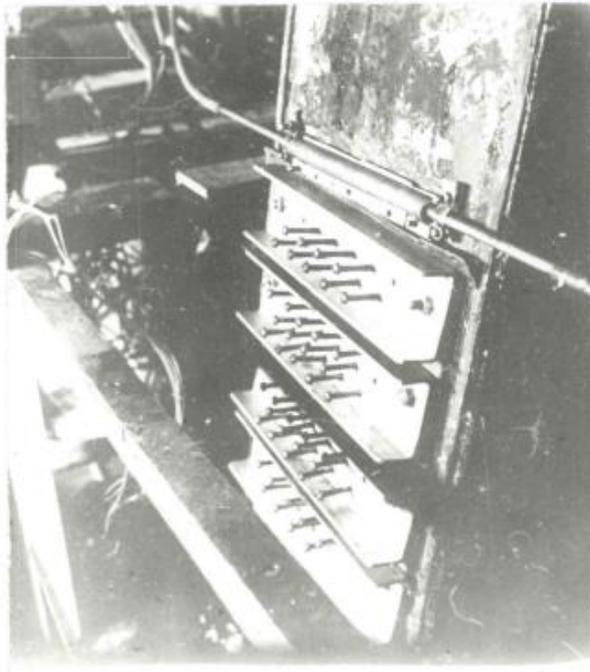
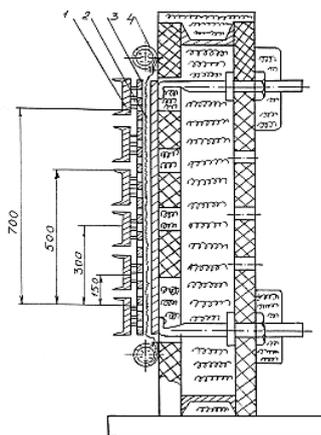


Рисунок 1.5 - Внешний вид экспериментальной установки для исследования влияния высоты нагревателя и степени прижатия капиллярно-пористой структуры [20]

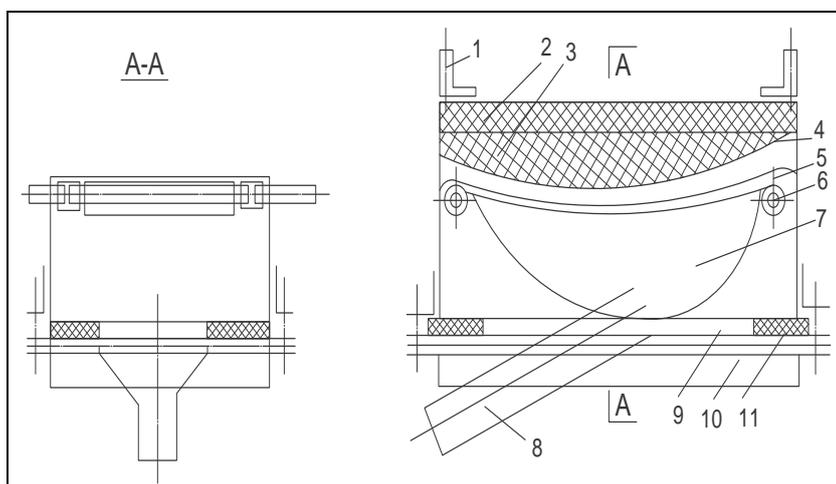


1 – прижимная планка; 2 – сетчатая структура; 3 – прижимная пластина; 4 – трубчатая артерия.

Рисунок 1.6 – Поперечный разрез экспериментальной установки [20]

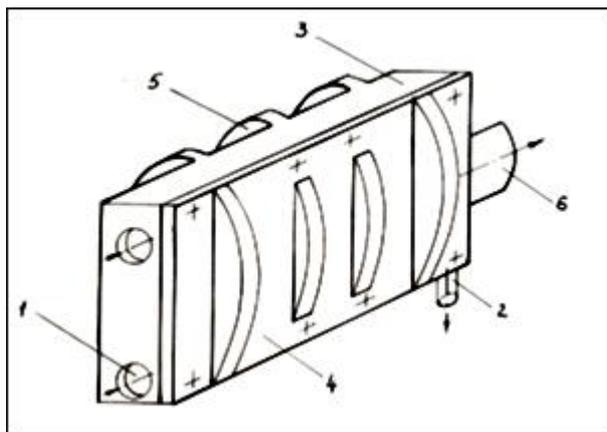
«На основе проведенных фундаментальных исследований на моделях и натуре теплогидравлических характеристик теплопередачи получена требуемая информация для разработки, проектирования, инженерного расчета и эксплуатации капиллярно – пористых систем в различных тепловых энергетических установках» [20, с. 5].

Авторами работы [21] Исследовался кризис теплообмена при кипении воды в сетчатых пористых структурах. На рисунке 1.7 изображена экспериментальная установка с искривлённой поверхностью, работающая под высоким давлением. Внешний вид теплообменника приведен на рисунке 1.8.



1 – электрод, 2 – асбестовая плита, 3 – асбестовая пушонка, 4 – нихром, 5 – сетчатая структура, 6 – труба подвода жидкости, 7 – паровой канал, 8 – патрубок отвода пара, 9 – корпус, 10 – крышка, 11 – прокладка .

Рисунок 1.7 – Схема экспериментальной установки с искривленной поверхностью, работающая под высоким давлением [21]



1– окно для подвода жидкости; 2 – патрубок отвода жидкости; 3– корпус; 4–крышка; 5 – ребра жесткости; 6 – патрубок отвода пара.

Рисунок 1.8 – Внешний вид теплообменника [21]

Авторами работы [22] также исследовалось влияние ориентации теплоотдающей поверхности, схема которой приведена на рисунке 1.9. Принятые на рисунке 1.9 обозначения: а, б – подвод жидкости осуществляется артерией, в, г – «сифонный» подвод жидкости: β – угол между поверхностью охлаждения и силой гравитации [22]

На рисунке 1.10 показана экспериментальная установка для визуализации процесса, в которой подвод жидкости осуществляется массовыми и капиллярными силами.

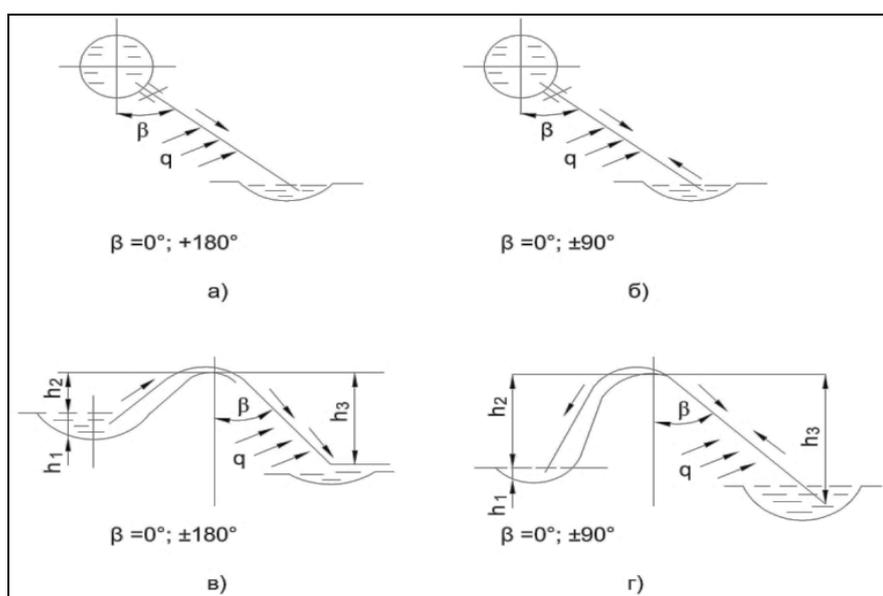
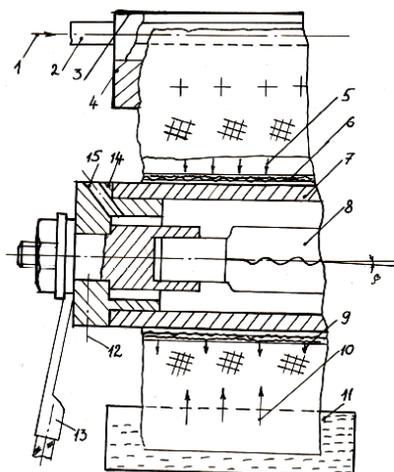


Рисунок 1.9 – Схема для исследования влияния ориентации теплоотдающей поверхности [22]



1- подвод жидкости; 2 - трубка; 3 - артерия; 4 -прижим; 5 - фильтрация охлаждающей жидкости; б - капиллярно-пористая структура; 7 - фарфоровая трубка; 8 - йодная кварцевая лампа; 9 - избыток жидкости; 10-нижний подвод жидкости; 11- сборник; 12 - фиксирующий штифт; 13 - электропровод; 14- контакт; 15 - канал для охлаждения лампы.

Рисунок 1.10 – Экспериментальная установка для визуализации процесса [19]

Известна система охлаждения [23], когда по поверхности стекает тонкая пленка воды, обдуваемая воздухом. В системе содержится малое количество воды, что уменьшает опасность взрыва. Такое охлаждение является эффективнее воздушного. Сложность схемы в таком конструктивном исполнении не обеспечивает охлаждение стенок металлургических агрегатов. Также при высоких тепловых потоках создание устойчивой пленки на поверхности является затруднительным.

«Следующим этапом разработок теплообменника явилось исследование капиллярно-пористой структуры. Для расширения отвода тепловых нагрузок применяется управление процессами теплопередачи. Для этого исследуется разделение энергии кипящего потока в структуре на энергию тепловой волны и энергию парового потока» [24].

Для этого имитируется процесс взрывообразного рождения парового зародыша. «Следующим шагом по управлению теплообменом является совместное действие массовых и капиллярных сил для транспорта охладителя, создающих недогрев и вынужденную скорость потока в структуре» [25].

Способность системы на порядок увеличивать критические тепловые нагрузки позволяет выделить их в отдельный класс теплообменников, которые отличаются высокой форсировкой и интенсивностью теплопередачи. Кроме того, массовые силы позволяют управлять формой, очертаниями и интенсивностью генерации внутренних характеристик кипящего потока в капиллярно- пористой структуре и интенсифицируют процессы теплопередачи

[26, 27]. Разработанные физико-математические модели процессов кипения в пористой структуре дают возможность описания всех режимов кипения (начального, переходного, развитого и кризиса (предельного)) [28-31].

Критериальное уравнение для расчета теплообмена кипящих и пенных потоков в пористых структурах [32], полученное путем обобщения опытных данных на основе теории подобия, моделирования и аналогий, позволило создать инженерную методику расчета. Пример расчета такой системы применительно к теплообменнику, выполненному в виде кессона приведен в приложении А [33, 34].

Необходимо разработать капиллярно-пористый теплообменник, выполненный в виде кессона и предназначенный для обеспечения взрывобезопасности работы плавильных агрегатов в металлургии, который будет содержать малое количество жидкости. Для случая прогара элемента охлаждения, исключается попадание воды в расплав, приводящее к взрыву печи, как это может случиться при водяном и испарительной систем охлаждения.

Современные системы кессонирования гарниссажной футеровки (рис. 1.11) и холодильника доменной печи (рис. 1.12) не решают проблем взрывоопасности.

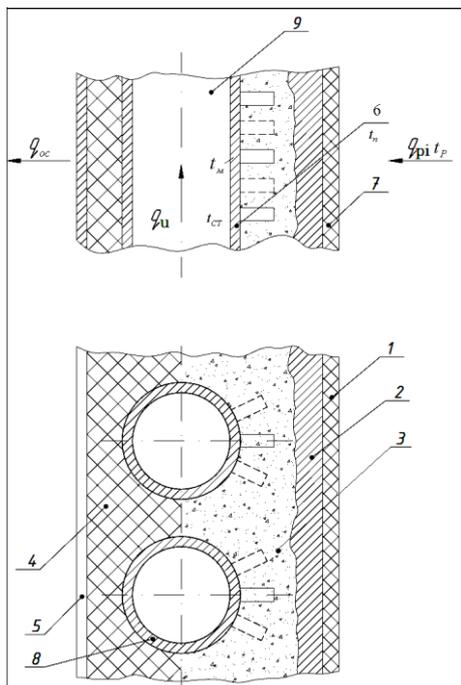


Рисунок 1.11 – Кессонированная гарниссажная футеровка [33]

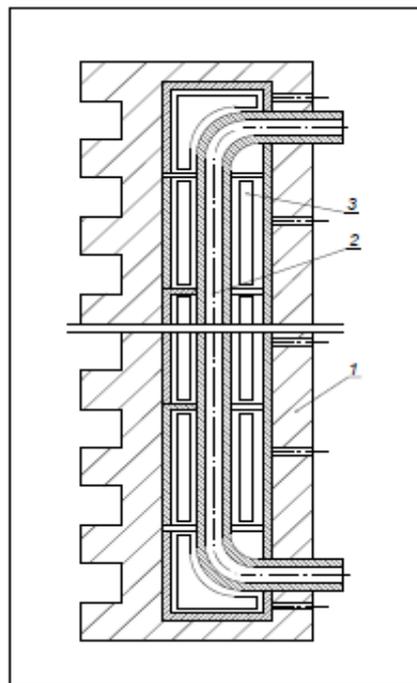


Рисунок 1.12 – Холодильник доменной печи

На рисунке 1.11 показана кессонированная гарниссажная футеровка, которая состоит: 1– пленка расплава; 2– гарниссаж; 3 – огнеупорная набивка;

4 – тепловая изоляция; 5 – металлическая обшивка; 6 – изменение температуры по толщине футеровки; 7 – изменение вязкости в гарниссажном слое; 8 – стенка кессона; 9 – кессон; q_{pi}, q_u, q_{oc} – удельные тепловые потоки, подводимые расплавом, отводимые охладителем и окружающей средой; t_n, t_m, t_{CT} – температуры пленки расплава, металла кессона и стенки. На рисунке 1.12 показан холодильник доменной печи, который состоит: 1 – чугунная плита; 2 – охлаждающая труба; 3 – термокамеры.

1.4 Различные подходы к механизму процесса парообразования

1.4.1 Механизм процесса парообразования при пузырьковом кипении

Подход авторов [35-40] к решению задачи образования паровой фазы с точки зрения классической молекулярно-кинетической теории позволил получить выводы, которые не являются строгими, как в статистической флуктуационной теории, но приводят к достаточно надежным и, что важно, более простым результатам.

Реальные технические поверхности имеют несмачиваемые углубления, которые являются центрами кипения. По различным причинам на этих поверхностях имеются участки с ослабленным молекулярным сцеплением между жидкостью и твердым телом.

Авторами в работе [41] показано, что заполнение впадин жидкостью полностью является практически невозможным. В этих впадинах возникает рост парового пузыря, так как там имеется газовый или паровой зародыш с минимальным или критическим радиусом кривизны, по величине равным радиусу впадины.

В работе [42] показано, что существование несмачиваемых впадин, заполненных газом или паром, и температурного перегрева поверхности нагрева является необходимым, но недостаточным условием для начала роста парового пузыря на поверхности нагрева. Для роста парового зародыша необходимо обеспечение условия достаточного теплоподвода к нему. Паровой пузырь должен быть окружен слоем перегретой жидкости определенной толщины.

Авторы Мур и Меслер [43] впервые обнаружили температурные флуктуации под растущими паровыми пузырями. Их существование было подтверждено впоследствии целой серией экспериментальных работ [44-50], которые сыграли важную роль в понимании механизма теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей. Авторы показали при помощи миниатюрной термодпары, что температура поверхности вблизи центра парообразования падает за время роста парового пузыря τ_p (I) до некоторой минимальной величины (рис. 1.13) и затем в «период молчания» центра парообразования τ_m восстанавливается до первоначального значения (II). Экспериментально показано, что наличие центра парообразования на поверхности резко снижает

температуру стенки в центре парообразования, повышение же частоты отрыва паровых пузырей приводит к менее заметному уменьшению температуры стенки. На рисунке 1.14 показаны Особенности изменения температуры поверхности под паровым пузырем.

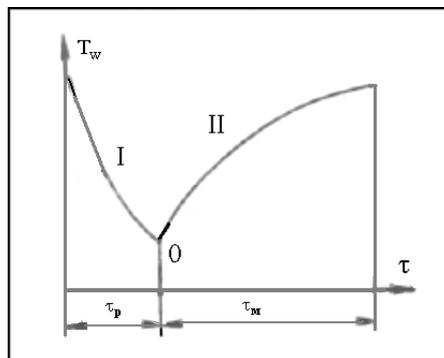


Рисунок 1.13 - Температурные флуктуации под растущим паровым пузырем

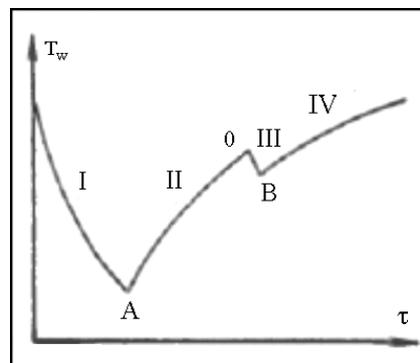


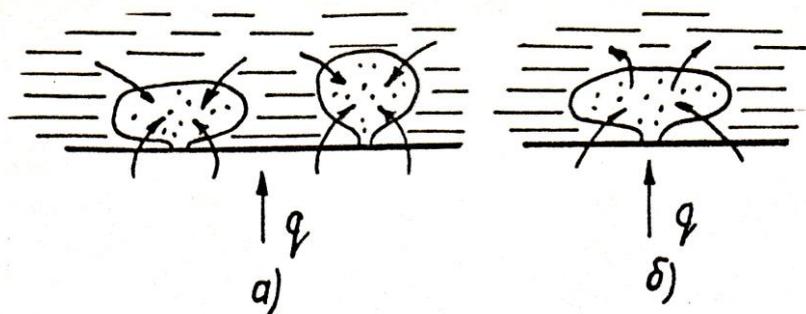
Рисунок 1.14 - Особенности изменения температуры поверхности под паровым пузырем

Авторами Купером М. и Ллойдом А. [47, 48] были проведены эксперименты по измерению профиля температур в четырех точках под растущим паровым пузырем при кипении толуола на стеклянной поверхности нагрева (рис. 1.14). Автору Х. Джауреку [51] удалось провести эксперименты с испаряющимся микрослоем для жидкости. Авторы работы [52] изучали процесс испарения микрослоя, применяя лазерную интерферометрию.

Для описания процесса кипения жидкостей в большем объеме имеется множество моделей, объясняющих механизм теплопередачи. Однако все они могут быть сведены к основным двум видам: модель микрослоевого испарения жидкости в паровой пузырь и конвективная модель.

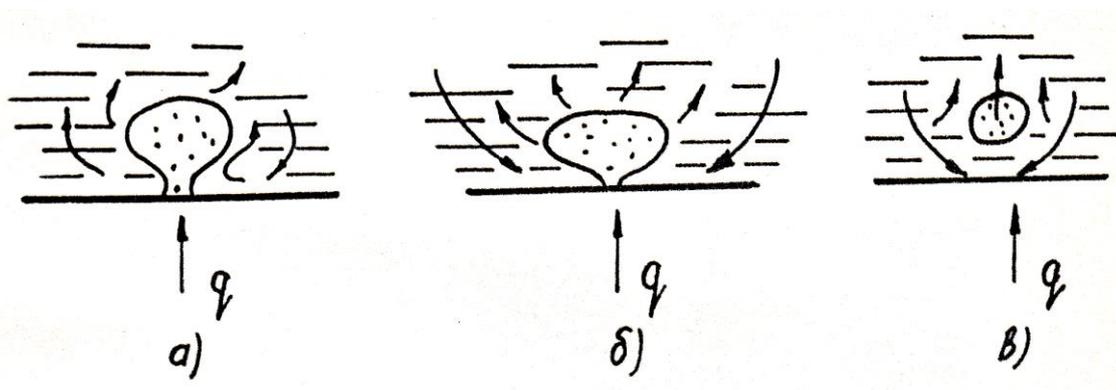
В первой модели (рис. 1.15 а, 1.15 б) перенос теплоты осуществляется теплотой фазового превращения. Тепловой поток подводится как к основанию парового пузыря, так и со стороны перегретого пограничного слоя жидкости, окружающего пузырь. При достижении Достигнув отрывного диаметра, пузырь поднимается в объем жидкости. Если объем жидкости недостаточно нагрет до температуры насыщения, то возможна работа пузыря в режиме "тепловых трубок", когда в основании пузыря происходит испарение жидкости, а на вершине - конденсация. Сторонниками такой модели в хронологической последовательности являются Д.А. Лабунцов (1960 г.), Мур и Меслер (1961 г.), Хендрикс и Шарп (1961 г.) Роллис и Джаурек (1966 г.), Купер (1969 г.) и другие исследователи. В конвективной модели предполагается, что теплопередача определяется турбулизацией жидкости вблизи поверхности нагрева, которая вызывается движением паровых пузырей, Иллюстрация таких моделей

представлена на рисунке 1.16. авторами [53]. В механизме теплообмена микроконвекцией (рис. 1.16 а) при росте и схлопывании пузырей происходят беспорядочное движение (турбулизация) жидкости в пристенном пограничном слое. Авторами такого подхода являются Якоб (1936 г.), Кружилин Г.Н. (1948 г.), Кутатедадзе С.С. (1951 г.), Бенков (1968 г.). В модели парожидкостного обмена, предложенной Форетером и Грейфом (1999 г.) (рис. 1.16 б) используется аналогия Рейнольдса, когда пузырьки в период роста вызывают периодическую смену горячей жидкости у стенки на холодную из объема. Модель Хена и Гриффитса (1966 г.) (рис. 1.16 в) предполагает нестационарное охлаждение стенки при передаче тепла теплопроводностью от стенки к холодной жидкости, подтекающей после отрыва пузыря.



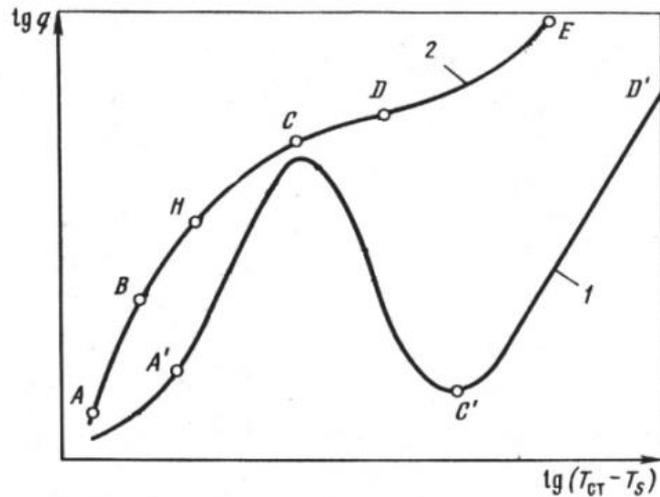
а) насыщенная жидкость; б) недогретая жидкость [53]

Рисунок 1.15 - Модель микрослоевого испарения жидкости



а) микроконвекция; б) парожидкостный обмен; в) нестационарное охлаждение поверхности [53]

Рисунок 1.16 - Конвективная модель пузырькового кипения



1 – на гладкой поверхности; 2 – на поверхности с капиллярно-пористым покрытием [54].

Рисунок 1.17 – Обобщенные кривые кипения [54]

На рисунке 1.17 приведены сравнение обобщенных кривых кипения на гладкой поверхности (1) и на поверхности с пористым покрытием из спеченных металлических частиц (2). «Современные исследования показывают, что на пористой поверхности вскипание жидкости происходит при тепловых потоках (точка А), значительно меньших, чем на гладкой (точка А'). В случае покрытия с высокой проницаемостью и высоким коэффициентом теплопроводности имеет место кривая кипения ABCDE. Она лежит выше кривой кипения, полученной на гладкой поверхности (рис. 1.17). Точка E — точка первого кризиса. Как правило, первый кризис кипения на пористой поверхности выше, чем на гладкой поверхности. Обычно на кривой ABCDE можно выделить три участка. Сначала наблюдается резкий рост q при увеличении температурного напора (ABC), затем наклон уменьшается, кривая становится почти горизонтальной (CD), и, наконец, при больших температурных напорах наклон вновь несколько увеличивается» [54].

1.5 Эффективные способы охлаждения поверхностей нагрева высокофорсированных установок

Проточное охлаждение, транспирационное или пористое (внутеннее), охлаждение путем уноса массы и другие применяются в форсированных устройствах. К проточному охлаждению относят воздушное, жидкостное, испарительное, газо-жидкостное, частным случаем которого рассматривается воздушно-водоиспарительное охлаждение. В металлургической промышленности наиболее широко распространено водяное, испарительное и воздушное охлаждение [55, 56]. Широко используется воздушное охлаждение,

если удельные потоки достигают 2000 Вт/м^2 . Но для больших тепловых нагрузок воздушное охлаждение становится малоэффективным из-за небольшой величины теплоемкости воздуха, а также малого коэффициента теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи для воздуха при искусственной турбулизации пограничного слоя можно увеличить путем закрутки потока, применением шероховатостей, вставок, использованием эффекта центробежных сил и других видов [57]. Однако и эти эффективные формы теплообмена не могут обеспечить отвод удельных потоков на современных агрегатах.

При охлаждении водой коэффициент теплоотдачи примерно на два порядка выше, чем при воздушном охлаждении, благодаря этому возможно поддержание более низкой температуры охлаждаемых поверхностей.

В металлургических печах это обуславливает образование на стенках кессона гарниссажного слоя, обеспечивая компанию работы агрегата.



Рисунок 1.17 – Медные холодильники и кессоны для водяного охлаждения различных металлургических печей

Для создания устойчивого слоя гарниссажа целесообразно очистить поверхность кессона от окислов с нанесением слоя набивной массы. Это обеспечит хороший тепловой контакт с поверхностью и необходимый температурный перепад. К поверхности охлаждения привариваются шипы, способствующие улучшению сцепления огнеупорной массы и повышают коэффициент теплопроводности.

До 1960 года охлаждение отдельных элементов металлургических печей осуществляли технической водой: через полость охлаждаемой поверхности проходила холодная вода, отбирая тепло. Малый нагрев воды требовал ее больших расходов и сооружения мощных водозаборных устройств, оборудования для очистки, перекачки охлаждаемой воды в случае обратного

водоснабжения. Содержание солей приводило к отложению шлама, накипи и частому прогару охлаждаемых элементов.

Низкая температура на выходе исключала возможность утилизации уносного тепла водой, хотя отвод тепла на один печной агрегат составлял 10-15 МВт. Система охлаждения удорожается за счет громоздких охладительных устройств при оборотном водоснабжении или при ее очистке в случае прямого тока. Следует учитывать расход электрической энергии на прокачку воды, величина которой может достигать до 250-300 т/ч на один агрегат.

Способ охлаждения металлургической печи с помощью горячей воды был предложен инженером В.Л. Поляковым в 1930 году.

Вода, нагретая до температуры примерно 70°C, предварительно химически очищается и подается в охлаждаемый элемент и нагревается до 95°C. Далее эта вода может быть использована для горячего водоснабжения. При использовании горячей воды можно сократить расход электроэнергии в несколько раз для ее перекачки, что уменьшает расход воды. Химическая очистка предохраняет поверхности от образования накипи. Описанная схема чувствительна к повышению нагрузок печи, потому что при этом может происходить вскипание воды.

Для охлаждения металлургических печей советскими инженерами С.М. Андоньевым и Г.Е. Крушелем (а.с. 70344) было предложено испарительное охлаждение.

Известна замкнутая система охлаждения с выносным испарителем и высокотемпературным теплоносителем [58]. Одним из видов внутреннего охлаждения можно рассматривать транспирационное. Оно основывается с использованием пористых материалов и применяется с помощью продавливания охладителя через пористую стенку [59]. Такой способ охлаждения стенок устройств является сложным с точки зрения практического осуществления и использования.

Стенки могут быть защищены с помощью аблирующих материалов, в составе которых содержатся синтетические органические вещества. При повышении температуры они разлагаются и выделяются углерод и метан. Этот факт является причиной образования слоев пористого кокса на поверхности.

Он обладает низкой теплопроводностью и высокой жаростойкостью, служит хорошей тепловой изоляцией аблирующего вещества, а также уменьшает скорость его разложения [60]. Но в металлургических печах пористый слой кокса может активно реагировать с расплавом, что является нежелательным.

Износ огнеупорных футеровок (термостойких покрытий) обуславливается в первую очередь их коррозией, т.е. химическим взаимодействием расплава с огнеупорным материалом. Утончение футеровки, потеря прочности и статической устойчивости приводит к частичному оголению в огневое пространство печи металлической поверхности. Это приводит к тяжелым

условиям работы металла стенки и возможен ее прогар. При подборе аблирующего и термостойкого инертного покрытия, можно было бы полностью исключить наружное охлаждение.

Из существующих видов охлаждения и других возможных перспективных систем охлаждения для металлургических агрегатов более применимой может быть испарительная система охлаждения. Но ее недостатком является возможность прорыва кипящей жидкости в расплав и дальнейшим разрушением печи. Капиллярно-пористая система охлаждения была разработана авторами [61, 62] с учетом указанных недостатков.

Применение волнистой шероховатости в каналах является еще одним способом интенсификация теплообмена [63, 64].

Коэффициент теплоотдачи путем конвекции в циклонных предтопках, т.е. во вращающихся потоках достигает высоких значений и рассчитывается по формуле:

$$\alpha_k = 3,4 W_v,$$

где W_v - скорость вторичного воздуха при выходе из горелок (сопл), м/с [65].

Для спиральных ребер в закрученном потоке теплообмен интенсифицируется в 1,4 – 2 раза, а для прямых ребер может быть увеличена в 1,1– 1,6 раз .

Интенсификация теплообмена за счет применения искусственной шероховатости (проволочные турбулизаторы - пружины) позволяет в 2,5 – 3 раза увеличить теплообмен в пучках труб, а в случае применения сеток с шириной ячейки $(1,4,6,10) \times 10^{-3}$ м теплообмен улучшается в 1,4– 1,6 раза.

Приведен пример интенсификации теплообмена в крупномасштабном производстве.

Трубная система воздухоподогревателя для блока 800 Мвт при сжигании канско-ачинских углей весит 2500 т. Сравнение исходного проектного варианта шахматного пучка гладких труб с трубами со спиральными пластинчатыми вставками и волнистыми трубами типа конфузур-диффузур приведено в таблице 2.

Применение продольного оребрения и гладких вставок при $F_{op}/F_{гл} = 4$ позволило уменьшить на 34% удельную поверхность, а полная поверхность увеличилась в 2,5 раза [63]. Таким образом, экономия поверхности для труб со вставками составляет 33%, для волнистых труб – 34%, а число труб уменьшается в 3 раза [66, 67].

Приведены примеры эффективности охлаждения с помощью газожидкостных дисперсоидов в литературе [68].

При воздушном охлаждении отводится тепло плотностью 23 кВт/м² при температуре воздуха 180°C, а воздушно-водоиспарительное охлаждение позволяет снять поток 140 кВт/м² при 70°C [69].

Таблица 2 – Сравнение гладких труб с трубами со спиральными пластинчатыми вставками и волнистыми трубами

Размеры труб, мм	40×1,5	40×1,5	51×1,5
Скорость газов, м/с	11	8	8
Скорость воздуха, м/с	5,3	6	7,7
Коэффициент теплоотдачи Вт/м ² К :			
с газовой стороны	35,8	28,4	53,7
с воздушной стороны	50,4	54,2	54,5
Число труб	2×115×10 ³	2×167×10 ³	82×10 ³
Поверхность, м ²	200×10 ³	147×10 ³	145×10 ³
Потери давления, Па:			
по газу	57	53	38
по воздуху	37,5	39,5	46,7
Относительные величины, %:			
Поверхность нагрева	100	77,5	66
Число труб	100	146	36
Общая площадь	100	159	146
Общий объем	100	80	103

Коэффициент теплоотдачи при испарении водяных сфероидов находится в интервале 0,29–0,35 кВт/м² К. Теплоотдача при течении двухфазных потоков воздуха с распыленной водой в горизонтальных трубках в три раза больше, чем при воздушном охлаждении (скорости изменялись от 1 до 30 м/с).

Авторами [70-72] рассмотрен процесс теплообмена и его интенсификации в псевдооживленном слое.

Механизм процесса кипения в стекающих жидкостных пленках представляется следующим образом. В пограничном слое (до $0,06 \times 10^{-8}$ м) за счет перегрева по сравнению со всей массой жидкости, создаются условия для развития паровых пузырей, который растут и отрываются, лопаются или омываются текущим потоком [73]. При росте и отрыве паровых пузырей происходит усиленное перемешивание жидкости в пристенном слое. В местах

отрыва пузырей возникает пульсирующее течение жидкости, как при кипении в большом объеме [74] и в стесненных условиях [75] приводящее к разрушению пограничного слоя, снижению его термического сопротивления и увеличению конвективной составляющей переноса тепла и массы.

Основной причиной влияния на теплоотдачу является удельная плотность теплового потока. Влияние плотности орошения является значительным меньшим, чем в случае поверхностного кипения, но для больших значений чисел Рейнольдса устанавливается турбулентная теплопроводность пленки, вследствие возникающих турбулентных вихрей, приводящих к увеличению турбулентной вязкости и возрастанию толщины пленки. При стекании пленок по вертикальным поверхностям на паровые пузыри действует масса текущей жидкости, увлекающая пузыри с малыми отрывными диаметрами в виде цепочек пара. После достижения определенной плотности теплового потока локальные цепочки пузырей исчезают, вся поверхность покрывается пузырьками, пленка теряет прозрачность. С помощью киносъемок установлено, что новые пузыри возникают через время, равное $0,8 \times 10^{-3}$ с после отрыва. При сливании и лопании отдельных пузырей образуется капля жидкости размером $d=0,1 \times 10^{-3}$ м. Диаметр образовавшегося пузыря в несколько раз превышает толщину пленки, он вырастает взрывообразно и жидкость интенсивно перемешивается. Частота образования и отрыва пузырей при кипении в стекающей пленке в 10–16 раз превышает частоту их образования в неподвижной жидкости и составляет $f=50–1500$ с⁻¹, что связано с касательными направлениями, возникающими при давлении пузыря в пленках.

Меньшая интенсивность в тонких стекающих пленках при развитии пузырькового кипения жидкости, по сравнению с кипением в большом объеме объясняется тем [76], что конвективная составляющая переноса тепла, осуществляемая теплопроводностью через пограничный слой жидкости, переносится в паровые пузыри или испаряется со свободной поверхности. В последнем случае конвективная составляющая пропорциональна $\sim \Delta T^3$, пренебрежимо мала, что снижает темп роста теплового потока. Основная же доля тепла подводится к основанию паровых пузырей и расходуется на испарение в пузыри и пропорциональна $\sim \Delta T^2$ [74, с. 50].

Флуктуации температуры теплогенерирующей поверхности.

«Выявление условий зарождения паровых пузырей является одной из важных и наиболее сложных задач теории теплообмена при кипении. В настоящее время общепризнано, что причиной появления паровой фазы в среде жидкости являются флуктуации плотности, вызываемые хаотическим тепловым движением молекул. Наиболее строгие выводы по образованию паровой фазы получены с помощью статистической флуктуационной теории» [74, с.63].

«Молекулярно-кинетический подход к образованию паровой фазы основан на предположении, что в жидкой фазе всегда существует некоторое

количество молекул, энергия которых значительно превышает среднюю. Столкновение таких молекул с молекулами, обладающими меньшими энергиями, при определенных условиях приводит к образованию активированных групп частиц, каждая из которых ведет себя как одна большая молекула и способна к дальнейшему присоединению других менее активных молекул. При достаточно большом числе молекул в группе последняя может играть роль парового зародыша. (Образование паровой полости в жидкости теоретически возможно и в случае внезапной локальной потери давления.) Анализ условий зарождения паровой фазы в гомогенных и гетерогенных (например, на твердой поверхности нагрева) системах показывает, что образование паровых зародышей предпочтительнее на твердой поверхности нагрева, чем в объеме жидкости. Способность участка поверхности твердого тела к парообразованию может быть охарактеризована энергетическим барьером, который необходимо преодолеть системе, или приращением термодинамического потенциала при переходе от системы без паровой фазы к системе с жизнеспособным зародышем на данном участке поверхности. При этом, чем ниже этот барьер, тем выше вероятность начала парообразования на таком участке» [74, с.65].

«Для зарождения и начала роста парового пузыря на теплоотдающей поверхности, естественно, необходим определенный ее перегрев по сравнению с температурой насыщения» [74, с.67].

Появление жизнеспособного парового зародыша имеет флуктуационную природу и вероятнее всего во впадине с соизмеримыми ему размерами. «После образования жизнеспособного зародыша впадина заполняется паром и с этого момента она может стать устойчивым центром парообразования. Однако для реализации этой возможности необходимо выполнение некоторых условий. В окрестности растущего парового пузыря происходит интенсивный отбор теплоты от поверхности нагрева. Температура стенок впадины, являющейся центром парообразования, при этом уменьшается. После отрыва пузыря от устья впадины новая порция жидкости проникает во впадины и начинает нагреваться от соприкосновения со стенкой, температура которой постепенно возрастает» [74, с.70] Жидкость, которая проникает во впадину, не всегда достигает ее дна. «Поступление жидкости во впадины прекращается, как только стенка впадины и жидкость нагреваются до температуры, при которой давление пара жидкости уравнивает капиллярное давление «всасывания» жидкости во впадину. С этого момента проникшая во впадину порция жидкости начинает из нее удаляться. В тех случаях, когда жидкость успевает проникнуть во впадину на такую глубину, что размеры парового пространства под нею оказываются меньшими, чем размер жизнеспособного зародыша при заданном перегреве, впадина перестает быть центром парообразования. Очевидно, что интенсивность отбора теплоты от поверхности нагрева при росте парового пузыря и соответствующее этому падение температуры стенок впадины будут

зависеть от теплофизических свойств материала поверхности нагрева, на которой происходит процесс парообразования» [74, с.71].

«Температурные флуктуации под паровыми пузырями при кипении, по мнению большинства исследователей, связаны с отбором теплоты от поверхности нагрева, причем плотность теплового потока, снимаемая единичным пузырем за время его роста, более чем на порядок выше средней, подводимой плотности теплового потока. Столь высокие значения локальных плотностей тепловых потоков могут быть объяснены лишь с позиций существования под растущим паровым пузырем тонкого, испаряющегося со временем микрослоя жидкости, наличие которого было подтверждено непосредственными измерениями и показано косвенным путем» [74, с.73].

«Таким образом, в основу теории микрослоевого испарения положен экспериментально подтвержденный факт существования под паровыми пузырями при кипении жидкостей на поверхности нагрева тонкого, толщиной несколько единиц, или десятков микрон, испаряющегося во время роста пузыря микрослоя жидкости. Считается, что доля теплоты, идущей на испарение этого микрослоя в паровой пузырь, сравнима с конвективной долей теплоты и должна учитываться в механизме теплоотдачи при кипении» [74, с.75]. «Многие исследователи считают, что убедительным подтверждением такого подхода к механизму теплообмена при кипении является соображение о том, что вследствие малого запаса энтальпии перегретой жидкости, окружающей паровой пузырь тонким слоем при его росте на поверхности, уравнение роста пузыря в объеме жидкости, по крайней мере при средних и повышенных давлениях, неприменимо к случаю роста пузыря на поверхности нагрева» [74, с.76].

Автору Х. Джауреку удалось «наблюдать конфигурации испаряющегося микрослоя при кипении метанола на стеклянной поверхности нагрева с помощью интерференционных методов исследования. Испаряющийся микрослой жидкости имел (в сечении) клиновидную форму, причем в ряде случаев происходило полное испарение этого слоя в районе центра парообразования» [74, с.77]. «Исследования показали, что радиус образующегося при этом «сухого» пятна приблизительно пропорционален корню квадратному из времени роста парового пузыря, причем наиболее интенсивное утончение (за счет испарения) микрослоя происходит в сравнительно небольшой области, прилегающей к «сухому» пятну. Толщины микрослоя вне этой области остаются во времени практически постоянными, что может быть объяснено, очевидно, эффектом подтекания жидкости от периферии к центру основания пузыря» [74, с.78].

«Авторы Купер М. и Ллойд А. следующим образом объясняют различные участки 1 кривой (рис. 1.14). Участок I — падение температуры поверхности за счет интенсивного испарения микрослоя. В точке А микрослой испарился полностью и на участке II происходит увеличение температуры

ввиду низкого значения коэффициента теплоотдачи к пару. Точка О соответствует моменту отрыва пузыря. Более «холодная» жидкость устремляется в освободившееся пространство, понижая температуру поверхности в данной точке (участок III). На участке IV имеет место восстановление температуры поверхности и образование перегретого пограничного слоя» [74, с.80].

При кипении жидкости в тонких пленках в случае приближения теплового потока к критическому состоянию увеличивается число центров парообразования, жидкостные пленки начинают «набухать».

Этот процесс способствует началу взаимодействия паровых пузырей, которые могут разрушиться при маленьких размерах. Большая часть тепла расходуется на процесс испарения в паровые пузыри. При достижении состояния кризиса пленка жидкости, которая распадается на сфероидальные капли, не может смачивать нагреваемую поверхность.

Температура стенки начинает резко возрастать. Увеличение расхода жидкости не приводило к положительным результатам. Кризис наступает в тот момент, когда скорость испарения жидкости превышает скорость ее растекания по поверхности. Происходит высыхание пленки на периферии поверхности и стягиванию ее к центру.

При кипении жидкости в большом объеме [77] высокая интенсивность теплоотдачи объясняется дополнительным переносом массы вещества и теплоты паровыми пузырями из пограничного слоя в объем кипящей жидкости. Механизм процесса следующий.

Подвод теплоты осуществляется путем теплопроводности из окружающего пузырька перегретого слоя жидкости через межфазную поверхность F_{ϕ} и поверхность под пузырьком F_c в основании. Теплота, подведенная к пузырьку, идет на испарение жидкости и работу расширения, т.е. происходит рост пузырьков и их лопание.

С увеличением давления уменьшаются размеры пузырька в момент возникновения и отрыва; увеличиваются число центров и частота отрыва этих пузырей от этих центров. Поэтому коэффициент теплоотдачи с ростом давления увеличивается, однако, для диапазона давлений $(1-100) \times 10^5$ Па это увеличение весьма незначительно [78].

В работах [79–80] высокая интенсивность теплоотдачи при кипении жидкости в большом объеме объясняется турбулизацией пристенного пограничного слоя жидкости, осуществляемая движением паровых пузырей.

Теплота от поверхности нагрева воспринимается только жидкой фазой и отводится при ее испарении в паровые объемы. Теплоотдача интенсифицируется с увеличением частоты отрыва пузырей и плотности парообразования. Таким образом, определяющими факторами авторы считают гидродинамику жидкости и восприятие ею подведенного теплового потока.

В [81,82] рассматривается теоретическое положение, учитывающее микрослоеое испарение жидкости в паровой пузырь, растущий на поверхности нагрева. Считается, что под паровым пузырем в процессе его зарождения и роста образуется интенсивно испаряющийся микрослой жидкости. Тогда суммарная плотность теплового потока q состоит из плотности теплового потока $q_{\text{конв.}}$, передаваемый теплопроводностью из основной массы жидкости, и плотности теплового потока $q_{\text{исп.}}$, расходуемый на испарение жидкости у поверхности нагрева непосредственно в паровой пузырь:

$$q = 10^{-3} \lambda_{\text{жс}}^2 \Delta T^3 / \sigma T_n v_{\text{жс}} + 5 \times 10^{-3} \lambda_{\text{жс}} r g_{\text{жс}} \Delta T^2 / \sigma T_n .$$

Однако, некоторыми авторами подчеркивается, что при давлении ниже атмосферного, в частности для воды, рост пузырьков определяется тепловыми, а не динамическими процессами, поэтому существование микрослоя жидкости под пузырьком не оказывает заметного влияния на рост пузырька и теплоотдачу.

Исследователи проводят анализ дальнейшего развития теории теплообмена при кипении жидкости, где рассматривается пульсирующий микрослой жидкости, непрерывно генерирующий потоки пара. В этом режиме преобладающим в механизме теплообмена является процесс парообразования. Также предлагается гипотеза подтекания холодной жидкости, когда в процессе кипения рост и отрыв парового пузыря от поверхности нагрева сопровождается выталкиванием в основной поток порции перегретой жидкости, объем которой равен объему пузыря и замещением этой порции холодной жидкостью, перемещающейся к поверхности нагрева. По мере увеличения теплового потока возрастает плотность центров парообразования, число сплошных цепочек пузырьков пара. Между этими паровыми образованиями возникают «зоны возвратного течения» жидкости к обогреваемой поверхности. Дальнейший рост тепловой нагрузки приводит к неустойчивости процесса кипения, сокращению количества поступающей к поверхности жидкости и наступлению пленочного кипения с резким возрастанием температуры поверхности.

Вероятно, все описанные механизмы процесса тепломассопереноса при кипении действуют одновременно, а каждый из них вносит свой вклад в общий процесс переноса теплоты.

1.6 Эффективные способы охлаждения металлургических печей

В основу принципа системы испарительного охлаждения заложено использование теплоты парообразования химически очищенной воды с целью отвода теплоты из зоны с высокой температурой для печных агрегатов.

Практически все высокотемпературные агрегаты содержат металлические детали, которые требуют охлаждения. При использовании технической воды как рабочего тела, чтобы отводить тепло, ограничено температурой ее нагрева. Выпадение солей жесткости начинается уже при температуре 48°C, что приводит к резкому снижению теплопроводности из-за образующихся отложений солей жесткости.

В результате повышается температура детали со стороны рабочего пространства печи, приводящее к перегреву и дальнейшему разрушению детали, то есть к аварийным ситуациям. Температура стенки со стороны рабочего пространства печи зависит от теплового потока и теплопроводности стенки (с учетом слоя накипи) и определяется выражением:

$$t_{ст.в} = q \left(\frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_{н}}{\lambda_{н}} + \frac{1}{\alpha} \right) + t_{ст.н} , \quad (1.1)$$

где $t_{ст.в}$ – температура наружной поверхности стенки со стороны нагрева;

$\delta_{ст}$ – толщина стенки детали;

$\lambda_{ст}$ – теплопроводность стенки детали;

$\lambda_{н}$ – теплопроводность накипи;

$\delta_{н}$ – толщина накипи;

α – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки к охлаждающей среде, который в зависимости от плотности теплового потока и конструкции детали может изменяться в пределах от 0,1 до 110 кВт/ м² К.

Плотности тепловых потоков для различных зон различных агрегатов колеблются в широких пределах, так, например: мартеновские печи – 70–950 кВт/м²; доменные печи – 10–450 кВт/м²; нагревательные печи – 10–200 кВт/м².

Исходя из плотностей теплового потока, при толщине стальной стенки 10 мм предельная температура наружной поверхности стенки охлаждаемой водой составляет:

– при $q = 450$ кВт/м² – 210 °С, а при $q = 70$ кВт/м² – 60°C;

– для этих же условий, но при испарительном охлаждении соответственно 240°C и 130°C;

– та же деталь, покрытая накипью при водяном охлаждении соответственно 740°C и 100°C.

Следует также отметить, что влияние температуры стенки сказывается и на увеличении термического напряжения в детали в соответствие с выражением:

$$\sigma = \frac{E \times \beta \times \Delta T}{2(1 - \mu)} , \quad (1.2)$$

где E – модуль упругости, 2×10^6 кгс/см²;
 σ – напряжение, кгс/м²;
 β – коэффициент линейного расширения, 1/К; (12×10^{-6});
 ΔT – перепад температур, К;
 μ – коэффициент Пуассона, равный 0,3.

При циклическом изменении нагрузок напряжение не должно превышать предел текучести.

Расчет по приведенной формуле свидетельствует, что при $q > 250$ кВт/м² термонапряжения превышают допустимые (1200 кгс/см²).

Расход охлаждающей жидкости определяется выражением:

$$q_3 = \frac{q \times F}{i_2 - i_1} \geq f \times w_{кр} \quad (1.3)$$

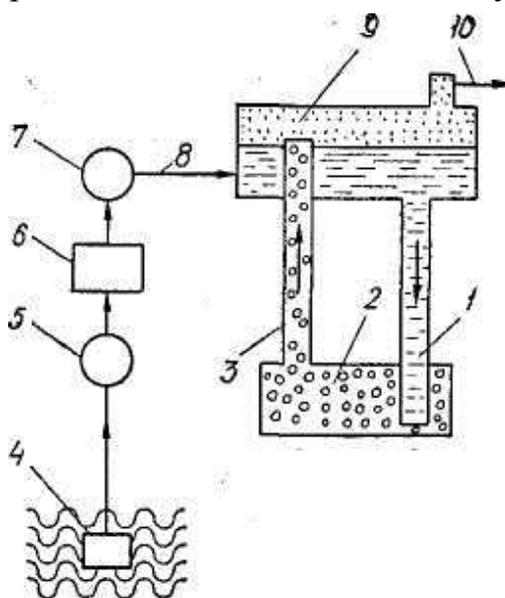
где F – площадь обогреваемой поверхности, м²;
 q – удельная плотность теплового потока, кВт/м²;
 i_1, i_2 – энтальпия охлаждающей среды, кВт/кг;
 f – площадь поперечного сечения детали, м²;
 $w_{кр}$ – предельное значение скорости охладителя, обеспечивающее нормальное охлаждение, м/с.

«Переход на испарительное охлаждение вместо водяного на высокотемпературных топливосжигающих агрегатах, прежде всего, повышает срок службы деталей, что и явилось одной из основных причин не только широкого внедрения в отечественную практику, но и покупку лицензий рядом развитых стран. Кроме того, применение испарительного охлаждения сокращает потери теплоты в системе охлаждения на 3–5 %, в 10 раз сокращает потребление охлаждающей воды» [55].

На рисунке 1.18 показано испарительное охлаждение металлургических печей. Принципиальная схема системы испарительного охлаждения представлена на рисунке 1.19. Охлаждаемые детали двумя трубами присоединяют к барабану-сепаратору. По опускной трубе к детали (к нижней ее части) подводится вода. По подъемной трубе образовавшаяся пароводяная смесь отводится (из верхней части) в барабан-сепаратор, где пар отделяется от воды и направляется в паропровод. Взамен испарившейся в барабан подается свежая питательная вода, и смесь ее с отсепарированной водой опять попадает в охлаждаемую деталь. Циркуляция воды в системе непрерывна. При этом возможна естественная или принудительная циркуляция [55, с 45].



Рисунок 1.18 – Испарительное охлаждение металлургических печей [55]



1 - опускная труба; 2 - охлаждаемая деталь; 3 - подъемная труба; 4 - водозаборное устройство; 5 - станция перекачки воды; 6 - химическая водоочистка; 7 - питательный насос; 8 - подвод питательной воды; 9 - барабан-сепаратор; 10 - отвод насыщенного пара [55].

Рисунок 1.19 – Принципиальная схема системы испарительного охлаждения

Выводы по разделу 1

В первой главе проведен обзор литературных источников различных авторов, посвященных процессу теплообмена, гидродинамики и прочности в пористых теплообменниках для энергетического производства.

Рассмотрены вопросы интенсификации теплообмена с помощью пористых элементов, для этого проводился обзор патентов, описывающих способ интенсификации теплообмена с помощью пористого покрытия, рекуперативные теплообменники на основе пористых покрытий, а также конструктивное исполнение поверхности теплообмена и способ охлаждения для теплонагруженных поверхностей теплообменных аппаратов. Также рассмотрены экспериментальные установки для исследования теплообмена в капиллярно-пористой системе различных авторов, изучавших данную проблематику с различных точек зрения. Подробно рассмотрены различные подходы к механизму процесса парообразования, которые сводятся к модели микрослоевого испарения жидкости в паровой пузырь и конвективной модели.

Практически все высокотемпературные агрегаты содержат металлические детали, которые требуют охлаждения, в связи с этим можно отметить актуальность данной темы исследования. Описаны эффективные способы охлаждения поверхностей нагрева установок и, в частности, испарительное охлаждение металлургических печей. Детали и узлы металлургических агрегатов особенно в плавильных агрегатах работают при высокой температуре и соответственно требуют интенсивного охлаждения. Существует необходимость повышения интенсивности охлаждения; необходимость обеспечения взрывобезопасности работы плавильных агрегатов в металлургии за счет исключения попадания воды в расплав, и штейн, которое приводит к взрыву печи для водяной и испарительной систем охлаждения, выполненных в виде кессонов; необходимость предупреждения перегрева и пережога сильно нагретых поверхностей стенок энергооборудования, поэтому вопросы разработки перспективных конструкций теплообменников с пористой структурой охлаждения требуют дополнительного исследования.

2 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ (ФИЗИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ) ПРОЦЕССА ПАРООБРАЗОВАНИЯ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ

2.1 Характеристики одиночного парового пузыря в ячейках капиллярно-пористой структуры

Определение характеристик (параметров) одиночного парового пузыря, характеризующие его динамику роста в капиллярно-пористых материалах является интересным с точки зрения построения расчётных моделей. Эти характеристики могут существенно отличаться от интегральных характеристик и параметров кипения в большом объеме на поверхности без пористого покрытия. Однако они дают возможность качественного выявления влияния режимных и конструктивных факторов на процесс кипения жидкости в ячейках пористой структуры [83, 84].

«Задача сводится к определению временных τ зависимостей величин: толщины δ распределения пленки, находящейся под паровым пузырем, растущим на пористой поверхности, при $0 \leq r \leq R_{cn}$, считая, что при $r = R_{cn}$, устанавливается жидкостная пленка постоянной величины δ_0 , испарение которой компенсируется подтеканием свежих порций относительно холодной жидкости за счет капиллярных и массовых сил $\Delta P_{g+кан}$; распределение температуры жидкости в пленке θ толщиной δ ; глубины захлаживания \bar{h} , на которую распространяется фронт температурного возмущения в парогенерирующей поверхности; локального теплового потока q , отбираемого индивидуальным паровым пузырем. Все эти величины будут определяться при фиксированном значении перегрева жидкости P » [89].

Выше перечисленные функции могут быть записаны в безразмерном виде как у авторов [74,82]:

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{\delta_0}; \quad \Theta = \frac{(T_0 - T_{x=0})}{(T_0 - T_s)}; \quad \bar{h} = \frac{h\lambda'}{\delta_0\lambda}; \quad \tilde{q} = \frac{q\delta_0}{\lambda'(T_0 - T_s)} = \frac{q}{q_0}; \quad (2.1)$$

где q_0 – удельный тепловой поток, отбираемый паровым пузырем;

$$q = 2q(0, \tau) = 2[T_0 - T(0, \tau)] \frac{\lambda}{h} - \text{удельный тепловой поток на границе}$$

«пленка жидкости – стенка» со стороны стенки.

Безразмерное время принимается за аргумент $t = \frac{a\tau(\lambda')^2}{(\delta_0\lambda)^2}$.

Перегрев жидкости является фиксируемой величиной $P = \frac{4c\rho(T_0 - T_s)\lambda}{3r'\rho'\lambda'}$

(тепловой параметр).

Принимаем следующие обозначения:

r – координата парогенерирующей поверхности, покрытой пористой структурой.

R_{cn} – радиус «сухого пятна» вдоль координаты r ;

$T_0 = T(x, 0)$ – температура жидкости при $\tau = 0$ (начальная температура жидкости на стенке);

T_s – температура насыщения;

λ, λ' – теплопроводность стенки и жидкости;

a – коэффициент температуропроводности;

c, ρ, ρ' – теплоемкость стенки, плотность стенки и жидкости;

r' – теплота парообразования.

Безразмерное время также может быть определено как $\tilde{t} = \frac{t}{t_p}$, где t_p –

время, необходимое для полного испарения пленки при данном значении параметра P , т.е. $t_p = f(P)$. Эта зависимость рассчитывается при $\bar{y} = 1(\bar{\delta} = 0)$, где $\bar{y} = 1 - \bar{\delta}$.

Величина q со стороны жидкости на границе «стенка – жидкость»

$$q = \frac{\lambda'}{\delta} [T(0, \tau) - T_s]$$

Авторы работ [85,86] отмечают актуальность проблемы влияния поверхности кипения (с недогревом) на интенсивность очаговой коррозии, которая может иметь место на оболочках твэлов, когда схлопываются пузырьки в недогретой жидкости. В исследованиях с капиллярно-пористой системой охлаждения наблюдается кипение недогретой до температуры насыщения жидкости внутри и на поверхности структуры, так как массовые силы создают избыток жидкости. Но авторы этих работ описывают процесс кипения, который происходит на поверхностях без пористых покрытий.

В настоящее время исследование микрослоя жидкости в основании парового пузыря проводится во многих научных центрах мира [87,88]. Однако требуется дальнейшее исследование одиночных пузырей в ячейках нового класса отводящих систем, особенно выполненных из плохотеплопроводных хрупких покрытий. Это позволяет анализировать развитие усталостных трещин в центрах активации пузырей, применять теорию термоупругости к предельному состоянию теплообменной поверхности, проводить аналогию в процессах теплопередачи между микро- и макрокинетикой зарождения и развития пузырей и процессами терморазрушения пористых покрытий. К тому

же, как отмечается в работах [85-88], многие авторы моделируют процесс кипения на поверхностях теплообмена абсолютно гладких (наномасштабные поверхности), что далеко от реальных тепловых энергоустановок [89-90].

2.2 Модель процесса теплообмена при микрослоевом испарении

Задача нестационарного теплообмена может быть рассмотрена при микрослоевом испарении пленки жидкости, которая находится под паровым пузырем, растущим в ячейках капиллярно-пористой структуры. Подвод теплоты осуществляется из аккумулирующего объема поверхности, генерирующей пар, которая принимается как бесконечная пластина толщиной $\delta_{пл}$ (рис. 2.1).

Задача об испарении пленки жидкости с поверхности твердого тела, рассматриваемого как полуограниченный ($\delta \rightarrow \infty$), для различных условий отмечена в работах [83, 91].

Воспользуемся решением задачи об испарении пленки жидкости с поверхности твердого тела, считая, что пленка толщиной δ_0 находится в ячейке капиллярно-пористой структуры. Принимается линейное распределение температур по толщине пленки δ :

$$\delta = \delta_0 - \frac{\lambda'}{r'\rho'} \int_0^\tau \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} d\tau, \quad (2.2)$$

при $x = -\delta_0$, $T = T_S$;

$x = 0$, $T = T_0$.

Температурное поле в пластине (подложке), которая покрыта пористой структурой, описывается одномерным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2.3)$$

Начальные условия: $0 \leq x \leq \delta_{пл}$, $\tau = 0$, $T(x, 0) = T_0$. (2.4)

Граничные условия:

$$x = 0, \quad \tau \geq 0, \quad \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = \lambda' \frac{T(0, \tau) - T_S}{\delta}; \quad (2.5)$$

$$x = \delta_{пл}, \quad \tau \geq 0, \quad \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=\delta_{пл}} = 0.$$

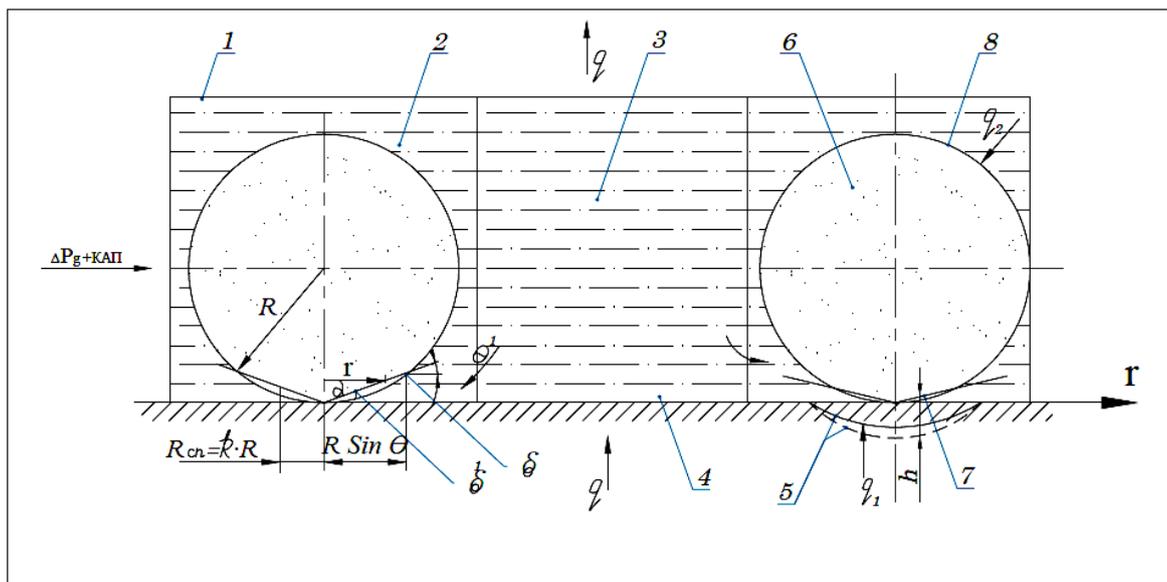


Рисунок 2.1 – Модель соприкосновения паровых пузырей с парогенерирующей поверхностью в ячейках генерации пара пористой структуры [89, с.36]

1– скелет пористой структуры; 2–ячейка генерации пара; 3– ячейка питания жидкостью; 4–парогенерирующая поверхность; 5– фронт распространения температурной волны h в объеме теплогенерирующей поверхности, выполненной из нержавеющей стали и меди (пунктирная линия) (глубина захлаживания); 6 – пар; 7 – «сухое» пятно; 8 – фронт распространения легкой (паровой) фазы [89].

Для решения поставленной нелинейной задачи нестационарной теплопроводности используется интегральный метод, который позволяет осреднить уравнение теплопроводности по области $0 < x < h$ при $\tau < \tau_k$ и по области $0 < x < \delta_{пл}$ при $\tau > \tau_k$.

Время полного испарения пленки жидкости принимается за τ_k , во время которого фронт температурного возмущения, распространяется в твердом теле, не достигает толщины пластины $\delta_{пл}$ и характеризует область $0 < x < \delta_{пл}$ величиной глубины захлаживания

$$h (h < \delta_{пл}), \text{ когда } T = T_0, \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=h} = 0.$$

При $\tau > \tau_k$, фронт температурных возмущений в поверхности нагрева, возникает в результате отбора тепла индивидуальным пузырем, в ячейке генерации пара и достигает границы пластины $h = \delta_{пл}$. Таким образом, в этом

случае при $\tau < \tau_k$ пластина рассматривается как полуограниченное тело, и толщина пластины δ_{nl} не входит в расчетные зависимости.

Для случая $\tau < \tau_k$ задача может быть сведена к системе дифференциальных уравнений для полуограниченного тела ($\delta_{nl} \rightarrow \infty$), которая записывается в безразмерном виде [89, с.37]:

$$\frac{1}{3} \frac{d}{dx} (\bar{h} \theta) = \frac{2\theta}{\bar{h}}; \quad \frac{2\theta}{\bar{h}} = \frac{1-\theta}{\bar{\delta}} = \tilde{q}, \quad (2.6)$$

где $\tilde{q} = \frac{2q(0, \tau)}{q_0}$; $q(0, \tau) = \frac{[T_0 - T(0, \tau)]\lambda}{h}$; $q_0 = \frac{[T_0 - T_s]\lambda'}{\delta_0}$; $\bar{\delta} = 1 - \frac{p\bar{h}}{4}$.

Величины θ и \bar{h} в зависимости от $\bar{\delta}$ имеют вид:

$$\theta = -\frac{1-\bar{\delta}}{p\bar{\delta} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{2p\bar{\delta}}{1-\bar{\delta}}} \right]}; \quad \bar{h} = \frac{2(1-\bar{\delta})}{p\sqrt{1 + \frac{2p\bar{\delta}}{1-\bar{\delta}}}}. \quad (2.7)$$

Тогда дифференциальное уравнение примет вид:

$$\left[2p + (1-2p)\bar{y} + \sqrt{2p\bar{y}} \sqrt{1 + \frac{1-2p}{2p}\bar{y}} \right] d\bar{y} = \frac{3}{4} p^2 dt, \quad (2.8)$$

где $\bar{y} = 1 - \bar{\delta}$.

2.3 Математическая и физическая модели процесса парообразования

2.3.1 Модель зарождения паровых пузырьков (физическая модель)

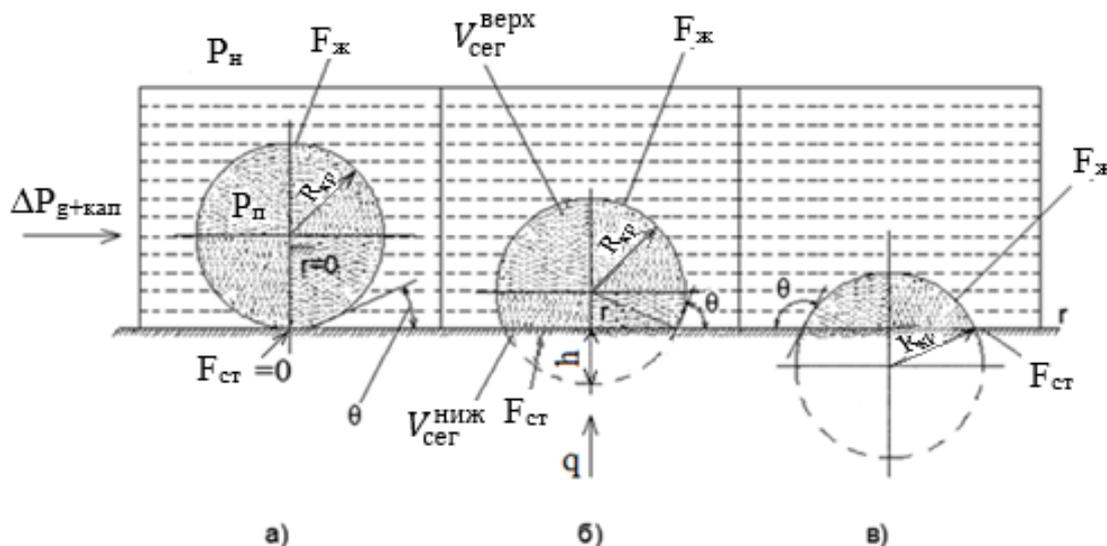
При кипении жидкости на пористой поверхности можно отметить два режима образования паровой фазы. Для первого случая можно отметить обычный цикл пузырькового кипения в капиллярно-пористой структуре, который включает зарождение, рост и отрыв пузырей, всплывающих по наиболее крупным порам. Такой режим имеет место в случае небольших тепловых потоков. В случае, если отрывной диаметр пузыря больше размера поры, реализуется второй режим кипения. Парообразование внутри пористого покрытия имеет непрерывный характер в результате испарения жидкости с поверхности неподвижных менисков, так как неподвижные мениски "подсасывают" из объема жидкость, а образующийся при этом пар выходит через устья пор в окружающий объем. Этот режим, преобладающий, как правило, при больших тепловых потоках и представляет наибольший практический интерес. Экспериментально доказано существование стабильных

паровых зон в пористой структуре, границы которых изредка осциллируют [83,92]. На основании приведенных данных можно сделать вывод, что внутри пористого покрытия вблизи греющей стенки расположены стабильные зоны парообразования. Пар, который можно визуально наблюдать в объеме жидкости, имитирует процесс барботирования (как это имеет место при вдуве газа через перфорированную пластину), а не обычный цикл пузырькового кипения.

Отмеченные закономерности используются при построении различных моделей.

Проведение процессов, проводимых при высокой тепловой напряженности, связано с возникновением предельного состояния греющей поверхности. В одном случае производится целенаправленное разрушение материала, например, с помощью огнеструйных горелок ракетного типа [92], из сопел которых истекают сверхзвуковые высокотемпературные потоки. В другом случае требуется создание охлаждающей системы самих сопел и камер сгорания для избежания кризиса теплообмена и разрушения парогенерирующей поверхности, покрытой пористой структурой [93-105].

Разработана модель зарождения паровых пузырьков в ячейках капиллярно-пористой структуры. На рисунке 2.2 показан вариант зарождения парового пузыря на поверхности генерации пара в ячейках пористой структуры.



а) взрывообразное появление парового зародыша ($t = 10^{-8} \div 10^{-6}$ с); б) жизнеспособный паровой зародыш, имеющий "сухое" пятно в основании ($t = 10^{-2} \div 1$ с); в) "гибнущий" паровой зародыш ($t = 1 \div 10$ с).

Рисунок 2.2 – Зарождение парового пузыря на поверхности генерации пара в ячейках пористой структуры [107,108]

Принятые обозначения:

P_n, P_n – давление насыщения и пара в пузырьке;

$\Delta P_{g+кап}$ – действующий напор, создаваемый гравитационными и капиллярными силами;

q – тепловая нагрузка.

$r, R_{кр}$ – координата и критический радиус;

$F_ж, F_{ст}$ – поверхность соприкосновения с жидкостью и стенкой;

θ – динамический угол смачивания;

$V_{сег}^{верх}, V_{сег}^{ниж}$ – объем сегмента верхней и нижней части пузыря.

Для рисунка 2.2 можно записать кубическое уравнение [106]:

$$\cos^3 \theta - 3 \cos^2 \theta - 3 \cos \theta + c = 0, \quad (2.3.1)$$

где $c = 1 + 8 (R_{кр}/R)^2$, R – текущий радиус пузыря.

Решением уравнения будет:

$$\cos \theta = y + 1, \quad \tilde{P} = -6, \quad \tilde{q} = -4, \quad \tilde{Q} = -4, \quad (2.3.2)$$

при температурном напоре $\Delta T = \Delta T_{max}$, $c = c_{min} = 1$.

Поскольку $\tilde{Q} < 0$, принимаем тригонометрическое решение:

$$y = -2\sqrt{-\tilde{P}/3} \cos\left(\frac{\tilde{\alpha}}{3} + \frac{2}{3}\pi\right), \quad (2.3.3)$$

где $\cos \tilde{\alpha} = \tilde{q} / 2\sqrt{-(\tilde{P}/3)^3} = 0,707$, $\tilde{\alpha} = 45$ градусов.

Тогда $y = -0,73$ и угол $\theta = 74^\circ 18'$.

Аналогичная процедура при $\Delta T = \Delta T_{min}$ дает угол $\theta = 75^\circ 42'$.

Значения величин θ_i незначительно отличаются от средней величины $\tilde{\theta}$ [98], принятой в модели микрослоевого роста парового пузыря ($\tilde{\theta} = 80^\circ$), что, видимо, можно объяснить неучетом формы пузыря.

2.3.2 Математическая модель процесса парообразования для условий предельного состояния поверхности теплообмена

Решение задачи термоупругости можно рассмотреть на примере материала, которые выполняются из естественной капиллярно-пористой

структуры (горной породы) и металлических поверхностей, но которых генерируются пар.

Пористая поверхность, а также металлическая поверхность подвергаются разрушению. Величина удельного теплового потока позволяет оценить его влияние на процесс разрушения. Удельный тепловой потока q подводится к поверхности $F_{ст}$, и отмечают время t его воздействия, когда возникают разрушающие напряжения, для структуры по гранулометрическому составу шелухи δ_i , а для металла по глубине проникновения температурного возмущения (рис. 2. 1).

В некоторых работах решающая роль отводится термическим напряжениям растяжения, так как значение предела прочности структуры на сжатие в 10 и более раз выше предела прочности на растяжение. В металлической стенке это значение повышается в несколько раз.

Рассмотрим свободную со всех сторон пластину толщиной $2h$. К поверхности $z=+h$, начиная с момента $t = 0$, подводится постоянный удельный тепловой поток q (рис.2.1). Нижняя поверхность и боковые края пластины считаются теплоизолированными. Считаем, что тепловой поток q поступает в паровой пузырь через микрослой жидкости, находящийся в основании пузыря под углом θ , и через “сухое” пятно радиусом r .

Запишем еще раз уравнение теплопроводности с граничными и начальными условиями в виде:

$$a_{cm} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2.3.4)$$

где $T = 0, \quad t < 0,$

$$\lambda_{cm} \frac{\partial T}{\partial z} = q \quad z = +h,$$

$$\lambda_{cm} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad z = -h,$$

где a_{cm} – коэффициент температуропроводности материала;

λ_{cm} – коэффициент теплопроводности материала.

Распределение температуры по толщине зависит от теплофизических свойств материала, величины теплового потока и времени его подачи:

$$T\left(\frac{z}{h}; t\right) = q \left\{ \frac{\mu}{2(c\rho\lambda)_{ст}} t + \frac{3z^2/h^2 + 6z/h - 1}{12\mu} - \frac{4}{\pi^2\mu} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-(n\pi\mu)^2 t / 4(c\rho\lambda)_{ст}\right] \cos\left[\frac{n\pi}{2}\left(\frac{z}{h} + 1\right)\right] \right\}, \quad (2.3.5)$$

где $c_{ст}$ – теплоемкость материала;
 $\rho_{ст}$ – плотность материала;
 n – целые положительные числа;
 $\mu = \lambda_{cm}/h$ – параметр.

При известном распределении температуры в пластине, можно определить термические напряжения растяжения и сжатия, которые возникают в момент времени t на различной глубине от нагреваемой поверхности $\delta_i = (h-z_i)$ для заданного значения теплового потока q . Так как пластина имеет переменную по толщине температуру, то она находится в плоско-напряженном состоянии.

Напряжения σ могут быть определены по следующему уравнению:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\alpha E}{1-\nu} T\left(\frac{z}{h}; t\right) + \frac{1}{(1-\nu)2h} \int_{-h}^{+h} \alpha E T\left(\frac{z}{h}; t\right) dz, \quad (2.3.6)$$

где первое слагаемое это составляющая напряжения сжатия, а второе – растяжения; α – коэффициент линейного расширения; E – модуль упругости Юнга; ν – коэффициент поперечного сжатия.

Произведение $(\alpha \times E)$ не имеет зависимости от температуры и поэтому выражение для напряжения растяжения можно упростить.

Можно получить функциональную зависимость теплового потока q_i , необходимого для разрушения, от времени его подачи и глубины проникновения, если задать предельные значения напряжения сжатия, растяжения для каждой данной породы покрытия и металла.

Кроме того, если приравнять температуры на поверхности пластины к температуре плавления породы покрытия и металла, можно определить значения удельных тепловых потоков, которые необходимы для плавления поверхностного слоя за различный промежуток времени их действия. Таким образом, получим в каждом конкретном случае функциональные зависимости теплового потока от времени воздействия его на поверхность:

– плавление поверхности пластины при температуре $T_{пл}$

$$q_1 = T_{пл} / \left\{ \frac{\mu}{2(c\rho\lambda)_{ст}} t + \frac{2}{3\mu} - \frac{4}{\pi^2\mu} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-(n\pi\mu)^2 t / 4(c\rho\lambda)_{ст}\right] \cos n\pi \right\}; \quad (2.3.7)$$

– создание предельных напряжений сжатия

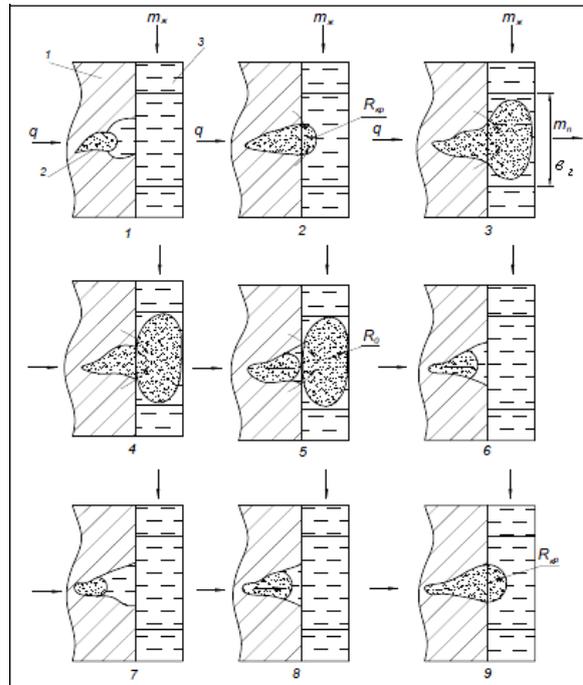
$$q_2 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.сж}}{\alpha E} \left\{ \frac{\mu}{2(c\rho\lambda)_{СТ}} t + \frac{3z^2/h^2 + 6z/h - 1}{12\mu} - \frac{4}{\pi^2\mu} \times \right. \\ \left. \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-(n\pi\mu)^2 t / 4(c\rho\lambda)_{СТ}\right] \cos\left[\frac{n\pi}{2}\left(\frac{z}{h} + 1\right)\right] \right\}; \quad (2.3.8)$$

– создание предельных напряжений растяжения $\sigma_{пр.раст.}$.

$$q_3 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.раст.}}{\alpha E} / \frac{\mu}{2(c\rho\lambda)_{СТ}} t. \quad 2.3.(9)$$

2.4 Механизм процесса парообразования в пористой структуре теплообменника (теплообмена, гидродинамики и прочности)

Модель развития паровой фазы, описание механизма процессов и получения расчетных зависимостей определяются из фотокинематографических и голографических наблюдений [92, 96]. Это следует из того, что динамика паровой фазы после спонтанного (взрывообразного) зарождения пузыря критического размера $R_{кр}$ протекает с участием испаряющегося микрослоя жидкости, находящегося под паровым пузырем, а при некоторых условиях начинается вытеснение жидкой пленки в центре парового пузыря с последующим развитием “сухого” пятна. Отрыв или разрушение паровых пузырей происходит при диаметрах, в несколько раз меньших, чем при кипении в большом объеме на гладкой поверхности. Величина $\bar{D}_0 = 2R_0$ рассчитывается по формуле работ [97-98].



1 – стенка; 2 – впадина; 3 – пористая структура; q – тепловая нагрузка; $m_{ж}$ – расход жидкости; $m_{п}$ – расход пара; δ_e – гидравлический размер структуры.

Рисунок 2.3 - Иллюстрация процесса зарождения, развития и отрыва парового пузыря в активной поре парогенерирующей стенки, покрытой пористой структурой [109,110,111,112].

После отрыва (разрушения) пузыря активно подсасываются относительно холодные порции жидкости под действием гравитационных и капиллярных сил. После некоторого условного “молчания” центра генерации рождается спонтанно новый паровой пузырь, который имеет критический размер. Расход охлаждающей жидкости $m_{ж}$ (т.е. скорость потока и степень его недогрева) управляет временем роста пузыря. Более интенсивный подвод теплоты со стороны тонкого перегретого слоя жидкости, которое окружает паровой пузырь, а также от пористой структуры и от теплопроводного скелета сеток, время роста пузыря уменьшается.

Временная несопоставимость процессов периода роста парового пузыря и времени “молчания” центра генерации является свидетельством того, что существует микрослой жидкости, который находится в перегретом состоянии и постоянно пульсирует. Микрослой жидкости сохраняет устойчивость и стабильность из-за совместного действия гравитационного и капиллярного потенциалов.

В кипящей жидкости большого объема на гладкой поверхности начинают появляться паровые пузыри, время роста которых составляет примерно $(10-100) \times 10^{-3}$ с, а в пористой системе наблюдается время роста а в десятки раз меньшее.

Стадии зарождения и отрыва пузыря в большом объеме и в пористой системе очень малы (ими можно пренебречь), поэтому для обеих систем они рассматриваются как имеющие характер взрыва. Время “молчания” в периодическом процессе, когда появляется паровой пузырь при кипении в большом объеме может составлять примерно 0,1 с и быть примерно равным времени роста пузыря.

Появление зародыша критического размера $R_{кр}$ в ячейке пористой структуры происходит в результате быстрого расширения пузыря во впадине внутри жидкости (рис. 2.3) [109, с.31].

Однако увеличивающаяся кривизна поверхности пузыря замедляет процесс его расширения во впадине, а в начальный момент велики динамические силы, возникающие в перегретой жидкости, которые препятствуют дальнейшему росту пузыря. Тепло передается, в основном, через микрослой жидкости находящийся под паровым пузырем, который имеет конусообразную форму с “сухим” пятном в центре пузыря. Основной процесс испарения происходит в основании “сухого” пятна. От перегретой жидкости с

противоположной стороны относительно стенки передается некоторая доля теплоты в паровой пузырь.

Толщина микрослоя и радиус "сухого" пятна при росте парового пузыря мало меняются из-за притока новых холодных порций охлаждаемой жидкости, которые переносятся гравитационными и капиллярными силами, а также из-за действия подъемных сил на паровой пузырь.

Силы инерции проявляются в начальной стадии развития пузыря и перед отрывом уменьшаются, а пузырь приобретает форму, которая близка к сферической, при этом сокращается площадь "сухого" пятна, значительно изменяется форма микрослоя. Отрыв пузыря определяется силами поверхностного натяжения и гидро-газодинамического сопротивления, причем оказывает влияние избыток жидкости, с помощью которого создается недогрев и скорость потока стекающей жидкости.

В случае, когда паровой пузырь не достигает отрывного диаметра, а его верхняя граница касается внешней поверхности пористой структуры, происходит разрушение пузыря.

Механизм разрушения пузыря в тонкой пленке пористой структуры представлен в [83, 95]. Когда граница пузыря касается уровня жидкости, в точке касания возникает отверстие, через которое пар попадает из пузыря в паровой объем. В окрестности данной же точки возникают образующие, имеющие определенную кривизну, которые начинают стягиваться в точку. Действие сил поверхностного натяжения способствует уменьшению свободной поверхности, а отверстие в паровой полости продолжает увеличиваться в паровой объем. По поверхности жидкости начнет распространяться волна. Описанный процесс протекает за $(10^{-7}-10^{-6})$ с, т.е. носит взрывной характер, как и в случае "рождения" парового зародыша. Это явление было использовано для проведения аналогии с взрывными процессами в эллиптических системах [109, с. 32].

Во впадину, освободившуюся от пузыря, устремляется относительно холодная порция жидкости, а часть пара во впадине конденсируется вплоть до выравнивания температуры пара и жидкости на границе их соприкосновения. В случае большого значения параметра избытка жидкости $\tilde{m} = \frac{m_{ж}}{m_n}$, существует

вероятность конденсации всего пара, тогда возможно прекращение пузыреобразующего действия впадины. Дальнейший приток теплоты, который аккумулировался в стенке, дает возможность наступления нового цикла зарождения парового зародыша, имеющего критический размер. «За один цикл развития пузыря температура стенки под ним на стадии испарения микропленки и стадии нагрева холодной жидкости будет существенно изменяться, чем объясняется высокая интенсивность теплопередачи» [109, с. 33].

Выводы по разделу 2

Исследованы физические и математические модели динамики паровых пузырей, растущих в ячейках пористой структуры. Характеристики теплообмена существенно отличаются для индивидуальных пузырей. Использовано решение задачи об испарении пленки жидкости в области «сухого» пятна под паровым пузырем и определены толщины пленки и температурное поле в стенке. Закон роста пузырей в ячейках структуры определялся экспериментально с учетом избытка жидкости и теплоаккумулирующей способности стенки. Избыток жидкости снижает величины отрывного диаметра пузырей.

Разработана модель зарождения паровых пузырьков в ячейках пористых покрытий при парообразовании охладителя от их взрывообразного появления, развития с учетом «сухого» пятна до разрушения и определен динамический угол в пределах $(74 \div 80)$ градусов. Предельное состояние среды согласно модели развития пузырьков изучено путем решения задачи термоупругости. Установлены интервалы удельных тепловых потоков, поступающих в паровые пузыри, в пределах которых происходит разрушение пористых покрытий и металлических поверхностей в условиях совместного действия капиллярных и гравитационных потенциалов.

Модель развития паровой фазы в пористых покрытиях теплообменников можно использовать для объяснения механизма зарождения зародыша, и процесс его роста до момента разрушения. Предельное состояние пористой поверхности и металлической подложки характеризуется плавлением и разрушением от термических напряжений сжатия и растяжения. Определены функциональные зависимости разрушающих тепловых потоков в зависимости от времени подачи теплоты, величины разрушаемых частиц и глубины проникновения температурной волны в металлические поверхности. Определены зависимости предельного состояния пористых покрытий от величины тепловой нагрузки, времени ее подачи и глубины проникновения тепловой волны.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В КАПИЛЛЯРНО- ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ

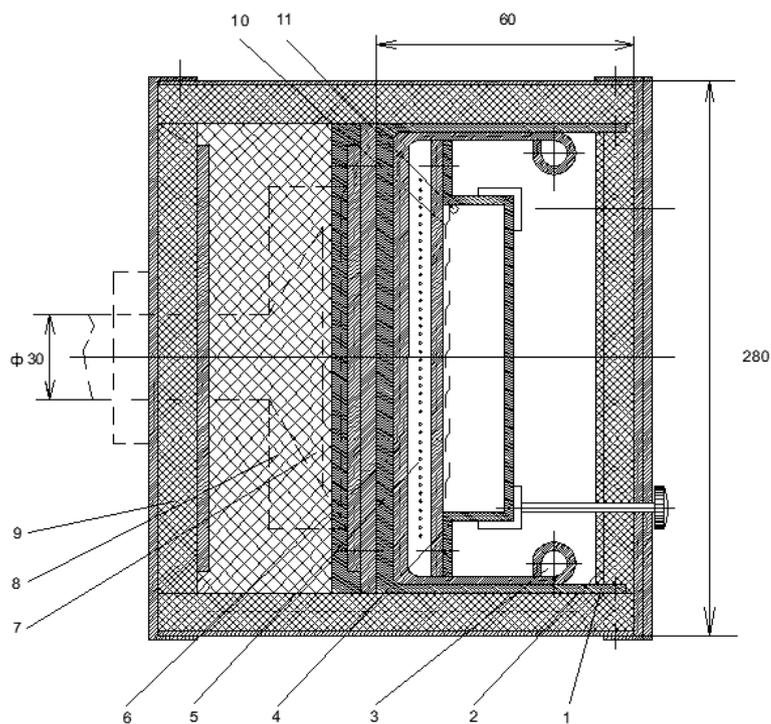
3.1 Исследование процессов парообразования в пористых структурах, работающих с избытком жидкости

«Управление быстро протекающими процессами в эллиптических пористых системах позволяет проводить подобие, моделирование и аналогию процессов кипения, барботажа, пеногенерации и пыле-газоулавливания [113]. В результате обобщения подобных и аналогичных процессов получены критериальные расчетные зависимости [114] вплоть до наступления предельного (критического) состояния теплообменной поверхности в зависимости от большого числа режимных и конструктивных факторов [115]. Разделение суммарной энергии на энергию волны напряжения и энергию газов позволило разработать гео- и термодинамические экраны, предохраняя турбофундаменты электростанций от сейсмических волн [116]. Созданы и исследованы пористые пароохладители паровых котлов [117], присопловые галтели и канавчатые пористые лабиринты в турбомашинах [118-121] и многие другие элементы тепловых энергоустановок, в которых за счет управления процессами теплопередачи при парообразовании в пористых структурах достигается высокая интенсивность и форсировка при отводе высоких тепловых нагрузок» [122, с. 422].

Вопросы «исследования пористых систем позволили разработать серию новых технических решений, позволяющих эффективно охлаждать теплонагруженные элементы энергоустановок, горелки, осуществлять очистку микроскопической пыли и газов в пенном кипящем потоке, управлять энергиями волны и газов, что имеет экологическое значение» [122, с.422].

3.1.1 Способ проведения теплообмена и экспериментальная установка

«Для высокофорсированного и экономичного проведения процессов в описанных устройствах разработана новая пористая система охлаждения, в которой процессы теплообмена реализуются путем парообразования жидкости в пористых структурах, а подвод охлаждающей жидкости производится при комбинированном действии капиллярного и гравитационного потенциала» [122, с.423]. На рисунке 3.1 приведено устройство, предназначенное для охлаждения нагретого элемента с помощью пористого покрытия.



1 – корпус; 2 – крышка; 3 – трубчатая артерия; 4 – вставка; 5 – пористая структура; 6 – электроизоляция (слюда); 7 – основной нагреватель; 8 – охранный нагреватель; 9 – теплоизоляция; 10 – перфорированная прижимная пластина; 11 – микроартерия.

Рисунок 3.1 – Устройство пористого охлаждения (элемента) (поперечный разрез) [122,123]

3.1.2 Схема стенда для оптических наблюдений

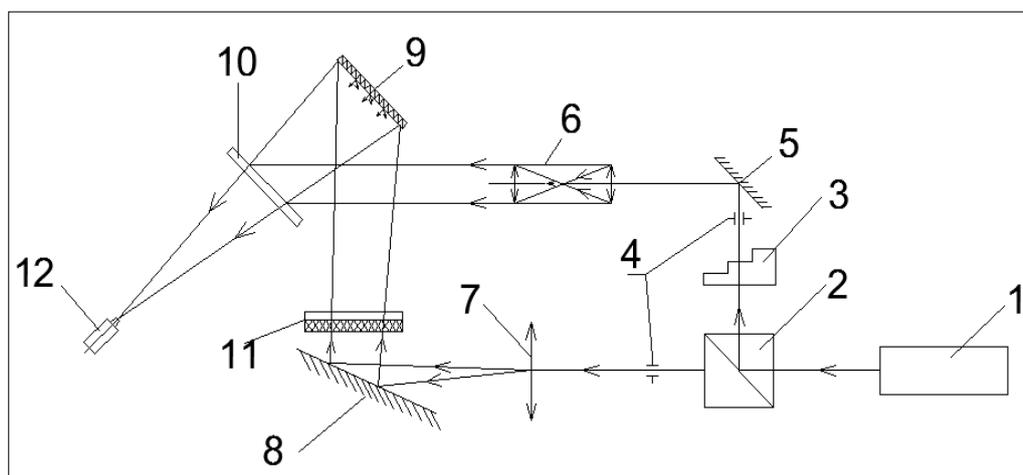
Оптические наблюдения за процессами парообразования производились с применением голографической интерферометрии (рис. 3.2) и скоростной киносъемки. Использовалась лазерная установка ЛГ-38 и кинокамера СКС-1М. [124, с. 428].

Лазер газовый ЛГ-38 гелий-неоновый непрерывного действия предназначен для использования в качестве источника когерентного излучения в стационарной аппаратуре. При помощи лазера можно получить узкий направленный пучок, имеющий большую интенсивность монохроматического света. Это связано с тем, что в лазерах, в отличие от обычных источников света, излучения отдельных атомов когерентны. Рабочим веществом лазера является прозрачная для генерируемого света среда (кристалл, либо вещество в газообразном или жидком состоянии).

В лазерах искусственным путём создаются условия, при которых число атомов в возбуждённом состоянии больше, чем число атомов в стационарном

состоянии. При этих условиях процессы вынужденного излучения атомов будут превалировать над процессами поглощения. Исходный фотон будет породить интенсивный направленный поток когерентных фотонов – в этом заключается принцип генерации света в лазерах.

Экспериментальные установки, условия и методика обработки опытных данных подробно описаны в [122-124]. Охлажденная стенка и структура подвергались обезжириванию.



1 - лазер ЛГ-38; 2 – светоделительный кубик; 3 – светофильтр; 4 – диафрагмы; 5,8 – зеркала; 6 – коллиматор; 7 – объектив; 9 – диффузионный экран; 10 – плоскость голограммы; 11 – охлаждающий элемент; 12 – РФК -5М.

Рисунок 3.2 – Схема стенда для получения голографических интерферограмм [123, с.365]

Невязка баланса для тепла, которое выделяется при подведении тока и тепла, которое отводилось циркуляционной и избыточной водой, с учетом потерь через изоляцию не превышала $\pm 12\%$.

Невязка баланса для тепла, которое подводится паром в конденсаторе и теплу, которое отводилось циркуляционной водой, не превышала $\pm 11\%$.

Невязка материального баланса между расходами охлаждающей жидкости, слива и конденсата составляла не больше $\pm 10\%$.

«Исследования проводились с водой для давления (0,01–10) МПа, а также с водным раствором пенообразователя типа ПО-1. Скорость жидкости принимала значения $(1.1 \times 10^{-3} - 0,1)$ м/с, недогрев – (0–20) К, избыток жидкости составлял $m_{ж} = (1-14) \times m_{п}$. Тепловая нагрузка – $(1-60) \times 10^4$ Вт/м², температурный напор – (1–60) К, ориентация системы относительно вертикали – ($\pm 0 - \pm 90$) градусов» [122, с.424].

3.2 Устройство для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок

3.2.1 Испарительное охлаждение металлургических печей

Идея испарительного охлаждения (охлаждение в режиме кипения) принадлежит Андоньеву С.М. [125], который изобрел систему охлаждения металлургических печей паром, используемую сегодня во всем мире.

Системы испарительного охлаждения стали применяться не только на доменных печах и воздухонагревателях, а также на мартеновских, нагревательных, электросталеплавильных печах, конвекторах в черной и цветной металлургии, на ряде агрегатов химической промышленности. Широкое распространение получили системы испарительного охлаждения в установках утилизации вторичных энергоресурсов.

Принцип системы испарительного охлаждения заключается в использовании теплоты парообразования химически очищенной воды для отвода теплоты из высокотемпературной зоны печных агрегатов. В то же время переход на систему испарительного охлаждения требует применения химически очищенной воды, соответствующей котельным нормативам, что естественно удорожает систему охлаждения, а также требует более высокой технической подготовки обслуживающего персонала.

Таким образом, потребовалось разработать новую систему, которая могла бы удовлетворить требованиям взрывобезопасности работы высокотемпературного оборудования, а также применяться для других целей в энергетическом производстве. Такой системой явилась капиллярно-пористая, которая представляет собой новый класс теплоотводящих систем. В ней вместе с капиллярным потенциалом используется массовый.

3.2.2 Способ охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок и устройство для его осуществления

Важнейшим фактором интенсификации энергетического производства является усиление режима экономии с учетом требований экологии. Необходимо удовлетворить растущие потребности в топливе, энергии и сырье главным образом за счет экономии материально-сырьевых ресурсов, улучшения использования вторичных ресурсов. Этому могут способствовать пористые системы.

В энергоустановках начинают внедряться пористые системы. Они позволяют с высокой интенсивностью и надежностью отводить и транспортировать высокие тепловые потоки, решая ряд экологических проблем, выдвинутых в результате антропогенного воздействия на окружающую природную среду: способствовать экономии природных ресурсов, воды, кислорода, снижать количество вредных выбросов.

«Известно устройство для испарительного охлаждения металлургических печей, например доменных. Устройство для испарительного охлаждения

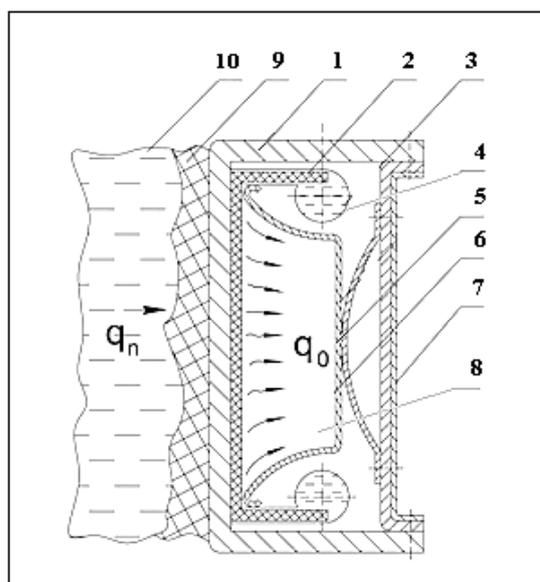
доменных печей содержит емкость для охлаждения, секции охлажденных элементов с внутренними трубками, соединенными друг с другом по вертикали внешними трубками и образующими вместе с системой подводящих и отводящих коллекторов замкнутый вертикальный циркуляционный контур (А.с. № 551895, МПК: С 21 В 7/10; Б.и. № 15, 1971)» [126]. Недостатками устройства для испарительного охлаждения металлургических печей являются: невозможность обеспечить взрывобезопасность, надежность, самоприспосабливаемость охлаждаемой системы к переменным тепловым нагрузкам в широких пределах. Техническая задача, решаемая изобретением, является разработка усовершенствованного устройства для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок. Технический результат, достигаемый при использовании устройства охлаждения, позволит обеспечить взрывобезопасность, надежность, самоприспосабливаемость охлаждаемой системы к переменным тепловым нагрузкам. Предлагаемое устройство содержит охлаждаемый элемент (кессон). На внутренней поверхности кессона со стороны отвода тепловых потоков устанавливаются капиллярно-пористый элемент, плотный контакт со стенкой охлаждаемого элемента обеспечивают вставкой с пружинящим элементом. Охлаждение теплового потока осуществляется передачей тепла воспринимающей жидкости, насыщающей капиллярно-пористый элемент, который соединен с внешними узлами питания охлаждающей жидкости и отвода пара [126, с. 95]. На современных промышленных огнетехнических установках существуют высокие выделения тепла, которые позволяют увеличить удельную технологическую производительность агрегата, а также снизить капитальные и эксплуатационные расходы, но при этом сокращается длительность работы агрегата. Устранить указанное противоречие можно с помощью предлагаемого устройства и правильно организованного способа охлаждения теплонапряженных элементов, который отличается от известных тем, что охлаждение элементов установок (кессонов) производят капиллярно-пористой системой, питающейся от внешней системы охлаждения жидкостью.

Предлагаемое нами устройство (рис. 3.3) реализует эффективную систему охлаждения, которая является капиллярно-пористой системой, обладает способностью к самонастройке за счет капиллярных сил и содержит весьма малое количество жидкости, что исключает опасность взрыва при прогаре охлаждаемого элемента, повышая надежность его работы, а, следовательно, и всего агрегата. Например, если подведенный удельный тепловой поток q_n окажется выше теплового потока q_o , отводимого от системы, то это приведет к заглоблению жидкости в капиллярно-пористой структуре, уменьшению радиуса мениска жидкости и возрастанию капиллярного давления. В этом случае возрастает расход подпитывающей жидкости до установления динамического равновесия. При снижении тепловой нагрузки q_n толщина жидкости в капиллярах a , следовательно, и радиус мениска жидкости увеличится.

Капиллярные силы начнут уменьшаться, сокращая подачу жидкости до равновесного состояния. Предлагаемое новое устройство для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок позволит сделать систему охлаждения мобильной к переменным тепловым нагрузкам в широких пределах и надежной в работе. Предложенное устройство содержит охлаждаемый элемент (кессон), на внутренней поверхности которого со стороны отвода тепловых потоков устанавливается элемент с капиллярно-пористой структурой, плотный контакт которого со стенкой охлаждаемого элемента обеспечивают, например, вставкой с пружинящим элементом, соединяют с внешними узлами питания охлаждающей жидкости и отвода пара.

Изобретение поясняется на рисунке 3.3, где изображена конструктивная схема устройства для реализации предлагаемого способа охлаждения высокофорсированных огнетехнических установок.

Устройство выполнено в виде кессона 1, к внутренней поверхности которого со стороны отвода тепла прилегает элемент, имеющий капиллярно-пористую структуру 2, соединенный с внешними узлами питания 3, прижимаемый вставкой 4 с пружинящим элементом 5, парового канала 6 и тепловой изоляции 7. К наружной стенке кессона 1 в процессе работы установки прилегает пленка гарниссажа 8, омываемая расплавом 9.



1 – стенка кессона; 2 - капиллярно-пористая структура; 3 – прижим; 4 – узел питания (артерия); 5 – вставка; 6 – пружинящий элемент; 7 – тепловая изоляция; 8 – паровой канал; 9 – гарниссаж; 10 – расплав; q_n, q_o – удельные тепловые нагрузки, подводимые расплавом и отводимые паром.

Рисунок 3.3 – Идея капиллярно-пористой системы охлаждения стен плавильных печей [126]

Работает устройство следующим образом. Тепловой поток плотностью q_n , подводимый от расплава 9, проходя через гарниссаж 8 и стенку кессона 1 воспринимается жидкостью, насыщающей капиллярно-пористый элемент 2, плотный контакт которого с внутренней стенкой кессона 1 со стороны отвода тепла, обеспечивают вставкой 4 с пружинящим элементом 5. Кроме того, капиллярно-пористый элемент может быть спеченным (скленным или приваренным) со стенкой кессона 1. Если в данный момент времени удельный тепловой поток q_n окажется выше теплового потока, отводимого от системы q_o , то жидкость будет испаряться больше, чем подводится от внешнего узла питания 3. Это приведет к заглублению жидкости в капиллярно-пористой структуре 2, уменьшению радиуса мениска жидкости и возрастанию капиллярного давления. Следовательно, расход жидкости через поперечное сечение структуры 2 увеличится до установления равновесия. Такое положение остается справедливым до достижения значений максимально возможного удельного теплового потока.

Если же отводимый тепловой поток q_o будет превышать величину подведенного теплового потока q_n , толщина жидкости в капиллярах, а, следовательно, и радиус мениска жидкости увеличатся. Капиллярные силы начнут уменьшаться, сокращая подачу жидкости до установления динамического равновесия.

Внешний узел питания 3 представляет собой две самостоятельные подводящие линии. Устройство работоспособно и с одной подводящей линией. Дублирование повышает устойчивость и производительность капиллярно-пористой системы и надежность установки. Образующийся пар по каналу 6 отводится в сепарационный узел.

В капиллярно-пористой системе 2 содержится весьма малое количество жидкости, что исключает опасность взрыва в случае прогорания элемента охлаждения и тем самым повышает надежность работы установки, увеличивая длительность кампании, а способность самонастраиваться за счет капиллярных сил делает систему мобильной к переменным тепловым нагрузкам. Тепло получаемого пара, как в обычных схемах, может утилизироваться. Для снижения тепловых потерь в окружающую среду наружные стенки кессона 1 покрываются тепловой изоляцией 7.

Таким образом, описанная принципиальная схема устройства, может использоваться для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок. Предлагаемое новое устройство обеспечивает взрывобезопасность за счет весьма малого количества жидкости в капиллярно-пористой системе охлаждения, повышает надежность установок, увеличивает длительность их рабочей кампании, а способность самонастраиваться за счет капиллярных сил делает систему охлаждения мобильной к переменным тепловым нагрузкам в широких пределах, а также, надежной в работе.

Предлагаемое устройство, реализующее эффективную систему охлаждения, по технико-экономическим показателям не уступает испарительной системе охлаждения, однако превосходит ее по условиям безопасности [126-129].

Нами получен патент «Устройство для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок» Патент РК №32509, реализующий принцип охлаждения капиллярно-пористой системой [126].

3.3 Экспериментальная установка для исследования капиллярно-пористых структур для охлаждения кессона

Все высокотемпературные агрегаты имеют металлические детали, требующие охлаждения. Использование технической воды как рабочего тела для отвода теплоты ограничено температурой ее нагрева. При температуре 48 °С начинается выпадение солей жесткости, что приводит к образованию отложений солей жесткости и резко снижает теплопроводность. В результате повышается температура детали со стороны рабочего пространства печи, что приводит к перегреву и последующему разрушению детали и, как следствие, к аварийным ситуациям.

Использование теплоты парообразования химически очищенной воды для того, чтобы отводить тепло из зоны высокой температуры печных агрегатов является принципом испарительного охлаждения. Однако системы испарительного охлаждения нуждаются в воде, которая химически очищается в соответствии с котельными нормативами, а это приводит к удорожанию системы охлаждения. Кроме того, необходим обслуживающий технический персонал более высокой квалификации.

Учитывая перечисленное, возникла необходимость в разработке новой системы, удовлетворяющей требованиям взрывобезопасности работы оборудования, находящейся при высокой температуре, а также применимой для других целей в энергетическом производстве. Капиллярно-пористая система является таковой, которая может представлять собой новый класс теплоотводящих систем. В ней вместе с капиллярным потенциалом используется массовый (гравитационный) потенциал.

Предлагаемое нами устройство, описанное ранее в разделе 3.1.2, реализует эффективную систему охлаждения, которая является капиллярно-пористой системой, обладает способностью к самонастройке за счет капиллярных сил и содержит весьма малое количество жидкости, что исключает опасность взрыва при прогаре охлаждаемого элемента, повышая надежность его работы, а, следовательно, и всего агрегата.

В настоящее время пористые системы внедряются в энергетических установках. Они позволяют с высокой интенсивностью и надежностью отводить и транспортировать высокие тепловые потоки, при этом можно решить экологические проблемы, которые возникли в результате

антропогенного воздействия на окружающую природную среду, такие как экономия природных ресурсов, воды, кислорода, снизить количество вредных выбросов.



Рисунок 3.4 –
металлорезина

Рисунок 3.5 –
металлорезина

Рисунок 3.6 – структура
металлорезины

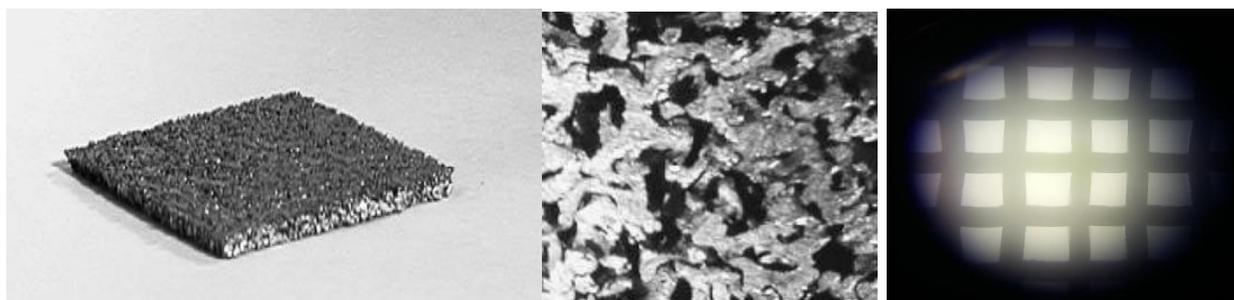


Рисунок 3.7 – пористый
спеченный материал

Рисунок 3.8 – структура
спеченного материала

Рисунок 3.9 – сетчатый
материал

Примеры пористых материалов: металлорезина (рис. 3.4, 3.5) и ее структура (рис. 3.6); зернистый пористый спеченный материал (рис. 3.7) и его структура (рис. 3.8); сетчатые материалы из нержавеющей стали (рис. 3.9).

При создании высокоэффективных, надежных капиллярно-пористых систем большое значение приобретает выбор капиллярно-пористой структуры и рабочей жидкости.

К структуре предъявляется ряд требований [16,28,130] (хорошая смачиваемость рабочей жидкостью, высокие коэффициенты проницаемости, пористости, теплопроводности) и надлежащие технологические качества (прочность, обрабатываемость, химическая нейтральность к материалу охлаждаемой поверхности и рабочей жидкости). Жидкость должна обладать наибольшей теплотой фазового перехода, достаточно высокими коэффициентами теплопроводности, поверхностного натяжения, минимальным коэффициентом вязкости, позволять эффективно использовать отводимое тепло

при полной надежности и взрывобезопасности системы охлаждения и необходимой совместимостью жидкости с капиллярно-пористой структурой, и стенкой. Такой жидкостью может служить вода.

Наиболее распространенными, доступными и дешевыми являются структуры из металлических сеток. Существенный недостаток их - незначительная высота подъема жидкости, которого лишены структуры, изготовленные на основе порошковых материалов, либо спеченные из монодисперсных металлических волокон. Последние обладают высокой теплопроводностью, проницаемостью, способны перекачивать жидкость против сил гравитации на значительную высоту. Однако сложна технология их изготовления и очистки. Это удорожает систему охлаждения и в масштабах производства затрудняет ее эксплуатацию.

В научно-исследовательской лаборатории Института энергетики и зеленых технологий АУЭС, кафедры «Теплоэнергетика и Физика» была создана экспериментальная установка для исследования капиллярно-пористых структур (открытая испарительная система при $P=0,1$ МПа). Лабораторный стенд (рис. 3.10) внедрен в учебный процесс и планируется для использования при подготовке магистрантов и докторантов по дисциплине «Повышение эффективности и надежности теплообменного оборудования с использованием пористых структур» для специальности «8D07102-Теплоэнергетика», а также для научно-исследовательской работы обучающихся.

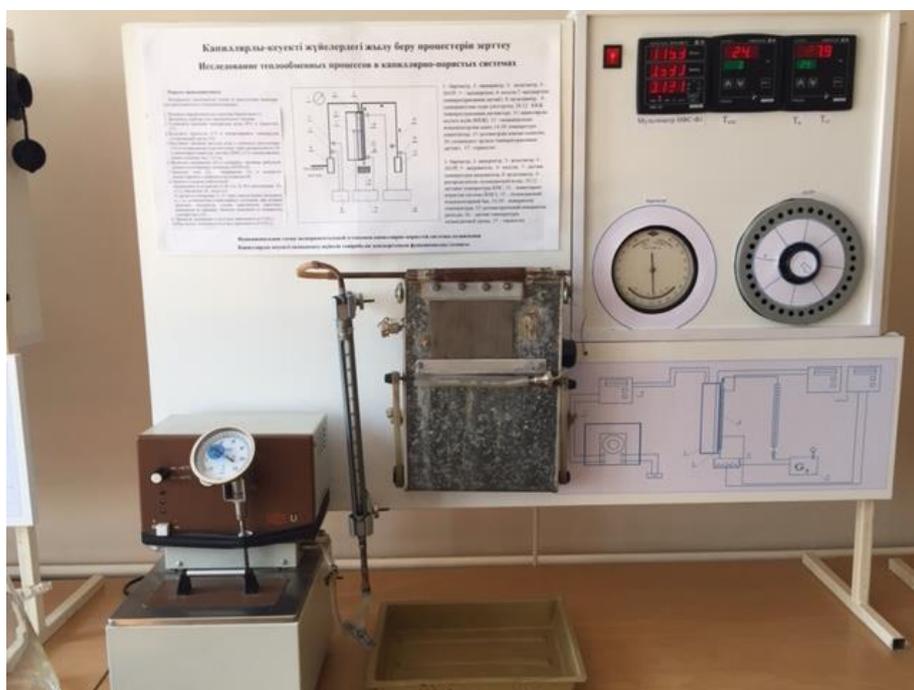
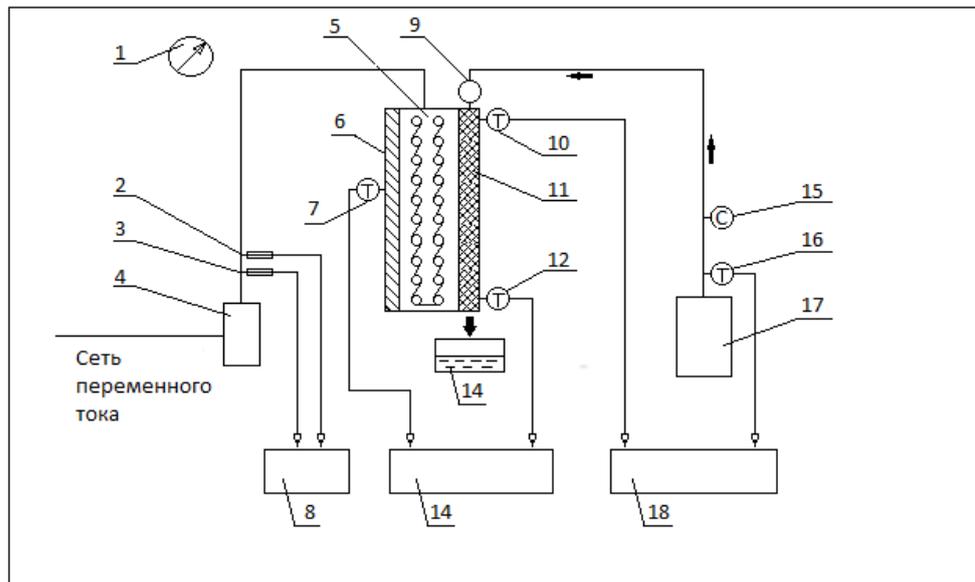


Рисунок 3.10 – Внешний вид стенда для исследования теплообменных процессов в капиллярно-пористых системах



1 – барометр; 2 - индикатор амперметра; 3 – индикатор вольтметра; 4 – ЛАТР; 5 – нагреватель; 6 – модель кессона; 7 – датчик температуры нагревателя; 8 – мультиметр ИФС-Ф1; 9 – распределитель охлаждающей воды; 10 – датчик температуры КПС; 11 – капиллярно-пористая система (КПС); 12 – датчик температуры; 13 – охлаждающий конденсаторный бак; 14 – измеритель температуры TRM -200; 15 – ротаметрический измеритель расхода; 16 – датчик температуры охлаждающей среды; 17 – термостат; 18 – измеритель температуры TRM -200.

Рисунок 3.11 – Функциональная схема экспериментальной установки капиллярно-пористой системы охлаждения

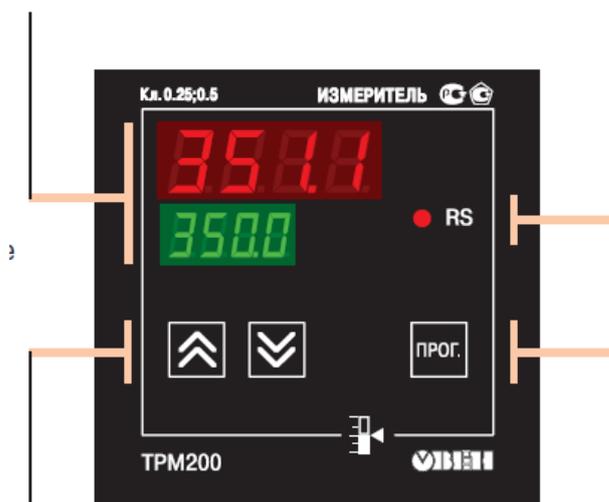


Рисунок 3.12–Измеритель температуры TRM -200



Рисунок 3.13– Мультиметр ИФС- Ф1

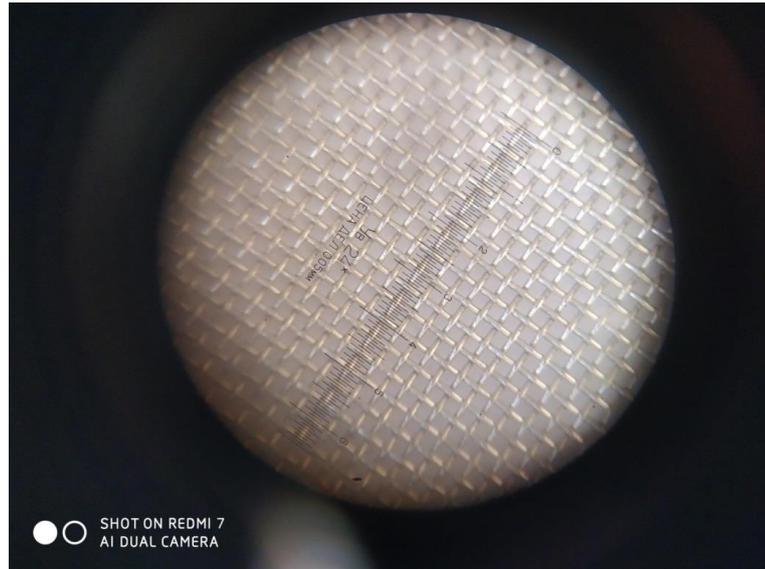


Рисунок 3.14– Сетчатые материалы (нержавеющая сталь) [131]

Описание экспериментального стенда. На рисунке 3.11 показана функциональная схема экспериментальной установки, реализующей охлаждение нагретой поверхности капиллярно-пористой структурой, которая моделирует кессон где имеют место процессы теплообмена, происходящие путем парообразования жидкости в пористых структурах, а подвод охлаждающей жидкости производится при комбинированном действии капиллярного и гравитационного потенциала.

В качестве пористой структуры применялись гладкие нержавеющие сетки простого переплетения с шириной ячеек в свету $(0,08 - 0,4) \times 10^{-3}$ м (рис.3.9, 3.14) [131]. На рисунке 3.14 приведен снимок сетки, поры которой измерены с помощью оптического монокуляра с ценой деления 0,05 мм. Размер поры согласно ГОСТ 6613–86 [132] составляет $(0,028 \pm 0,011) \times 10^{-3}$ м.

Опыты проводились с одним, двумя и тремя слоями сеток при различном их наборе. Диаметр проволоки $(0,05 - 0,15) \times 10^{-3}$ м.

Барометрическое давление определялось по барометру-анероиду класса точности 0,1 (1)

Регулирование электрической мощности проводилось с помощью ЛАТРа (4), контроль тока (2) и напряжения (3) проводился цифровым мультиметром ИФС-Ф1 (8), имеющим 3 индикатора для отображения напряжения, тока и мощности.

На рисунке 3.12 показан внешний вид измерителя температуры TRM - 200, мультиметр ИМС- Ф1 показан на рисунке 3.13.

Обогрев теплоотдающей стенки осуществлялся электрическим нагревателем (5). Нагреватель состоит из нихромовой проволоки, заключённой в керамическую изоляцию. Подвод электрической энергии осуществлялся от

сети 220 В к нагревателю (5), расположенному на нижней стороне рабочей металлической поверхности кессона (6).

Мощность нагревателя варьировалась $Q = (0,05-2) \times 10^3$ Вт. Исследуемая поверхность теплообмена капиллярно-пористой структуры составила (активная площадь) $F = 94,64$ см². Тепловая нагрузка (плотность теплового потока) изменялась в интервале $(0,1-2) \times 10^5$ Вт/м². Пример расчета погрешностей [133] для удельного теплового потока $q = Q/F$ ($Q = 200$ Вт, $F = 94,64 \times 10^{-4}$ м²) $q = 2,11 \times 10^4$ Вт/м², приведен в приложении Б. Погрешность измерений напряжения составила $(U) = \pm 0,5\%$, тока $(I) = \pm 0,5\%$, мощности $(P) = \pm 1\%$.

Технические характеристики мультиметра ИМС- Ф1 производства OWEN, работающего в диапазоне 90 - 264 В переменного тока частотой 47-63 Гц приведены в каталоге фирмы OWEN [134]. Изменение напряжения возможно в пределах от 40 – 400 В, тока 0,02 - 5 А.

К нагреваемой рабочей поверхности (6) прикреплялись пористые сетки из нержавеющей стали (11). Прижатие пористой структуры к охлаждаемой стенке осуществлялось с помощью пластины, структура приваривалась к стенке точечной сваркой. При проведении экспериментов сетки предварительно очищаются и обезжириваются.

Измерения проводятся с водой на открытой испарительной системе при давлении $P = 0,1$ МПа. Дистиллированная вода из термостата (17) подводилась к медной трубке распределителя охлаждающей воды (9), затем поступала к пористой сетчатой структуре (11).

Расходы охлаждающей циркуляционной воды измерялись ротаметром РМ - 0,04 ЖУЗ класса точности 2,5, тарированным объемным способом. [135]. Погрешность измерения расхода охлаждающей воды $\pm 2,5\%$.

Расход охлаждающей жидкости варьировался от минимально возможного $m_{жс} = m_{п}$, при котором расход слива $m_{сл} = 0$, или принимал наименьшее значение, когда устанавливалось равномерное распределение температуры охлаждаемой стенки. Скорость жидкости принимала значения $(0,7- 0,1) \times 10^{-3}$ м/с, избыток жидкости составлял (поддерживался) $m_{ж} = 1,1 \times m_{п}$.

Температура охлаждающей жидкости измерялась с помощью термометра биметаллического погружного серии S5300 ТС (16) с погрешностью $0,1^\circ$ С. Температура циркуляционной воды предварительно задается на термостате UTU-2, далее контролируется термометром (16).

Стекающий избыток жидкости собирается в охлаждающий конденсаторный бак (13). После охлаждения жидкость можно вернуть в термостат (17) и вновь направить для повторного использования.

Температуры нагревателя, КПС, охлаждающей среды измерялись датчиками температуры (7,10,12,16), передающие сигналы к высокоточным цифровым измерителям температуры TRM -200 производства OWEN (14,18). Для определения температуры стенки электроды термомпары приварены к задней стороне нагреваемой поверхности модели кессона (6).

Температура стенки измерялась датчиками температуры - термопарами ТХК (L) (-200...+800 °С), также передающими сигналы к высокоточным цифровым измерителям температуры TRM -200 (18). Погрешность измерения температуры равна $\pm 0,5\%$.

Методика измерений. Определялось барометрическое давление по барометру-анероиду (1). На функциональной схеме экспериментальной установки показаны основные элементы контура охлаждения нагреваемой рабочей поверхности, покрытого капиллярно-пористой структурой (11), предварительно обезжиренной спиртовым раствором.

Подвод электрической энергии к нагревателю (5) осуществлялся с помощью ЛАТРа (4), контроль тока (2) и напряжения (3) проводился цифровым мультиметром ИМС- Ф1 (8), имеющим 3 индикатора для отображения заданной мощности, напряжения и тока.

После выставления температуры охлаждающей жидкости 20°C на регуляторе термостата (17) и его включения, вода поступает в контур охлаждения и ее температура контролируется датчиком (16) в течении эксперимента.

Расход охлаждающей воды измерялся ротаметром (15). После выставления заданного расхода воды (охладителя) она поступала в распределитель охлаждающей воды (9).

Для равномерной подачи охладителя на стенку кессона, покрытого капиллярно-пористой структурой (11) в распределителе, имеются отверстия. Заданный расход охлаждающей воды обеспечивает режим капеза $m_{ж} = 1,1 \times m_{п.}$

После задания тепловой нагрузки температура стенки ($T_{ст}$) контролировалась измерителем (14). Для данного значения q определялась величина $\Delta T = (T_{ст} - T_{н})$, где $T_{н}$ - температура насыщения при заданном давлении ($T_{н}$) определяется по таблицам [136].

Подведенный тепловой поток определялся по формуле $Q = U \times I$ и определены зависимости $q = f(\Delta T)$ температуры металла охлаждаемой стенки от тепловой нагрузки, расхода и вида капиллярно-пористой структуры.

Выводы по разделу 3

Была создана экспериментальная установка для исследования капиллярно-пористых структур (открытая испарительная система при $P=0,1$ МПа), реализующая охлаждение нагретой поверхности капиллярно-пористой структурой, моделирующей кессон, в которой процессы теплообмена происходят путем парообразования жидкости в пористых структурах. Подвод охлаждающей жидкости производился при комбинированном действии капиллярного и гравитационного потенциала.

Экспериментальная установка предназначена для исследования теплообменных процессов в капиллярно-пористых системах, для использования при подготовке магистрантов и докторантов по дисциплинам

«Повышение эффективности и надежности теплообменного оборудования с использованием пористых структур», «Теория и техника инженерного эксперимента», «Научные исследования и инженерный эксперимент» по специальности «Теплоэнергетика», а также для научно-исследовательской работы обучающихся.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ

4.1 Результаты исследования и их обсуждение

В главе 3 описаны экспериментальные исследования, результаты которых приведены на рисунке 4.1, где показано влияние тепловой нагрузки на температуру стенки в зависимости от вида пористой структуры (табл. 4.1) и избытка охлаждения жидкости. Сетки и стенка выполнены из нержавеющей стали [122, 123].

Анализ экспериментальных данных показал, что для $q = (1-8) \times 10^4$ Вт/м², режим кипения является переходным. Для этого режима обнаружено существенное влияние расхода охлаждающей жидкости $m_{ж}$ и вида пористой структуры. Особенно это выражено у сеток с крупным размером ячеек. По своим характеристикам они приближаются к тонкопленочным испарителям.

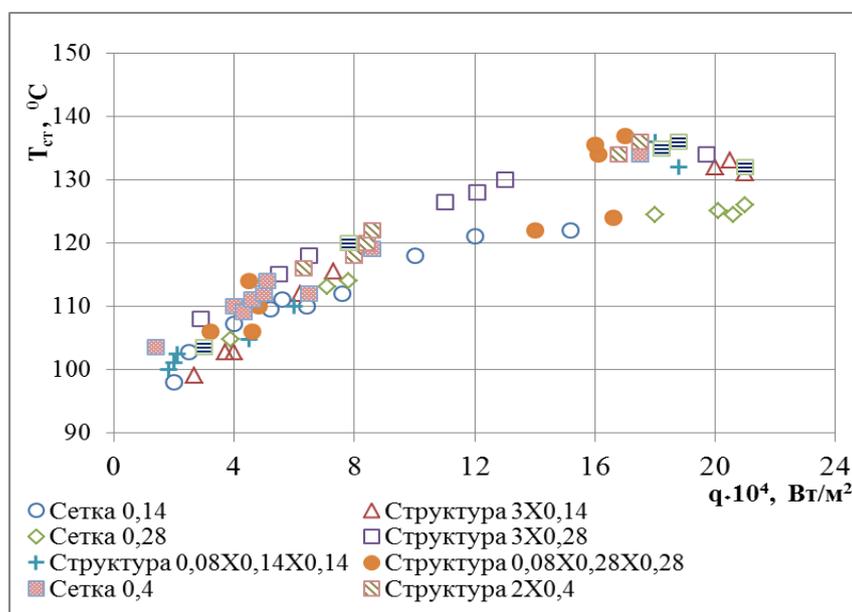


Рисунок 4.1 – Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для $p = 0,1$ МПа; $m_{ж} = (1 \dots 7,5) \times m_{п}$.

Таблица – 4.1 Размеры сеток и их обозначения

Размер сетки (10^{-3} м)	Пористая структура, состоящая из (1,2,3) слоев сеток разного размера
1	2
0.14	1×0.14
0.28	1×0.28

Продолжение таблицы 4.1

1	2
0.14	3×0.14
0.28	3×0.28
0.08	–
0.08; 0.14; 0.14	0.08×0.14×0.14 (3 слоя разного размера сеток)
0.08; 0.28; 0.28	0.08×0.28×0.28 (3 слоя разного размера сеток)
0.4	1×0.4
0.4	2×0.4
0.55	2×0.55

Перераспределение тепловых потоков слива и кипения приводит к более позднему закипанию жидкости по сравнению с тепловыми трубами.

Рост величины q , связанный с возникающими паровыми пузырями, которые достигают определенных размеров, увеличивающих термическое сопротивление пограничного слоя, обуславливает некоторое снижение коэффициента теплообмена α .

Не выявлено заметного влияния расхода жидкости для пределов изменения $m_{ж} = (1 - 7,5) \times m_{н}$ для области развитого пузырькового кипения ($q > 8 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$), вплоть до критических тепловых нагрузок с разрушением стенки.

Не замечено снижения теплопередающей способности системы для различного размера ячеек структуры, как в тепловых трубах, так как поступление расхода жидкости не ограничивается ни возрастающим гидравлическим сопротивлением, ни уменьшением капиллярной впитываемости структуры.

Обобщение опытных данных показало, что $q \sim \Delta T^{1,88}$; «Эффективной является однослойная структура вида 1x0.14, которое обеспечивало высокое значение коэффициента теплоотдачи до $50 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, либо двухслойная – $2 \times 0.4 \times 10^{-3} \text{ м}$, $2 \times 0.55 \times 10^{-3} \text{ м}$, но при этом следует ожидать большего перегрева стенки. Крупные размеры ячеек позволяют снизить требование к очистке жидкости и уменьшают гидрогазодинамическое сопротивление» [122, с.423].

Структуры, изображенные на рисунке 4.1, имеют неизменный по нормали размер пор. Они показали высокую эффективность при работе в поле гравитационных сил, что отличает их от тепловых труб, у которых наступал аварийный режим их работы.

«В области пузырькового кипения влияние расхода жидкости на величину α незначительное. Однако при относительно малых расходах жидкости обеспечивается надежный теплосъем за счет сохранения

устойчивости пульсирующей пленки жидкости. Данный факт выгодно отличает систему от тонкопленочных испарителей, в которых происходит разрыв стекающей пленки, что приводит к необходимости значительного увеличения расхода жидкости (в 100-1000 раз)» [123].

Наилучшие результаты достигнуты для капиллярно-пористой структуры вида $(2 \times 0,55) \times 10^{-3}$ м, которая позволяет отводить наибольшие тепловые потоки при комбинированном действии массовых и капиллярных сил. В пористой структуре, которая составлена из однослойной сетки $0,55 \times 10^{-3}$ м, на поверхности образуется малоустойчивая пленка жидкости. В структурах, состоящих из двух или более сеток, имеет место возрастание перегрева стенки и, в дальнейшем, рано наступает кризисное явление. Можно добавить, что при повышенном размере ячеек пористой сетки, не требуется высокая очистка, как это требуется в тепловых трубах и тонкопленочных испарителях.

Таблица 4.2 - Теплопередающие возможности исследованных капиллярно-пористых структур, тепловых труб и тонкопленочных испарителей

Вид капиллярно-пористой сетчатой структуры	Тепловая нагрузка, $\times 10^4$ Вт/м ²					
	2	4	10	20	40	60
Предлагаемые структуры						
0,08x0,14x0,14	5,2	13,4	20,5	37,1	50	Пережог стенки
0,55	6,5	16,4	22,7	53,3	61	Пережог стенки
2x0,55	7,4	18,2	23,4	50,3	57	Пережог стенки
2x1	8,1	19,3	24,7	55,6	62,4	Пережог стенки
Тепловые трубы						
0,08x0,14x0,14	2,5	10	40	Пережог стенки		
2x0,55	Не работоспособны					
Тонкопленочные испарители (без капиллярно-пористой структуры)						
-	3,7	5,7	8	Пережог стенки		

4.2 Обсуждение экспериментальных данных для процессов кипения в пористых структурах

Избыток жидкости дает возможность устанавливать структуры малой толщины, что увеличивает коэффициент теплоотдачи до 80%; отводить более высокие величины q за счет интенсивного разрушения и удаления паровых образований из зоны нагрева; применять структуры с повышенным размером ячеек с отводом тепла в 3–4 раза больше, чем тепловыми трубами. Повышенный размер ячеек позволяет отводить тепло даже без применения интенсификаторов, коэффициент теплоотдачи которых выше на 30–40 %.

Значительно увеличивать расход охлаждающей жидкости нецелесообразно, поскольку происходит перераспределение потоков слива и кипения, что удорожает систему. Поэтому целесообразно ввести понятие оптимального (минимального) избытка жидкости, при котором устанавливается равномерное температурное поле по высоте и длине теплообменной поверхности.

Минимальный (оптимальный) расход охлаждающей жидкости определяется следующим образом: до величины ($q \leq 100 \text{ кВт/м}^2$) расход поддерживается близким к режиму работы тепловых труб при $b_2 = 0.28 \times 10^{-3} \text{ м}$ и на 30% больше для величины $b_2 > 0.28 \times 10^{-3} \text{ м}$; при величине $q > 100 \text{ кВт/м}^2$ превышение расхода жидкости в (1,3–2) раза для величины $b_2 \leq 0.28 \times 10^{-3} \text{ м}$ позволяет расширить диапазон отвода величины q в (2–3) раза по сравнению с тепловыми трубами [122].

Оценка исследованной системы с тепловыми трубами, тонкопленочными испарителями и кипением в большом объеме на гладкой поверхности показала на расширение предела отвода величины q , приближаясь к кипению в большом объеме. Для величины $q \leq 80 \text{ кВт/м}^2$ сказывается влияние толщины пленки. При капиллярном подводе жидкости устанавливается меньшая толщина, что интенсифицирует теплообмен. Большие коэффициенты теплообмена для пористой системы объясняются более интенсивным процессом кипения за счет быстрого перегрева тонкого слоя жидкости и большей плотностью центров парообразования.

Для величины $q > 8 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$ толщина пленки в пористой структуре оказывает меньшее влияние, а ухудшение теплообмена связано с достижением определенной интенсивности парообразования в порах, скопления в них паровых объемов, ограничивающих подвод свежих порций жидкости и поверхности нагрева. Улучшенные теплообменные характеристики в этом случае объясняются ролью сил тяжести. Происходит усиление турбулизации пристенного пульсирующего слоя за счет улучшения циркуляции жидкости и пара в структуре при интенсивном отводе паровых объемов с сохранением высокой устойчивости пульсирующей пленки жидкости и активном заполнении ячеек структуры свежими порциями поступающего теплоносителя [122 с. 425].

Стабилизация и устойчивость (тепловая и гидродинамическая) пристенного слоя определяется наличием пульсирующей жидкостной пленки под паровыми пузырями, через которую тепло передается путем теплопроводности и за счет парообразования переносится в пузыри. Происходит беспорядочная турбулизация пограничного слоя растущими и лопающимися паровыми пузырями. Рост турбулизации пограничного слоя и повышение устойчивости пульсирующей пленки жидкости приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи и расширению предела теплопередающей возможности системы.

Оказывает влияние гидродинамическое воздействие потока жидкости на механизм процесса парообразования, облегчая отрыв паровых пузырей раньше, чем они достигнут величины отрывного диаметра. Относительно “холодные” порции жидкости из ядра стекающего потока, устремляясь к стенке, вытесняют двухфазную смесь, снижая ее толщину и термическое сопротивление. При достижении определенных перегревов жидкости происходит потеря устойчивости пристенного пульсирующего слоя, закипание паровыми пузырями ячеек сетки и прекращение доступа жидкости к обогреваемой зоне. Резкий рост термического сопротивления приводит к перегреву стенки вплоть до ее пережога.

Интенсивность теплообмена пористой системы уступает кипению в большом объеме на гладкой поверхности, т.к. по теории микрослоевого испарения основная доля тепла подводится к основанию паровых пузырей и расходуется на испарение в пузыри. В пористой системе эта величина пропорциональна $\sim \Delta T^2$. Конвективная же составляющая переноса пренебрежимо мала, что и снижает темп роста теплового потока.

Охлаждаемые элементы в энергетических устройствах могут располагаться в гравитационном поле наклонно. Поэтому исследовано влияние ориентации поверхности на теплообмен. Угол наклона изменялся в пределах от 0 до ± 90 градусов, где знак « \pm » означает выход пара против направления сил тяжести. Изучались структуры с максимальным $(0,08 \times 0,14 \times 0,4)$ и минимальным $(3 \times 0,4)$ капиллярным потенциалом.

Максимальная интенсивность получена при угле наклона $\beta = 0$ (вертикальное положение). В то же время не обнаружено заметного отличия в интенсивности теплообмена при углах наклона до ± 45 градусов для всех структур. При углах наклона ± 75 градусов, влияние ориентации очень слабое, как и при кипении жидкости в большом объеме, за исключением горизонтальной плиты, обращенной вниз; это объясняется облегченным возникновением в граничном слое дополнительных вторичных течений за счет массовых сил, разрушающих паровые конгломераты.

Для углов наклона больших ± 75 градусов зависимости носят ярко выраженный характер, особенно для структур с малым капиллярным потенциалом, т.к. силы тяжести это основные транспортные, а капиллярные -

служат для равномерного распределения жидкости по порам и капиллярам структуры, и чем большим капиллярным потенциалом обладает структура, тем равномернее распределение температуры в стенке при различных q .

Сравнение с тепловыми трубами для $q > 100$ кВт/м² показывает, что интенсивность в тепловых трубах ниже ~ на 40%, либо они не работоспособны. Для $q < 20$ кВт/м² тепловые трубы имеют большую интенсивность. В области $(2-10) \times 10^4$ Вт/м² наблюдается удовлетворительное согласование опытных данных [122, с.426].

4.2.1 Результаты исследования теплообменных процессов в открытой испарительной системе при $P=0,1$ МПа.

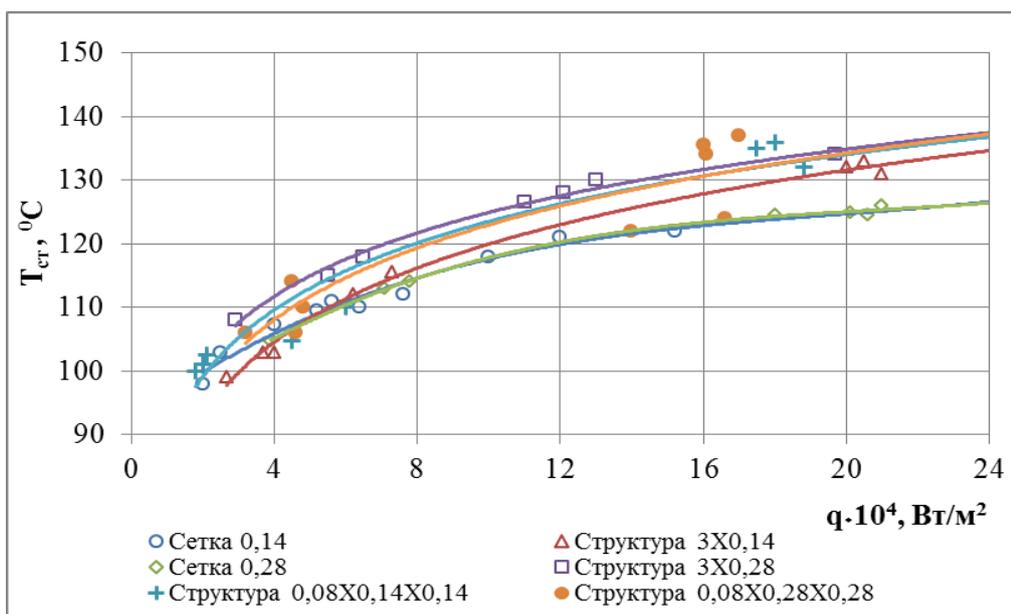


Рисунок 4.2 – Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для $p = 0,1$ МПа; $m_{ж} = 0,1 \times m_{п}$.



Рисунок 4.2.1 – Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для сетки $0,14 \times 10^{-3}$ м



Рисунок 4.2.2 – Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для структуры $3 \times 0,14 \times 10^{-3}$ м



Рисунок 4.2.3 – Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для сетки $0,28 \times 10^{-3}$ м

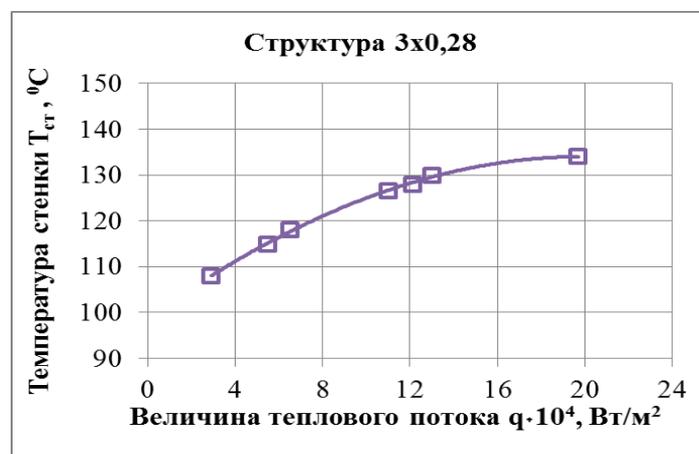


Рисунок 4.2.4 – Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для структуры $3 \times 0,28 \times 10^{-3}$ м

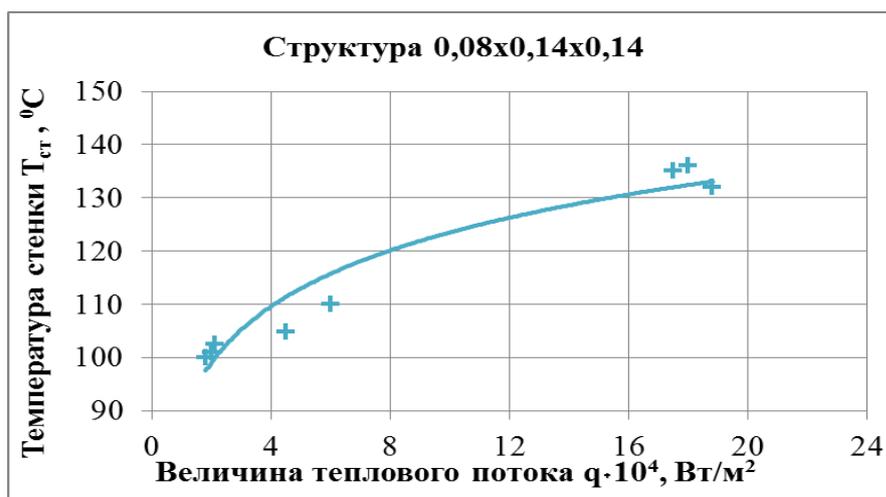


Рисунок 4.2.5 – Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для структуры $3 \times 0,08 \times 0,14 \times 0,14 \times 10^{-3}$ м

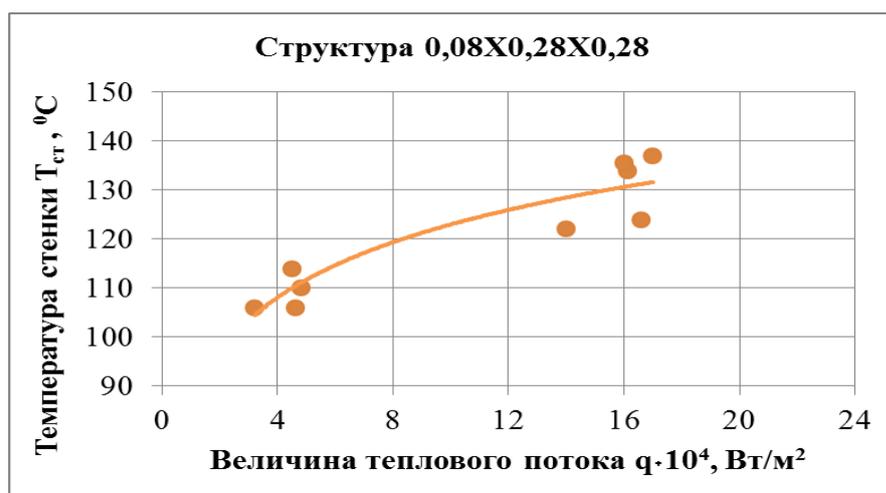


Рисунок 4.2.6 – Зависимость температуры стенки от плотности теплового потока для структуры $3 \times 0,08 \times 0,28 \times 0,28 \times 10^{-3}$ м

В разделе 3.3 описана экспериментальная установка для исследования капиллярно-пористых структур, моделирующих охлаждение кессона металлургической печи. Результаты исследования приведены на рисунках 4.2 и 4.3. На рисунке 4.2 для сеток размером $1 \times 0,14 \times 10^{-3}$ м и $1 \times 0,28 \times 10^{-3}$ м замечено изменение температуры стенки в пределах 100-120°C, тогда как для остальных структур эта величина достигала почти до 140°C. На рисунке 4.3 показана влияние теплового потока на перегрев стенки ΔT , К относительно температуры

пара при $P=0,1$ МПа. В интервале температур перегрева до 20, К величина теплового потока достигала $q=9 \times 10^4$ Вт/м² для сеток размером $1 \times 0,14 \times 10^{-3}$ и $1 \times 0,28 \times 10^{-3}$, $q=6 \times 10^4$ Вт/м² для структуры размером $3 \times 0,14 \times 10^{-3}$ и минимальное значение $q=3 \times 10^4$ Вт/м² для структуры размером $3 \times 0,28 \times 10^{-3}$ м.

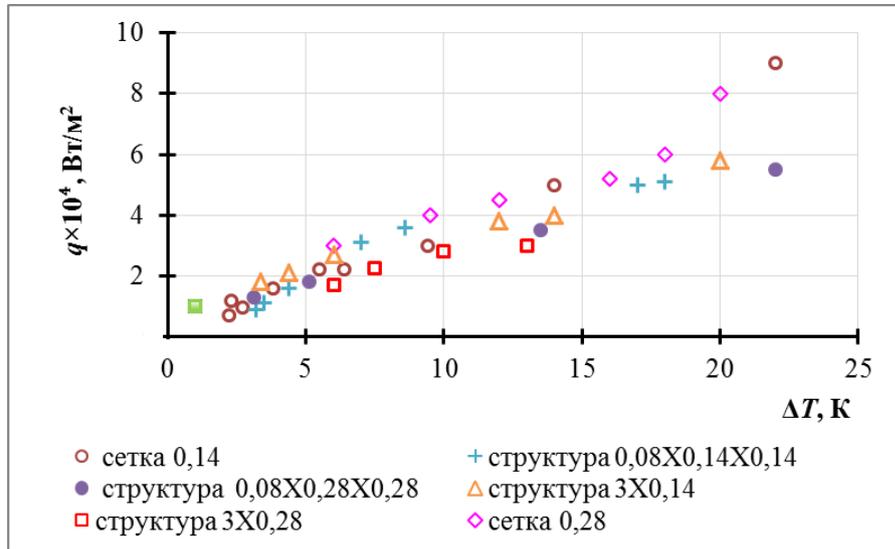
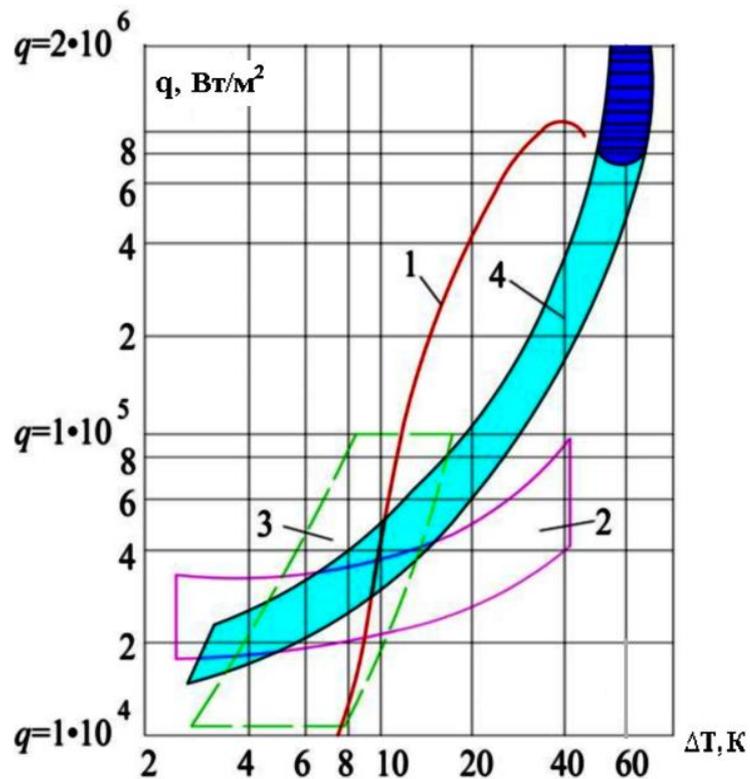


Рисунок 4.3– Влияние теплового потока на перегрев стенки относительно температуры пара при $P=0,1$ МПа



1 – кипение в большом объеме; 2– область работы тепловых труб [113, 137-142], 3 – область работы тонкопленочных испарителей [143-145]; 4 – исследованная капиллярно-пористая система охлаждения (КПС).

Рисунок – 4.4. Влияние плотности теплового потока на перегрев стенки относительно температуры пара

На рисунке 4.4 показана сравнительная оценка влияния плотности теплового потока на перегрев стенки относительно температуры пара [146-147]. Полученная область значений исследованной системы охлаждения занимает промежуточное положение между кривой для кипения в большом объеме, тонкопленочными испарителями [143-145] и областью работы тепловых труб [113, 137–142]. Однако область КПС более крутая, чем область 2 для тепловых труб и более пологая области 3 для тонкопленочных испарителей тепловых труб и кривой 1 для кипения в большом объеме.

Это возможно объясняется тем, что для тепловых потоков, меньших 3×10^4 Вт/м², существенным оказывается влияние толщины пленки жидкости. При капиллярном подводе жидкости (область 2) устанавливается меньшая толщина пленки и коэффициенты теплоотдачи несколько выше. Высокая интенсивность теплообмена, отражаемая областями 2 и 4, объясняется большей плотностью центров парообразования, обусловленной наличием металлического каркаса сеток, чем это имеет место при кипении жидкости в большом объеме и тонких пленках.

Для тепловых потоков, больше, чем 3×10^4 Вт/м², когда наступает активный процесс кипения жидкости в фитиле, толщина пленки оказывает меньшее влияние. Ухудшение же отвода тепла в тепловых трубах связано с тем, что достигается предельная интенсивность парообразования и затрудняется подвод жидкости к отдельным зонам поверхности нагрева [113]. Аналогичная картина наблюдается и при кипении жидкости в большом объеме [148-152]. Возникает опасность кризиса кипения. При такой ситуации положительное влияние могут оказать массовые силы, так как за счет избытка жидкости в поперечном сечении фитиля более интенсивно разрушаются паровые образования в структуре, с последующей турбулизацией пульсирующего пограничного слоя.

Также облегчена организация заполнения ячеек структуры вновь поступающей жидкостью. Хотя возникает большой перегрев стенки по сравнению с кипением жидкости в большом объеме, коэффициенты теплоотдачи увеличиваются в сравнении с тепловыми трубами, расширяя предел отвода тепловых потоков.

Меньшая интенсивность теплообмена по сравнению с кипением в большом объеме в области развитого пузырькового кипения, видимо, может быть объяснена теорией микрослоевого испарения жидкости в паровой пузырь

[149]. Согласно этой теории, основная доля тепла подводится к основанию паровых пузырей и расходуется на испарение в пузыри.

Выводы по разделу 4

Пористый теплообменник относится к промышленным высокофорсированным огнетехническим установкам. Предложенная капиллярно-пористая система охлаждения кессонов повышает надежность работы агрегатов, интенсифицирует теплопередачу в пористой системе, обеспечивает взрывобезопасность работы высокофорсированных огнетехнических установок.

Была создана экспериментальная установка для исследования капиллярно-пористых структур (открытая испарительная система при $P=0,1$ МПа). Показано, что в интервале температур перегрева до 20, К величина теплового потока достигала $q=9 \times 10^4$ Вт/м² для сеток размером $1 \times 0,14 \times 10^{-3}$ и $1 \times 0,28 \times 10^{-3}$, $q=6 \times 10^4$ Вт/м² для структуры размером $3 \times 0,14 \times 10^{-3}$ и минимальное значение $q=3 \times 10^4$ Вт/м² для структуры размером $3 \times 0,28 \times 10^{-3}$ м.

Эффективной является однослойная структура вида $1 \times 0,14$, которая обеспечивала высокое значение коэффициента теплоотдачи до 50×10^4 Вт/м²К, либо двухслойная – $2 \times 0,4 \times 10^{-3}$ м, но при этом следует ожидать большего перегрева стенки. Крупные размеры ячеек позволяют снизить требование к очистке жидкости и уменьшают гидрогазодинамическое сопротивление

5 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛООБМЕН, ГИДРОДИНАМИКУ И ПРОЧНОСТЬ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ

5.1 Анализ критериальных уравнений процессов кипения в пористых структурах

Обсуждение критериальных уравнений процессов кипения и парообразования выявило:

1. Для исследованной пористой системы не наблюдается крутой зависимости $\alpha = f(b_c, h, L)$, как это имеет место в тепловых трубах.

2. Функция $q = f(\Delta T)$ показывает более «сильную» зависимость, в отличие от тепловых труб, что можно объяснить влиянием избытка жидкости.

3. Влияние скорости и недогрева жидкости является следствием избыточного расхода жидкости, не сильно влияет на величину q , но его существование может обеспечить расширение границ рабочих параметров системы ($q_{кр}$).

4. Наклон системы снижает величину q .

5. Повышенный размер ячеек и большая толщина структур уменьшают величину q .

6. Давление более плавно влияет на величину q , чем при кипении в большом объеме, т.к. сдерживающим фактором является наличие капиллярного потенциала.

7. Рост аккумулирующей способности стенки увеличивает величину q .

8. Плотность центров и частота генерации имеют большие величины, что связано с большим и более равномерным перегревом погранслоя, а отрывные диаметры – меньшие, чем при кипении в большом объеме [123].

5.2 Анализ голографических интерферограмм и кинограмм процессов кипения в пористых структурах

Голографические интерферограммы и их расшифровка показали, что при величине $q = const$ получены стабильные концентрации интерференционных полос во времени, характеризующие процесс кипения как квазистационарный. Наблюдаемая деформация полос при интерференции может свидетельствовать о пульсирующем режиме процесса кипения и существовании в ячейках структур центров образования пара, которые постоянно меняются. В пространстве около сетки пористой структуры наблюдается процесс выброса капель жидкости (рис. 5.1).

Для различных величин q по степени деформации формы и плотности интерференционных полос оценены и рассчитаны тепловое и гидродинамическое состояние процессов тепло- и массопереноса. Становится возможным судить о микропроцессах и некоторых локальных процессах, например, о температурном микрорельефе, о явлениях флуктуации, о выбросах

капель. Чем процесс протекает интенсивнее, тем картины выражены более ярко. Наблюдаются некоторые дифференциальные картины, что невозможно выявить другими способами [123, 124, с. 428].

В околосеточном пространстве активные процессы происходят в пределах 4×10^{-3} м при $q = 40$ кВт/м² и 7×10^{-3} см при $q = 120$ кВт/м² (рис. 5. 2).

Для малых значений величины q зоны однородности более укрупненные, что указывает на стабильность процессов в некоторой локальной зоне или даже на значительном участке поверхности. При высоких значениях величины q зоны концентрируются вплоть до размеров отдельных ячеек структуры. Следовательно, можно исследовать характер кипения жидкости в одной или нескольких ячейках.

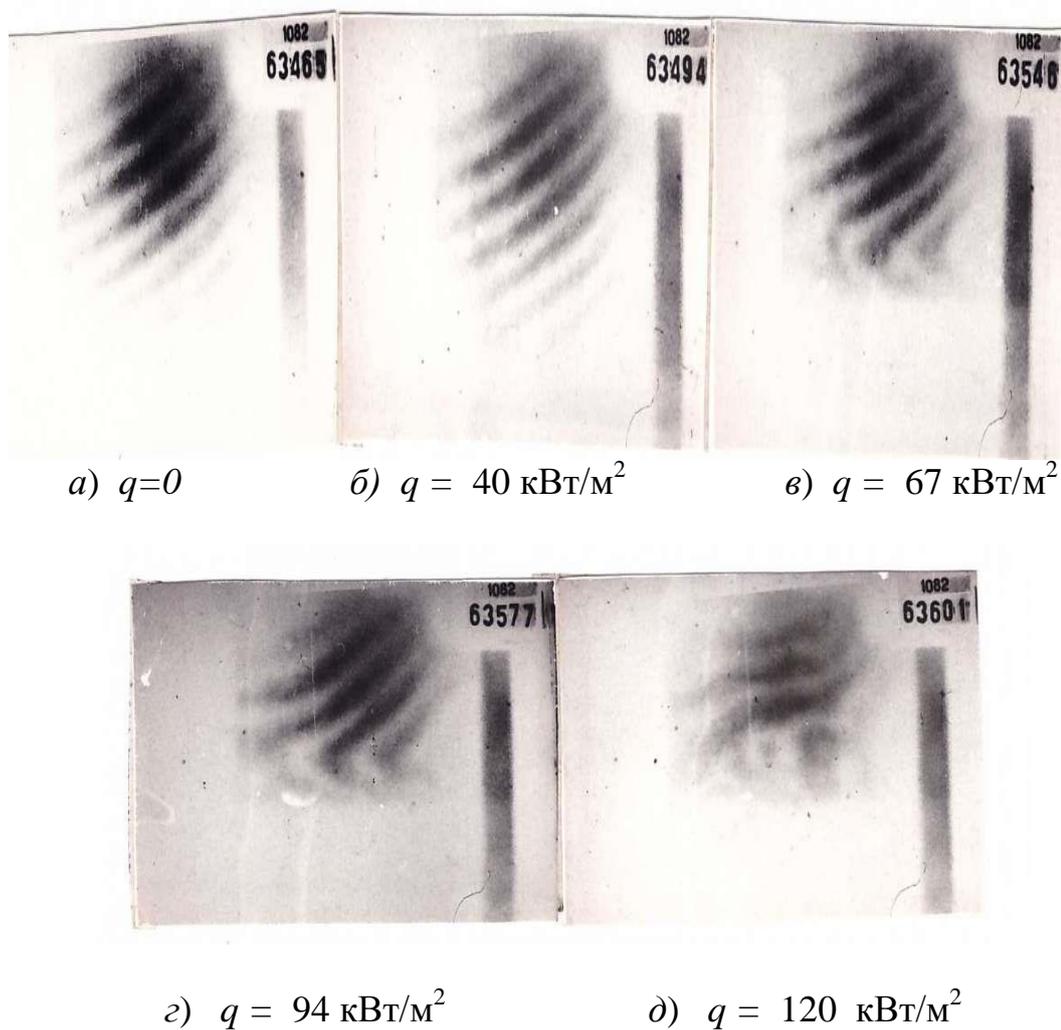
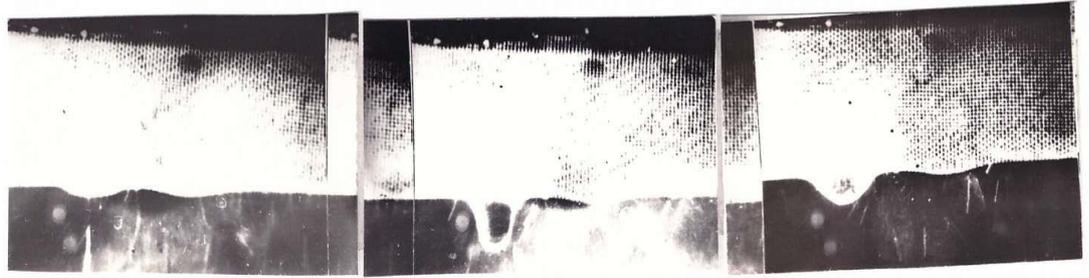
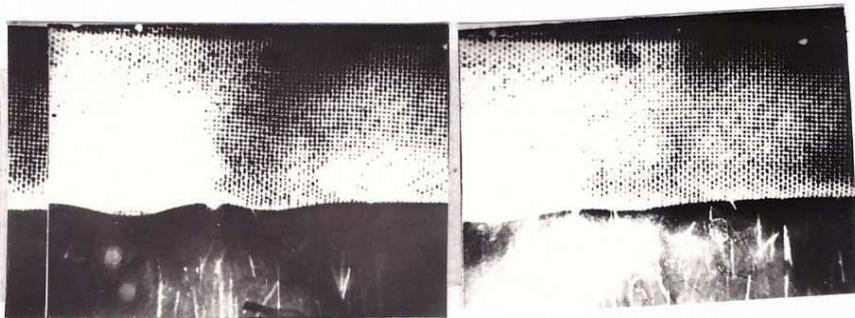


Рисунок 5.1 – Голографические интерферограммы процесса парообразования в сетчатой пористой структуре вида 0.4 при $q=var$; $\tilde{m} = m_{ж}/m_{п} = 1,1 = onm (min)$ [123, с.369]



а) $q=40 \text{ кВт/м}^2$ $\tau=0$; б) $\tau=0.46 \text{ с}$; в) $\tau=0.71 \text{ с}$



з) $\tau=0.81 \text{ с}$; д) $q=67 \text{ кВт/м}^2$, $\tau=0$;

а, б, в, з – для $q=40 \text{ кВт/м}^2$; д) – для $q=67 \text{ кВт/м}^2$ [123, с.369].

Рисунок 5.2 – Кинограмма явления выброса капель жидкости в процессе парообразования из сетчатой пористой структуры вида $0,14 \times 0,4$ при $\tilde{m} = m_{\text{опт}(\text{min})}$, фиксированной тепловой нагрузке q и переходном режиме ($\tau = \text{var}$)

Интерференционные картины, полученные для переменного режима работы, когда расход жидкости уменьшался до нулевого значения [92,118] выявили состояния, отвечающие как оптимальным режимам работы, так и критическим условиям теплообмена (рис. 5.1) [124, с.429].

Изменения оптической однородности при высоких значениях q или малых параметрах $m_{\text{ж}}/m_{\text{п}}$ свидетельствуют о концентрационных изменениях пароводяной смеси у нижней (верхней) образующих в зависимости от верхнего (нижнего) способа подвода жидкости.

Скоростная кино съемка [94,95] выявила тепловую и гидродинамическую обстановку в структуре в течение времени “жизни” капли избыточной жидкости при различных параметрах $m_{\text{ж}}/m_{\text{п}}$ (рис. 5.2)

Для всех величин q выделены области генерации пара и области питания жидкостью. Отчетливо видны перемещения и разрушения паровых

образований, облегченные действием сил тяжести и возникающие при этом пульсирующие течения жидкости. Внедрения ядра потока жидкости в пристенный пограничный слой способствует вытеснению двухфазной смеси, что снижает термическое сопротивление слоя, интенсифицируя теплообмен, и расширяя величины $q_{кр}$.

Рост величины q способствует увеличению числа центров парообразования. Появляются паровые пузыри и их различные образования, которые получены путем слияния отдельных пузырей. Выявлена картина заполнения и скопления паровых пузырей на мелкой сетке, которые находятся у стенки, а это является причиной создания “сухих” зон на стенке. Таких явлений не обнаружено для сетки с крупными размерами ячеек ($0,4 \times 10^{-3}$ м). Чувствительность структуры более высокая, т.к. она обладает меньшим гидравлическим сопротивлением и способностью лучше отводить, хотя и более крупные пузыри.

При малых величинах q для двухфазных потоков характерно слабовыраженное поведение в виде небольших взрывов. Для структур, состоящих из многих слоев сеток, выброс жидкости наблюдается в большем количестве, в структуре из одного слоя сетки. Причиной является кипение жидкости, которую впитывает нижний слой сеток. Они имеют более мелкие ячейки, и жидкость покидает структуру, унося с собой жидкость, принадлежащую внешнему слою. Размеры вылетающих из структуры капель не более ширины ячейки внешнего слоя. Зарегистрированы активно действующие центры вылета капель [124, с.430].

При минимальном (оптимальном) расходе жидкости время “жизни” паровых пузырей составляло не более $1/2500$ с, а время ожидания – (0.006–0.014) от времени “жизни” для величины $q = 120$ кВт/м² и вдвое больше для $q = 67$ кВт/м². Наблюдаемый выброс жидкости не приводит к нарушению работоспособности системы, как это имеет место в тепловых трубах.

Итак, первый слой структуры оказывает существенное влияние на интенсивность процессов тепло- и массопереноса, что также подтверждено солевым методом.

Для переходной области кипения время “жизни” пузырей увеличивается и достигает более секунды, а форма пузырей приближается к форме ячейки. Структура является антитурбулизатором, ухудшая интенсивность теплообмена. Выброс жидкости не замечен, а количество центров парообразования резко сокращено [124, с.431].

Рост величины q сопровождался увеличением плотности центров парообразования \bar{n} . При $q=67$ кВт/м² она составляла 18/144 пузырей/количество ячеек, а при $q = 120$ кВт/м² – 33/144 пузырей/количество ячеек.

Набор нагрузки увеличивал частоту образования пузырей, однако размер лопающихся пузырей по-прежнему не превышал ширины ячейки сетки. Для $q = 67 \text{ кВт/м}^2$, $\tau_{\text{жиз}} = 0.12 \text{ с}$, а для $q = 120 \text{ кВт/м}^2$ - $\tau_{\text{жиз}} = 0.036 \text{ с}$ при $m_{\text{ж}}/m_{\text{п}} = 5.2$.

Следовательно, при оптимальном расходе жидкости частота образования и отрыва пузырей в десятки раз больше, чем при кипении жидкости в большем объеме и одного порядка для кипящих жидкостных пленок, а отрывные размеры пузырей - в несколько раз меньше. При существенном избытке жидкости частота образования и отрыва пузырей приближается к кипению жидкости в большом объеме, размер же лопающихся пузырей по-прежнему не превышает ширины ячейки структуры [124, с.431]. Расход жидкости менее $m_{\text{опт}}$ приводит к резкому сокращению числу отдельных центров парообразования. Паровые пузыри начинают сливаться, при этом получается единая хаотичная бурлящая картина. Появляется значительное количество микровзрывов и наблюдается достаточно выброс мелких капель большой интенсивности. В дальнейшем уменьшение расхода жидкости способствует тому, что паровые объемы около поверхности могут заблокировать приток свежих порций охладителя. Возникает микролокальное пересыхание структуры, что может привести к разрыву пленки жидкости в некоторых местах этой пленки. “Сухие” места, возникшие на стенке, сильно перекаливаются, и жидкость не может смочить поверхность стенки.

С увеличением расхода жидкости опять наблюдается появление паровых пузырей. До некоторого значения расхода жидкости плотность центров парообразования продолжает расти, а далее происходит перераспределение тепловых потоков слива и кипения. Этот процесс существенно увеличивает время “жизни” паровых пузырей и резко снижает скорость роста величины \bar{n} .

«Поэтому граница перехода, где значения \bar{n} и $\tau_{\text{жиз}}$ претерпевают сильные изменения, определяла оптимальный расход жидкости (он же являлся и минимальным)» [124, с.431].

5.3 Анализ результатов аналитического исследования

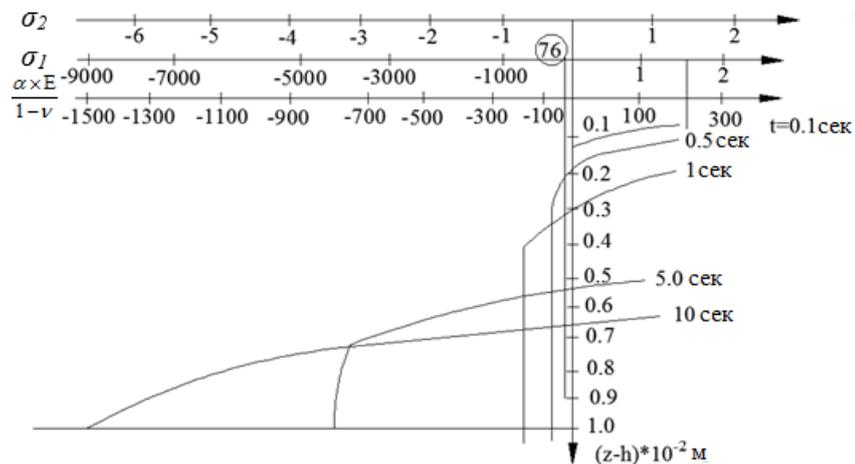
Функциональные зависимости величин q_1, q_2, q_3 от времени при фиксированных значениях размера частиц для породы покрытий, либо глубины проникновения температурных возмущений для металла, рассчитывались на ПК применительно к пластинам, выполненным из кварца, гранита, тешенита и металла. Термомеханические характеристики породы покрытий и металлов сведены в таблицу 5.1.

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения можно проследить на рисунке 5.3, которые представляют собой эпюры напряжений внутри пластины из тешенитного покрытия для различных интервалов времени от начала рассматриваемого процесса.

Таблица 5.1 – Термомеханические свойства исследуемых материалов

Материал	ρ , кг/м^3 $\times 10^3$	α , $1/\text{K}$ $\times 10^{-5}$	C , $\text{дж/кг}\times\text{K}$	λ , $\text{вт/м}\times\text{K}$	$T_{\text{пл}}$, $^{\circ}\text{C}$	ν	E , Н/м^2 $\times 10^{10}$	$\sigma_{\text{пр.раст}}$ Н/м^2 $\times 10^6$	$\sigma_{\text{пр.сж}}$ Н/м^2 $\times 10^6$
кварц	2,65	1,56	1172	10,8	1788	0,17	7,3	3,92	78,5
гранит	2,58	1,16	921	3,15	1230	0,22	2,8	20,5	260
тешенит	2,7	5,44	937	1,44	1140	0,27	4,97	7,6	159
медь (Cu+0,56 Fe)	8,9	1,6	390	390	1100	0,34	11,8	220	1570
нержавеющая сталь 1X18H9T	7,8	1,1	516	16	1300	0,35	21,6	700	2500

При малых величинах t , порядок которых равен 10^{-1} с, сначала возникали только напряжения сжатия. Начиная с величин, порядок которых составляет $t \sim 1$ с, для некоторой области Δ ($h - z_i$) до $0,3 \times 10^{-2}$ м напряжения сжатия переходят в напряжения растяжения за весьма короткий промежуток времени. Для разных временных интервалов они находятся на различной по глубине величине от поверхности пластины. В области перехода напряжения сжатия в напряжение растяжения будут, по-видимому, наблюдаться наибольшие напряжения сдвига слоев поверхности породы. Во времени сдвиговые напряжения достигают предельных значений позже разрушающих напряжений сжатия и, очевидно, раньше максимальных напряжений растяжения [107, с. 39].



$q_1 = 6,6 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$; $q_2 = 1 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$; 76 – предел прочности на растяжение; $\sigma, \times 10^5 \text{ Н/м}^2$; $E, \times 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Рисунок 5.3 – Эпюры напряжений по толщине тешенитного покрытия пластины при различных q и t [107].

С увеличением удельного теплового потока в нагреваемом слое, и, следовательно, уменьшением времени нагрева, растет роль напряжений сжатия. Несмотря на высокую сопротивляемость сжатию, разрушение от сжимающих термических напряжений происходит в более благоприятных условиях, мгновенно и в ничтожно малых объемах.

Кривая плавления поверхности покрытия из кварца проходит значительно выше, чем у гранита и тем более, чем у тешенита, что объясняет устойчивое хрупкое разрушение кварцсодержащих структур.

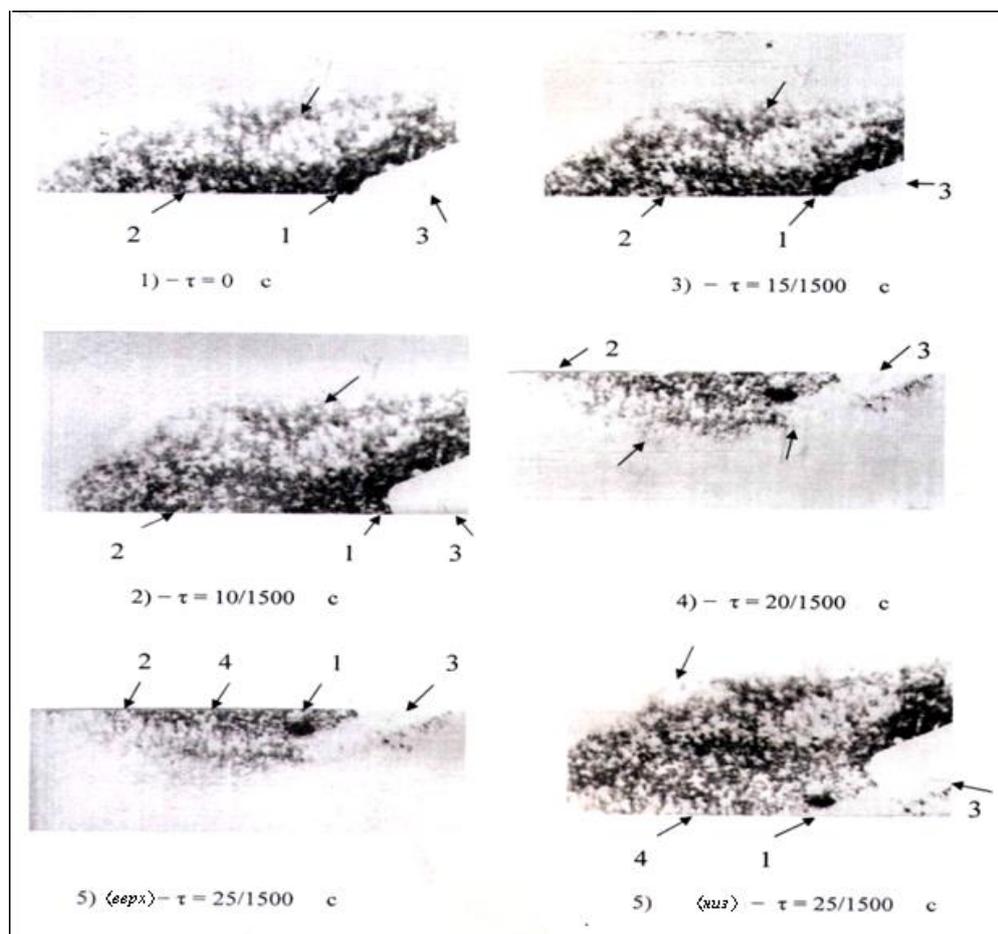
Различные покрытия (нержавеющая сталь, кварц, гранит, тешенит и др.) разрушаются под действием сил сжатия, и разрушение наступает по времени значительно раньше, чем силы растяжения. Наиболее вероятное разрушение произойдет благодаря действующим силам сжатия и сдвига. Величины интервалов теплового потока, когда наступает такое разрушение, различные для кварцевого покрытия ($q_{max} = 7 \times 10^7$ Вт/м²; $q_{min} = 8 \times 10^4$ Вт/м²) и для гранита ($q_{max} = 1 \times 10^7$ Вт/м²; $q_{min} = 21 \times 10^4$ Вт/м²).

Для каждой толщины δ_i отрывающейся частицы, когда наступает действие сил сжатия, существуют соответствующие им предельные значения тепловых потоков, находящиеся в указанных пределах интервалов.

«Для неохлаждаемой металлической поверхности величины $q_{min} = 1 \times 10^4$ Вт/м² и в случае пористой системы охлаждения, работающей при комбинированном действии капиллярных и массовых сил, величина $q_{max} = 1 \times 10^6$ Вт/м²» [107, с. 40].

Максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия, для покрытий из кварца и гранита составляет $(0,25 - 0,3) \times 10^{-2}$ м.

Время отрыва частиц из тешенитного покрытия, определенное скоростной киносъемкой (рис. 5.4), составляет меньше 0,5 с в зависимости от подводимого теплового потока, что согласуется с приведенными данными на рис.5.3, когда $t_{min} \geq 0,1$ с.



1 – Зона разрушения покрытия; 2 – летящая частица; 3 – сопло огнеструйной горелки; 4 – капиллярно-пористое покрытие.

Рисунок 5.4 – Кинограмма полета шелушки размером $2,5 \times 10^{-3}$ м при разрушении тешенитового покрытия при воздействии факела ракетной горелки ($q = 1,2 \times 10^6$ Вт/м²; $\tau = 2,2$ с) [164, с. 418]

5.4 Анализ плотности теплого потока при кипении одиночного парового пузыря в ячейках пористой структуры

Для решения задачи (3) при заданных начальных (4) и граничных условиях (5) из раздела 2.2 (глава 2) пользуются интегральным методом Кармана-Польгаузена, которую используют в теории пограничного слоя (глубина захлаживания является аналогом толщины пограничного слоя в гидродинамике). Тогда интегрирование приведенного обыкновенного дифференциального уравнения имеет четыре решения в зависимости от параметра P : 1) $P=0$, $\bar{y}=0$; 2) $0 < P < 1/2$; 3) $P = 1/2$; 4) $P > 1/2$ [153].

Для анализа величин рассчитаем степень перегрева жидкости P для меди и нержавеющей стали при различных давлениях и температурных напорах.

Для капиллярно-пористой системы практическое значение представляет случай, когда величина $P > 0.5$.

Рассчитаем для атмосферного давления изменение величины $\bar{h}_k = h_{nl}\lambda' / \delta_0\lambda$ для характерных толщин поверхностей нагрева, применяемых на практике (табл.5.2), когда $\delta_0 = 10 \cdot 10^{-6}$ м (здесь $h_{nl} = \delta_{nl}$):

Таблица 5.2 - Расчетные значения относительной толщины стенки \bar{h}_k

толщина стенки $h_{nl} = \delta_{nl}, 10^{-3}$ м			
	1	5	10
Медь	0.163	0.825	1.68
Нержавеющая сталь	3.98	19.9	39.8

Таким образом, для капиллярно-пористых структур, работающих в широкой области давлений (0.1 - 200) бар, и покрывающих поверхности нагрева из меди и нержавеющей стали, получим для $P > 0.5$ и $\delta_1 = 0, \delta_2 = \bar{\delta}$, распределение толщины пленки $\bar{\delta} = 1 - \bar{y}$ в области $0 \leq r \leq R_{cn}$, которое отличается от работы [74]:

$$2p\bar{y} + \frac{1-2p}{2}\bar{y}^2 + 0.393 \frac{(2p)^2}{(2p-1)^{3/2}} + \frac{\sqrt{2p}}{2}\bar{y}^2 \sqrt{\frac{1}{\bar{y}} - \frac{2p-1}{2p}} - \frac{(2p)^{3/2}}{4(2p-1)} \times$$

$$\times \left[\bar{y} \sqrt{\frac{1}{\bar{y}} - \frac{2p-1}{2p}} + \sqrt{\frac{2p}{2p-1}} \arctg \frac{\sqrt{2p} \sqrt{\frac{1}{\bar{y}} - \frac{2p-1}{2p}}}{\sqrt{2p-1}} \right] = \frac{3}{4} p^2 t. \quad (5.1)$$

Для построения графиков удобно безразмерное время t отнести к безразмерному времени $\tilde{\tau}_0$, соответствующему моменту полного испарения пленки жидкости при $r = R_{cn}$, $\bar{\delta} = 0$,

$$\tilde{\tau}_0 = \frac{a\tau_0}{\delta_0^2} \left(\frac{\lambda'}{\lambda}\right)^2; \quad \tilde{t} = t / \tilde{\tau}_0,$$

где величины $\tau_0, \delta_0, R_0, R_d, R_{cn}, \theta', \alpha$ определены нами экспериментально для термогидравлических характеристик паровых пузырей, растущих в ячейках капиллярно-пористых структур [154-156].

Величины отрывного радиуса пузыря в ячейках структуры R_0 с учетом недогрева и скорости потока R_d определены в работе [83].

Зависимости \bar{h} и \tilde{q} для степеней перегрева жидкости, имеющих практическое значение в проведенных исследованиях [155] будут иметь вид, показанный на рисунке 5.5.

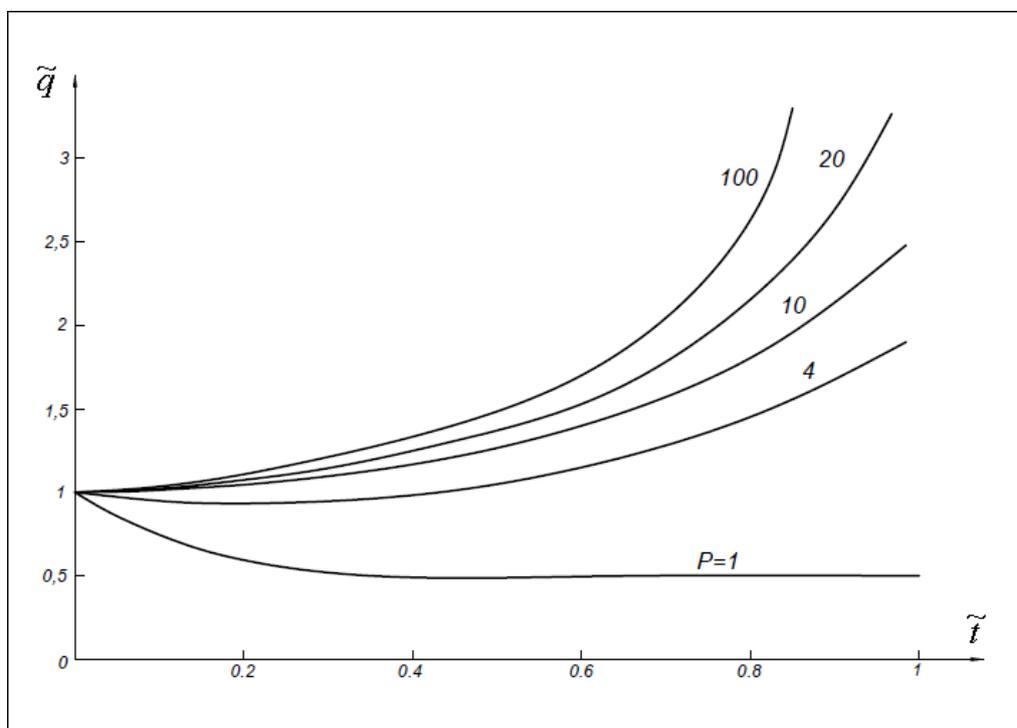


Рисунок 5.5 – Зависимость индивидуальной плотности теплового потока \tilde{q} в окрестности основания парового пузыря от времени \tilde{t} , растущего в ячейках пористой структуры [153].

Отметим крутую зависимость времени $\tilde{\tau}_0$ от параметра перегрева жидкости P . При больших перегревах ($P > 10$) толщина пленки жидкости $\bar{\delta}$ и величина θ в окрестности $0 \leq r \leq R_{\text{от}}$ для фиксированного значения \tilde{t} слабо зависят от P . Глубина захлаживания \bar{h} при $P > 10$ для любого значения \tilde{t} меньше единицы и с ростом P стремится к нулю. Индивидуальная плотность теплового потока \tilde{q} остается меньше единицы при $P \leq 2$. Для области $2 < P \leq 100$ в диапазоне $\tilde{t} = 0-0.9$, величина $\tilde{q} = (1 - 3.25)$. При $\tilde{t} \rightarrow 1$, величина $\tilde{q} \rightarrow 50$ для $P = 100$.

Из выражения

$$\tilde{q} = 1 - \theta + \frac{1}{2} P \theta^2 \quad (5.2)$$

минимальное значение \tilde{q} будет иметь место при $\frac{\partial \tilde{q}}{\partial \theta} = 0$, $\theta = \frac{1}{P}$, т.е.
 $\tilde{q}_{\min} = 1 - \frac{1}{2}P$.

При $P < 1$, $\tilde{q} < 1$ и величина \tilde{q} непрерывно убывает вплоть до $\tilde{t} = 1$. Для случая, когда

$1 < P \leq 10$, величина \tilde{q} убывает при $\tilde{t} = 0.1 - 0.6$.

При больших же значениях \tilde{t} величины \tilde{q} будут непрерывно возрастать. Увеличение \tilde{q} во времени, несмотря на рост θ или уменьшение температуры стенки в течение всего времени испарения пленки, связано, видимо с большей зависимостью \tilde{q} от δ при величинах $P > 1$, т.е. толщина пленки уменьшается в большей степени от \tilde{t} , чем уменьшается температура поверхности нагрева от \tilde{t} [153, с. 184].

В случае, когда $\tau > \tau_k$, интенсивность процесса испарения пленки жидкости будет меньше в (1-5) раз в зависимости от $\bar{\delta}_{nl}$, и чем $\bar{\delta}_{nl}$ ниже, тем меньше интенсивность испарения. Такое снижение будет особенно сильным для малых величин P перегревов жидкости. Величина θ может возрастать в несколько раз, а \tilde{q} - уменьшаться в (1-5) раз. Поэтому для «тонких» тепловыделяющих элементов, когда $h_{nl} = \delta_{nl} < h$, необходимо учитывать через толщину пластины $h_{nl}(\delta_{nl})$ низкую теплоаккумулирующую способность поверхности нагрева [153, с. 185].

Выводы по разделу 5

Проведен анализ влияния режимных и конструктивных факторов в капиллярно-пористых структурах на теплообмен, гидродинамику и прочность. Анализ голографических интерферограмм и кинограмм процессов кипения в пористых структурах позволяет по степени деформации формы и плотности интерференционных полос для различных величин q оценить и рассчитать тепловое и гидродинамическое состояние процессов тепло- и массопереноса. Появляется возможность судить о микропроцессах и некоторых локальных процессах, таких как, температурный микрорельеф, явление флуктуации, выброс капель. Чем процесс протекает интенсивнее, тем картины выражены более ярко. Некоторые дифференциальные картины невозможно выявить другими способами. На основе анализа плотности теплового потока при кипении одиночного парового пузыря в ячейках пористой структуры, получена зависимость индивидуальной плотности теплового потока в окрестности основания парового пузыря от времени, растущего в ячейках пористой структуры

Предложены и исследованы математические и физические модели процесса кипения одиночного центра активации как источника генерации

усталостных трещин на теплообменных поверхностях теплоэнергоустановок, покрытых капиллярно-пористыми структурами. Получены параметры и характеристики процесса теплообмена и проведен их анализ. Рассмотрены уравнения нестационарной теплопроводности при микрослоевом испарении пленки жидкости, находящейся под паровым пузырем, и для предельного состояния поверхности, покрытой пористой структурой, для различных граничных условий. Параметры процессов, так же как глубина захолаживания и индивидуальная плотность тепловой нагрузки, определены экспериментально, в том числе оптическими методами исследования. Исследование относится к предельному состоянию поверхности с целью подбора вида капиллярно-пористых покрытий.

6 ОБСУЖДЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

6.1 Определение параметров кипения

Во второй главе получено дифференциальное уравнение (2.8) в безразмерном виде, для случая $\tau < \tau_k$, когда задача сводится к системе дифференциальных уравнений для полуограниченного тела ($\delta_{nl} \rightarrow \infty$).

«Для капиллярно-пористой системы, работающей в области давлений (0,1–200) бар, имеющей поверхности нагрева, выполненные из меди и нержавеющей стали, величина перегрева жидкости $P > 0,5$. Тогда интегрируя дифференциальное уравнение в пределах $\delta_1 = 0$; $\delta_2 = \bar{\delta}$, получим распределение толщины пленки в области $0 \leq r \leq R_{cn}$ » [153]. Итоговое уравнение получим в виде (5.1). Полагая в полученном уравнении величину $\bar{y} = 1$, определим время τ_0 полного испарения микрослоя толщиной δ_0 , при котором под пузырем в ячейке структуры установится «сухое» пятно ($r = R_{cn}$):

$$f'(p) = \frac{2p+1}{2} + 0.393 \frac{(2p)^2}{(2p-1)^{3/2}} + 0,5 - \frac{(2p)^{1,5}}{4(2p-1)} \times$$

$$\times \left[\sqrt{\frac{1}{2p}} + \sqrt{\frac{2p}{2p-1}} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2p-1}} \right] = \frac{3}{4} p^2 \frac{a\tau_0}{\delta_0^2} \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \right)^2 = \frac{3}{4} p^2 \tilde{\tau}_0. \quad (6.1)$$

Тогда радиус «сухого» пятна в основании парового пузыря определится по формуле:

$$R_{cn} = \frac{\delta_0}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\sqrt{3}}{2 \operatorname{tg} \alpha} \frac{\lambda'}{\sqrt{\rho c \lambda}} \frac{p \sqrt{\tau_0}}{\sqrt{f'(p)}}, \quad (6.2)$$

где α – угол между поверхностью нагрева и клиновидным микрослоем, находящимся под пузырем с радиусом R_{cn} .

Для капиллярно-пористой системы, работающей в поле массовых сил, нами определен закон роста паровых пузырей как в [89]

$$R_d = 2\sqrt{54,1a'Ja\tau_0} \left[1 + \left(\frac{m_{жс}}{m_n} \right)^{0,1} \right]^{-1}. \quad (6.3)$$

Тогда уравнение для R_{cn} преобразуется к виду:

$$R_{cn} = \frac{\sqrt{3}}{2 \operatorname{tg} \alpha} \frac{\lambda'}{\sqrt{\rho c \lambda}} \frac{p}{\sqrt{f'(p)}} \frac{R_d [1 + (m_{жс} / m_n)]^{0,1}}{2 \sqrt{54,1 a' Ja}}, \quad (6.4)$$

где отношение $\frac{R_{cn}}{R_d} = K$ представляет собой коэффициент «сухого» пятна.

Исследования величин $\bar{\delta}, \theta, \delta$ от $\tilde{t}, P, r, \tau, R_{cn}$ в зависимости от угла α при фиксированных значениях давления, температурного напора, теплофизических свойств стенки представлены на рисунках (6.2-6.5) [153].

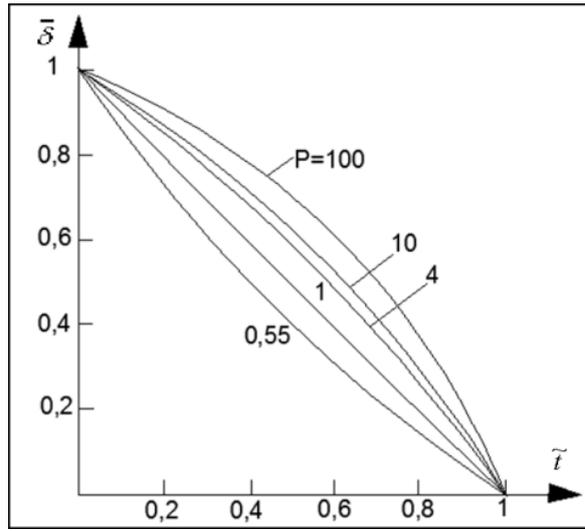


Рисунок 6.1 – Изменение толщины пленки воды $\bar{\delta}$ во времени \tilde{t} в основании парового пузыря, растущего в ячейках структуры [89].

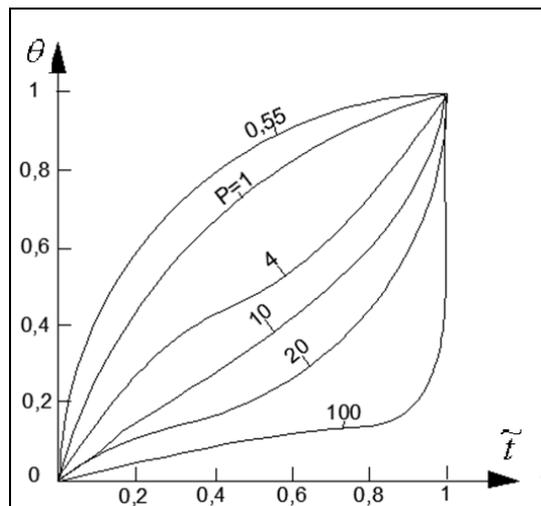


Рисунок 6.2 – Распределение температурного поля θ в парогенерирующей поверхности во времени \tilde{t} , покрытой пористой структурой [89].

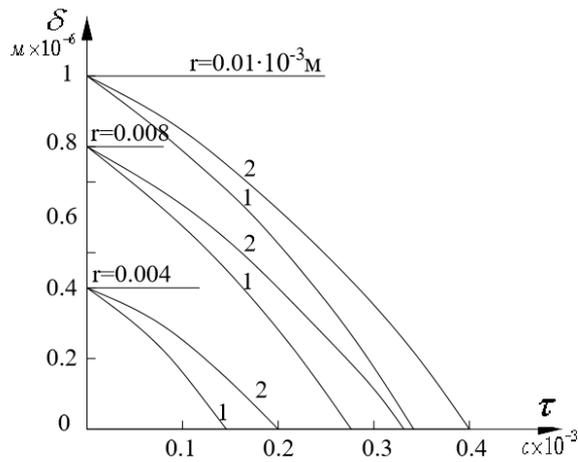


Рисунок 6.3 – Зависимость толщины испаряющейся пленки воды в паровой пузырь, растущей в ячейках капиллярно-пористой структуры, от времени τ в окрестности $0 \leq r \leq R_{cn}$ для различных материалов подложки: 1 – медь; 2 – нержавеющая сталь [89].

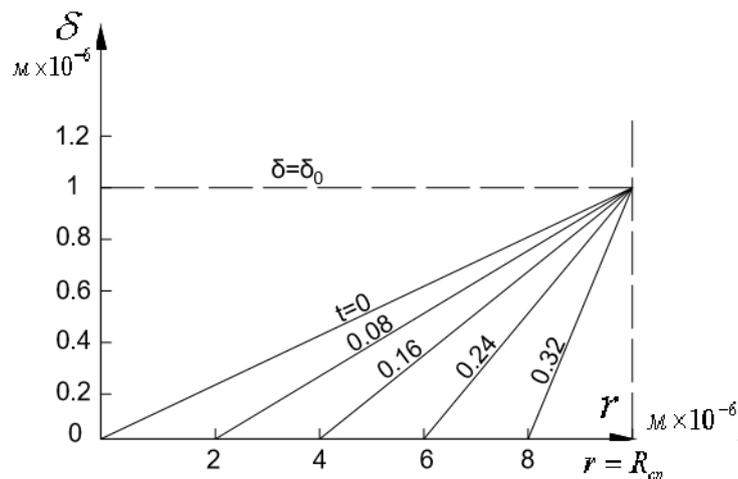


Рисунок 6.4 – Изменение толщины испаряющейся пленки воды δ под паровым пузырем, растущим в ячейках пористой структуры, от координаты r в области $0 \leq r \leq R_{cn}$ для различных моментов времени τ (поверхность – нержавеющая сталь) [89].

В общем случае в исследованной капиллярно-пористой системе охлаждения влияние недогрева, скорости жидкости и теплофизических свойств жидкости и поверхности нагрева аппроксимируется осредненным выражением вида:

$$\bar{R} = \frac{\bar{R}_d}{R_0} = 2,42[k_{жс}k_{СТ}]^{-1}, \quad (6.4)$$

где $\tilde{m} = 1-14$; $W_0 = (1,1 \times 10^{-3} \dots 0,1)$ м/с; $W_0 = \frac{m_{жс} l q}{m_n \varepsilon \delta_\phi r \rho'}$; l – высота теплообменной поверхности; ε – пористость структуры; δ_ϕ – толщина пористой структуры; $k_{жс} = 1 + \tilde{m}^{0,1}$;

$$k_{СТ} = 1 + \left[\frac{(\rho c \lambda)'}{(\rho c \lambda)} \right]^{0,5} - \text{коэффициенты, учитывающие избыток жидкости и}$$

теплоаккумулирующую способность стенки; $\tilde{m} = \frac{m_{жс}}{m_n}$ – параметр, учитывающий избыток жидкости.

«Избыток жидкости \tilde{m} в сечении пористой структуры создает течение с малым недогревом и незначительной скоростью W_0 , что снижает осредненную величину отрывного радиуса пузыря \bar{R}_0 до величины \bar{R}_d . Это связано с уменьшением среднemasсовой температуры, которое приводит к падению перегрева пленки жидкости, окружающей пузырь, и может вызвать его частичную конденсацию» [159]. Динамический угол смачивания в исследованиях получен $\theta' = 80^\circ$. (рис. 2.2, глава 2); угол $\alpha = 5^\circ 30'$; $K = 0,5$.

Закон роста паровых пузырей R_d учитывает искажение формы и очертание пузырей за счет избытка жидкости $m_{жс}$ по отношению к расходу генерируемого пара m_n . Число Якоба $Ja = \frac{c'_p \Delta T}{r} \frac{\rho'}{\rho''}$; ΔT – температурный напор; ρ'' – плотность пара; $\tilde{m} = \frac{m_{жс}}{m_n}$ – избыток жидкости.

Время τ_0 время полного испарения микрослоя толщиной δ_0 , при котором под пузырем устанавливается «сухое» пятно ($r = R_{cn}$), определяется из выражения (6.1) [89, 157, 159].

6.2 Предельное состояние капиллярно-пористой структуры под индивидуальным паровым пузырем

В энергетике и металлургии находятся в широкой эксплуатации большинство современных огнетехнических установок и агрегатов. С целью увеличения удельной технологической производительности агрегатов и для

снижения капитальных и эксплуатационных расходов имеются плотности тепловыделений, но при этом сокращается длительность их эксплуатации.

Процесс проведения высокотемпературной и высокотеплонапряженной эксплуатации связан с возникновением предельного состояния обогреваемой поверхности. Разработка и исследование капиллярно-пористых систем охлаждения, работающих при совместном действии массовых и капиллярных сил, создающих недогрев и скорость потока в сечении и на поверхности структуры, позволили расширить отвод тепловых потоков, увеличив форсировку теплообмена и интенсифицировать процессы теплопередачи. В одном случае производится целенаправленное разрушение материала, например, с помощью огнеструйных горелок ракетного типа, из сопел которых истекают сверхзвуковые высокотемпературные потоки, а в другом – требуется создание охлаждающей системы самих сопел и камер сгорания для исключения кризиса теплообмена и разрушения парогенерирующей поверхности, покрытой пористой структурой [159]. В предыдущем разделе 2.1 была рассмотрена задача об испарении пленки жидкости с поверхности твердого тела для различных условий. Модель соприкосновения паровых пузырей с поверхностью представлена на рисунке 2.1. Поверхность покрыта пористой структурой, в ячейках которой генерируется пар.

Для описания предельного состояния парогенерирующей поверхности, покрытой капиллярно-пористой структурой, при наступлении кризиса кипения воспользуемся уравнением теплопроводности (2.1) для граничных условий второго рода:

$$T = 0, \tau < 0; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, \quad x = + \delta_{nl}; \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = q, \quad x = - \delta_{nl}.$$

Пластина толщиной $2\delta_{nl}$, когда к поверхности $x = + \delta_{nl}$, начиная с момента $\tau = 0$, подводится постоянный удельный тепловой поток. Нижняя поверхность $x = -\delta_{nl}$ и боковые края пластины теплоизолированы.

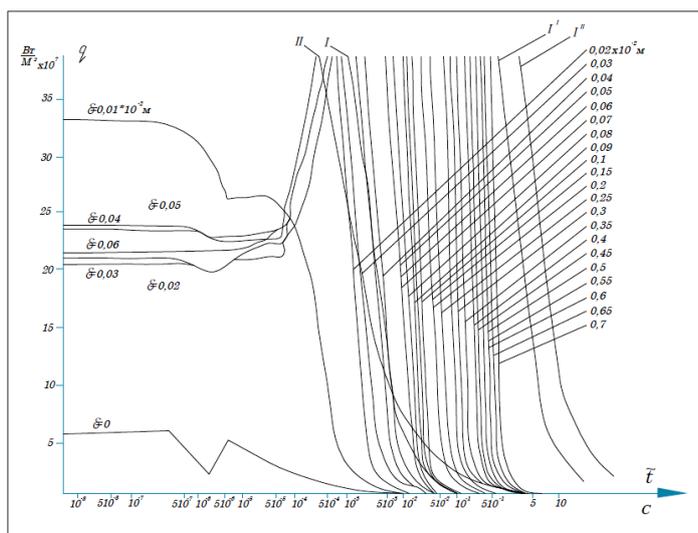
Для пластин, выполненных из меди и нержавеющей стали, имеющих кварцевое и гранитное капиллярно-пористое покрытие, на рисунках (6.5-6.7) приведены результаты расчетов функциональных зависимостей q_1, q_2, q_3 , отвечающих соответственно плавлению поверхности, созданию предельных напряжений сжатия и растяжения [159, с. 157].

6.2.1 Расчет предельного состояния поверхности теплообмена

Тепловые потоки подсчитаны для широкого интервала времени $\tau = (10^{-8} - 10^3)$ с. Интервал времени $(10^{-8} - 10^{-3})$ с соответствует микропроцессам

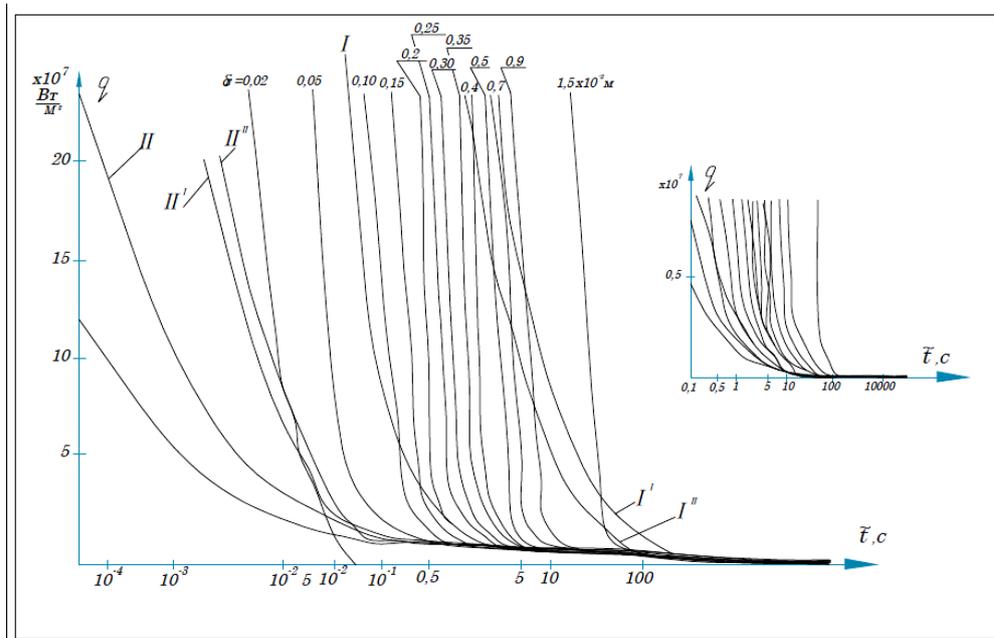
динамики паровой фазы в ячейках капиллярно-пористых покрытий: от взрывообразного рождения парового зародыша $R_{кр}$ до момента гибели парового пузыря $R_d = R_0$ и соответствующим (сопутствующим) им процессам испарения микрослоя δ в пузырь и развитию «сухого» пятна $R_{сп}$ в основании пузыря. Проводя аналогию с процессами разрушения металла и пористого покрытия, т.е. с макропроцессами, примем протекающими их за время τ ($5 \times 10^{-3} - 10^3$) с. Величины удельных тепловых потоков q получаются одного порядка как и для индивидуальных паровых пузырей, что в (10-100) раз может превышать их среднеинтегральные значения (первая аналогия). [159, с. 157].

На рисунках (6.5–6.7) нанесены кривые для парогенерирующих поверхностей нагрева, когда в результате смены режима кипения установился пленочный режим и резко возросла температура поверхности до величины $T_{пл}$ плавления. Для металлов процесс разрушения кристаллов состоит из стадии зарождения и развития трещин в области концентраторов напряжений. Процессу неоднородного протекания пластической деформации, которому способствуют высокие внутренние напряжения, далее идет процесс хрупкого разрушения. Этот процесс разрушения аналогичен разрушению хрупких малотеплопроводных капиллярно-пористых покрытий.



I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения; I', I'' – медь и нержавеющая сталь; $\delta_{пл} = 0,1 \times 10^{-3}$ м; II – кривая оплавления поверхности. Кривые I', I'' – для меди и стали почти совпадают с кривой I в области $\tau = (0,01 - 0,1)$ с.

Рисунок 6.5 – Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия кварцевого пористого покрытия, в зависимости от времени действия τ для различной толщины отрывающихся частиц δ_v [159]



I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения (I', I'' – медь и нержавеющая сталь, $\delta_{nl} = 0,1 \times 10^{-3}$ м); II – кривая оплавления поверхности (II', II'' – медь и нержавеющая сталь, $\delta_{nl} = 0,1 \times 10^{-3}$ м).

Рисунок 6.6 – Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия пористого гранитного покрытия в зависимости от времени действия для различной толщины отрывающихся частиц [159]

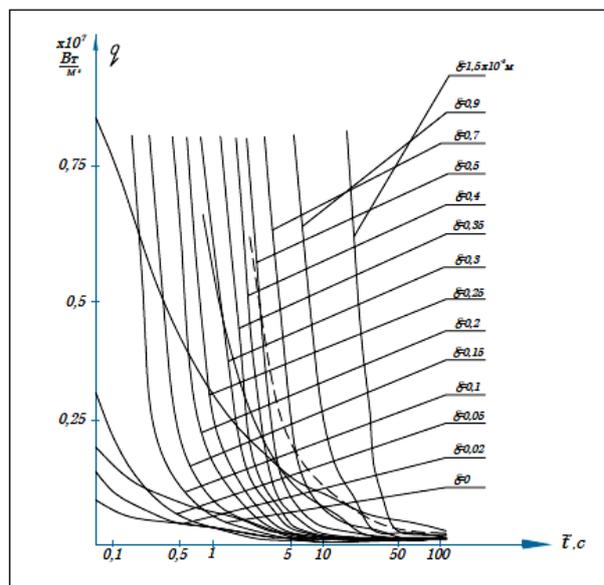


Рисунок 6.7 – Зависимость $q = f(\tilde{\tau})$, представленная на рис. 3, дана в диапазоне $q = (0,25-0,75)10^7$ Вт/м² [159]

Механизм разрушения металлических парогенерирующих поверхностей отличается от механизма разрушения плохотеплопроводных вязких и хрупких капиллярно-пористых покрытий. Несмотря на это, на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности при граничных условиях второго рода и физической модели теплообмена видна аналогия в динамике паровых пузырей в ячейках структуры ($10^{-8}-10^{-3}$) с и в кинетике термического напряжения хрупких пористых покрытий, в том числе в порядке величин тепловых нагрузок, поглощаемых одиночными паровыми пузырями и кластерами хрупких естественных минеральных сред. Далее во времени происходит разрушение (схлопывание) паровых пузырей, достигших отрывных диаметров $2R_d$, и полное высыхание клиновидного слоя жидкости δ_0 под пузырями и разрушение пористых покрытий термическими напряжениями сжатия, растяжения и сдвига в зависимости от величины тепловой нагрузки q и времени ее подачи τ .

Третья временная аналогия в процессе теплопередачи заключается в глубине проникновения фронта тепловой волны в металлическую парогенерирующую поверхность \bar{h} и величине отрывающихся частиц δ_c при терморазрушении хрупких пористых покрытий (рис. 6.6–6.7) [159, с. 157].

Описанные три аналогии процессов теплопередачи позволяют предсказывать и предотвращать возникновение кризиса кипения, предельного состояния (плавления) теплоотдающей поверхности и подбирать оптимальные хрупкие капиллярно-пористые покрытия для исключения их шелушения и плавления.

Расчеты произведены для удельных тепловых потоков, напряжений сжатия и растяжения в зависимости от времени их подачи, толщины пластины (фракции), глубины проникновения температурных возмущений и теплофизических свойств упругой среды [159, с. 158].

Результаты расчета подтверждены интегральными измерениями и кинематографически в работах [160-162].

Для пористых структур, работающих в области давлений (0,1...200) бар, покрывающих подложку из меди и нержавеющей стали, величина перегрева жидкости $P > 0,5$, время полного испарения пленки жидкости $\tau < \tau_k$, при котором фронт температурного возмущения, распространяясь в твердом теле, не достигает толщины пластины, т.е. глубина захолаживания $h < \delta_{nl}$, а пластина является полуограниченным телом ($\delta_{nl} \rightarrow \infty$), и толщина пластины δ_{nl} не входит в расчетные зависимости. Наличие пористой структуры способствует большей и более равномерной толщине δ пограничного слоя, меньшей глубине

захолаживания h поверхности нагрева и незначительной величине пульсаций температуры в стенке [159, с. 159].

Выводы по разделу 6

Обобщение опытных данных позволяет получить расчетные полуэмпирические зависимости описанных термогидравлических характеристик процесса парообразования в сетчатых пористых структурах, таких как отрывные (разрушаемые) диаметры паровых пузырей, плотности центров генерации, частоты отрыва и скорости их роста. Эти величины установлены в зависимости от теплофизических свойств жидкости (давления) и стенки, температурного напора и избытка охладителя. На основе внутренних характеристик кипения можно построить физические модели и получать простые инженерные формулы для расчета отводимых тепловых потоков в зависимости от вида пористой структуры и геометрии парогенерирующей поверхности.

Предельное состояние теплообменной поверхности с пористым покрытием исследовано с использованием уравнения теплопроводности для граничных условий второго рода. Результаты расчета тепловых потоков соответствуют процессам плавления, сжатия и растяжения. Это позволило провести аналогию процессов теплопередачи в пограничном пористом слое. Расчеты проводились для удельных тепловых потоков, напряжений сжатия и растяжения в зависимости от времени их подачи, толщины пластины, глубины проникновения температурных возмущений и теплофизических свойств упругой среды.

7 ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

7.1 Применение капиллярно-пористых систем в металлургическом производстве

В металлургических агрегатах детали и узлы работают в высокотеплонагруженном состоянии и требуют интенсивного охлаждения. Более того, в случае прогара кессонов холодоноситель попадает в расплав (штейн) и может произойти взрыв печи. В этом случае может быть эффективна капиллярно-пористая система охлаждения, которая содержит весьма малое количество жидкости, взрывобезопасна и обладает высокой форсировкой и интенсивностью теплообмена.

Интенсификация топочных процессов, рост единичной мощности теплогенераторов (котлов, камер сгорания и др.) в металлургических агрегатах привели к активному образованию в дымовых газах токсичных окислов азота [163, с. 65].

Существенным фактором, влияющим на образование окислов азота при сжигании топлива, является температура в ядре факела и коэффициент избытка воздуха в топке. При постоянном коэффициенте избытка воздуха концентрация окислов азота тем больше, чем выше температурный уровень в топочной камере [163, с.66].

«Предложена конструкция топочной камеры, которая позволяет проводить сжигание топлива с низким коэффициентом избытка воздуха [4]. Активный отбор тепла с помощью тепловых труб от горящего факела позволяет поддерживать температуру газов на уровне, при котором окислы азота образуются в ограниченном количестве. Для надежного отвода теплоты, стабилизации температурного поля в топке и повышения надежности работы теплоотводящих труб целесообразно выполнить их в виде теплопередающих аппаратов с пористой структурой. Верхний участок тепловых труб выполняется газоплотным и примыкает к стенке камеры между соплом и окном топки. Испарительная часть снабжена пористой структурой и размещена целиком в топке. Конденсатор располагается вдоль топочной камеры. Отводимое тепло идет на нагрев воды или пароводяной смеси.

«За счет активного отбора тепла пористым теплообменником реакции будут протекать при пониженном стабилизированном температурном уровне. Это позволит в значительной мере снизить концентрацию образующихся окислов азота, что имеет огромное экологическое значение» [163, с. 67].

Описанный механизм процесса теплообмена может быть полезен при конструктивном оформлении топочных камер агрегатов, оснащенных пористыми системами. Можно отметить слабую зависимость среднего коэффициента теплоотдачи от шага труб при их расположении друг от друга

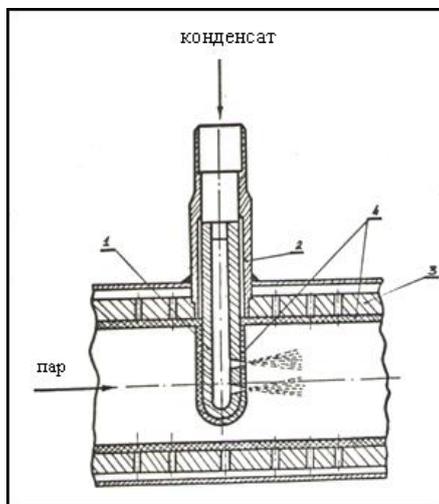
на большом расстоянии (ухудшение циркуляции частиц). Очевидно, что пористые системы могут использоваться и для подвода теплоты к псевдоожигенному слою.

Пористые теплообменники целесообразно снабдить поперечными, либо продольными ребрами, т.к. коэффициент теплопередачи в системе выше, чем теплоотдача от псевдоожигенного слоя к стенке. Оребренные пористые системы могут быть использованы для охлаждения уходящих газов промышленных печей, несущих твердую взвесь.

Пароохладители как теплообменные аппараты находят широкое применение для подогрева питательной воды и для регулирования температуры первичного и вторичного пара в оборудовании металлургического производства.

Разделяют поверхностные и впрыскивающие устройства. Условия работы пароохладителей определяют надежность и экономичность функционирования агрегата. Впрыскивающие пароохладители в настоящее время имеют рубашку, внутри которой разбрызгивается питательная вода. Рубашка предотвращает попадание капель воды на сильно нагретый металл корпуса, защищая его от образования трещин.

Впрыск воды в пар осуществляется через сопло, в узком сечении которого имеется большое количество отверстий малого диаметра. На рисунке 7.1 показан пароохладитель с односторонним кольцевым вводом питательной воды.



1 – форсунка; 2 – штуцер; 3 – коллектор; 4 – капиллярно-пористая структура [163].

Рисунок 7.1 – Пароохладитель впрыскивающего типа с пористой системой охлаждения:

Конструкция пароохладителя с кольцевым вводом воды предпочтительней, так как обеспечивает более равномерное охлаждение потока и создает меньшую концентрацию напряжений при попадании капель на рубашку. Но даже эта конструкция не всегда способна защитить корпус от попадания капель, когда возникают значительные термические напряжения и возможно появление трещин.

Уменьшить термические напряжения можно увеличением площади соприкосновения капли с металлом. При покрытии металла микропористой структурой капли распределяются под действием капиллярных сил. Аналогичным путем можно решить проблему для барабанов котельного агрегата. Эффективным является организация ввода воды путем подачи - продавливания через пористую структуру, покрывающую стенки рубашки пароохладителя. При этом площадь, «занимаемая тонкой пленкой воды, значительно увеличивается и при ее испарении будет происходить активный отбор тепла. С помощью регуляторов можно будет создавать либо избыток, либо недостаток воды на поверхности. Для улучшения равномерности прогрева (охлаждения пара) можно турбулизировать поток. Целесообразно покрывать микропористой структурой стенки корпуса в редуционно-охлаждающих устройствах, уменьшая тем самым термические напряжения металла». [163, с. 68].

Применение пористых систем [83, 92–99, 167] позволяет их реализовать в качестве воздушных подогревателей. Это устранит недостатки, присущие термосифонам: отпадает необходимость в тщательной дегазации трубок и жидкости, теплоносителем может служить конденсат, возвращаемый в чистом виде, значительно уменьшается температурный напор между стенкой и паром, а, следовательно, поддерживается температура стенки трубы в заданных пределах. Расчет поверхности теплообмена показал, что, даже учитывая влияние загрузки труб и неравномерность температурного поля газов на выходе из несменяемой части воздухоподогревателя, достигнут положительный эффект. Например, выполняется условие, когда скорость коррозии не превысит $0,2-10^{-3}$ м/год для донецкого угля ПЖ с $t_k=36^\circ\text{C}$. При температуре стенки, равной $t_{ст}=(110-126)^\circ\text{C}$, наблюдается максимальная скорость коррозии. Для пористой системы расчетная температура стенки составила 89°C , охлаждение газов осуществлено от 130°C до 105°C и для котла, имеющего мощность 300 МВт дополнительно может быть получена тепловая мощность около 7 МВт.

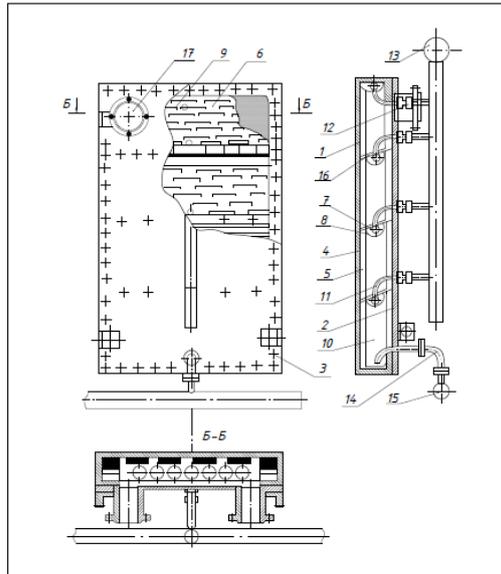
Таким образом, применяя пористые системы для воздушных подогревателей, по сравнению с термосифонами, исключается влияние гидростатического напора на теплообмен, существенно уменьшается влияние неконденсирующихся газов в трубе, а, следовательно, повышается надежность работы системы и упрощается методика расчета. Также стабилизируется температура стенки по высоте теплообменника, что

исключает локальную коррозию металла, уменьшается температурный напор между стенкой и паром в пористой системе, увеличивая коэффициент теплопередачи и, снижая металлоемкость, утилизируется теплота уходящих газов [167].

Конструктивное исполнение кессонов (рис. 7.2–7.4) представляет коробчатую форму. Они состоят из корпуса 1 и съемной крышки 2, герметично скрепляемые по периметру болтами 3. Внутренняя поверхность стенки 4 покрыта капиллярно-пористой структурой 5, прижатой перфорированными пластинами 6. Артерии 7 соединены с верхними концами структуры, через торец которой к охлаждаемой поверхности подается жидкость массовыми и капиллярными силами. Нижние концы структуры обычно свободны и погружены в корытца 8, где скапливается жидкость за счет утечек, каплеуноса или избытка. На поверхности пластин выштампованы углубления с отверстиями 9, которые обеспечивают выход пара из структуры в канал 10, а также служат уловителями выбрасываемых из структуры капель и стекаемой избыточной жидкости по внешней поверхности пластины. Артерия соединена с патрубком 11, с разводящими трубами 12 и коллектором 13. Избыток охлаждающей жидкости скапливается в нижней части кессона и сифоном 14 удаляется в нижний коллектор 15 и далее в накопитель для возврата в систему. С целью облегчения конструкции и сохранения достаточной жесткости кессоны снабжаются распорками 16, выполненными в виде Z-образных перфорированных пластин (рис. 7.2) или ребрами жесткости (рис. 7.3–7.4). Ребра могут располагаться снаружи или внутри корпуса и крышки кессона. На крышке, в верхней ее части, приварены патрубки 17 с фланцами для соединения с паропроводом. Структура может быть вытянутой в вертикальном или горизонтальном направлении, верхний или нижний концы которой (либо оба) соединены с артерией. Перфорированные пластины изготавливаются по форме и размерам в соответствии со структурой. Выштампованные перфорированные углубления в них могут иметь форму усеченного конуса, либо продольных пазов с отверстиями, обращенных кверху [166, с. 236].

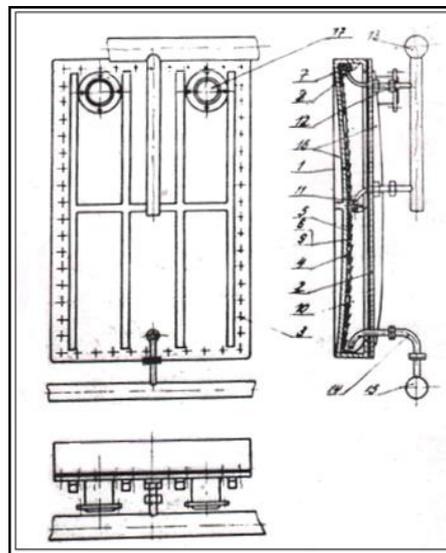
На рисунке 7.5 показана установка коробчатых кессонов в зоне шлака плавильной печи, а на рисунке 7.6 - схема испарительно-конденсационной системы охлаждения деталей (кессонов) плавильной печи.

Таким образом, в металлургическом производстве капиллярно-пористая система может быть применена в виде взрывобезопасного теплообменника, устройства для снижения образования оксидов азота в ядре факела топки, пароохладителя, воздухоподогревателя, устойчивого к низкотемпературной коррозии. Капиллярно-пористые структуры эффективны для пылегазоулавливания и пылеподавления с использованием управляемой геометрии микроканалов пористой структуры» [163, с. 71].



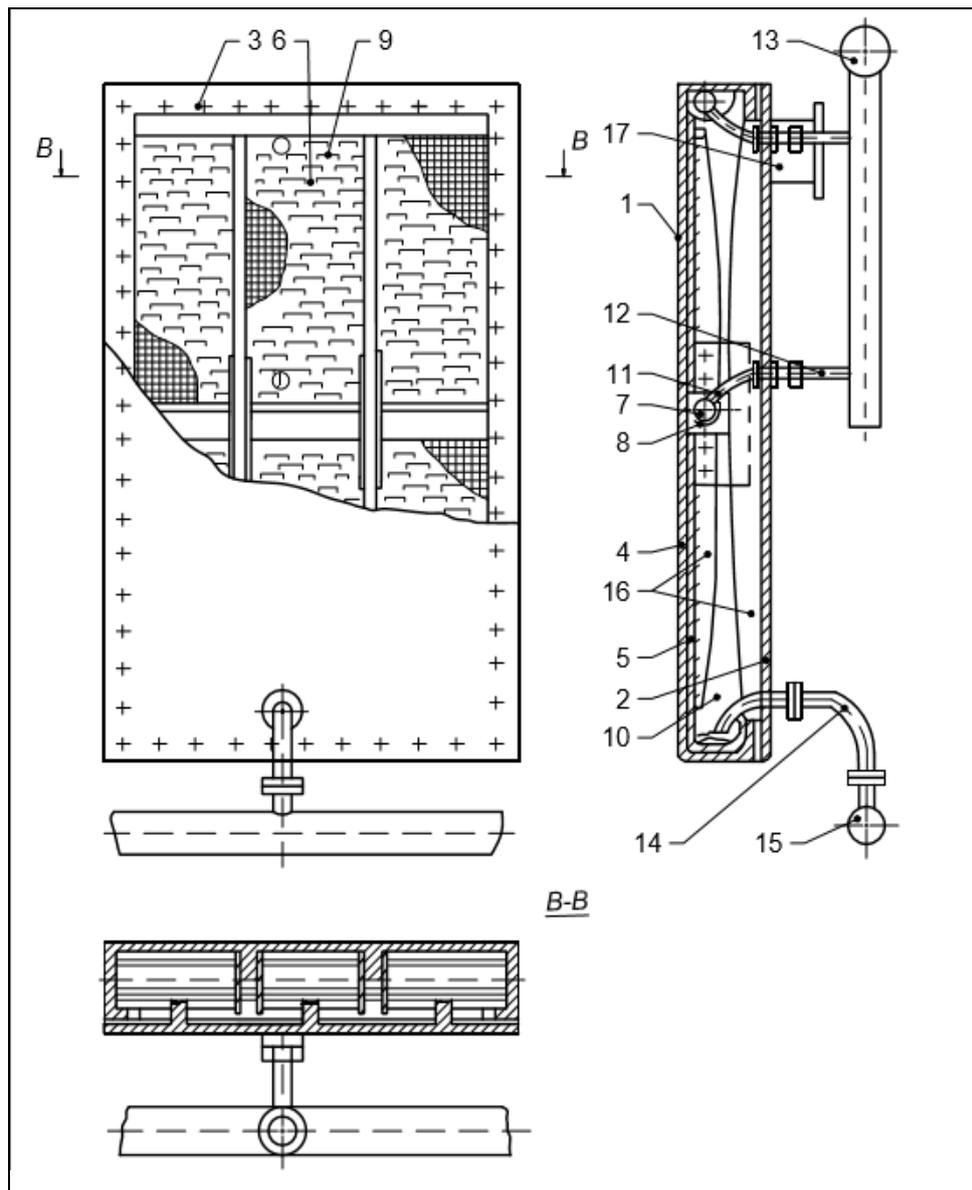
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – болт; 4 – стенка; 5 – капиллярно-пористая структура; 6 – пластина; 7 – артерия; 8 – корытце; 9 – отверстие; 10 – канал; 11,17 – патрубок; 12 – труба; 13,15 – коллектор; 14 – сифон; 16 – пластины жесткости.

Рисунок 7.2 – Конструктивная разработка кессона с капиллярно-пористой системой охлаждения кессона с пластинами жесткости [163,164]



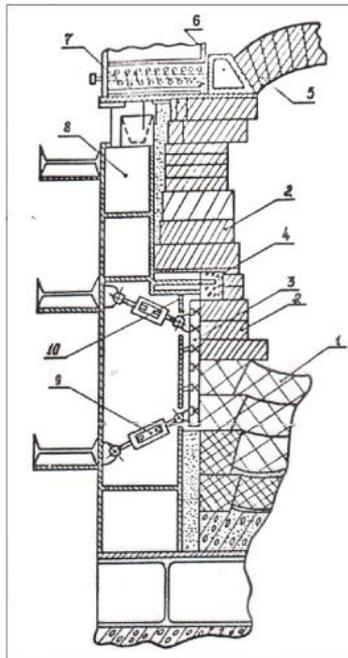
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – болт; 4 – стенка; 5 - капиллярно-пористая структура; 6 – пластина; 7 – артерия; 8 – корытце; 9 – отверстие; 10 – канал; 11,17 – патрубок; 12 – труба; 13,15 – коллектор; 14 – сифон; 16 – внешнее оребрение.

Рисунок 7.3 – Конструктивное выполнение кессона с капиллярно-пористой системой с внешним оребрением [163]



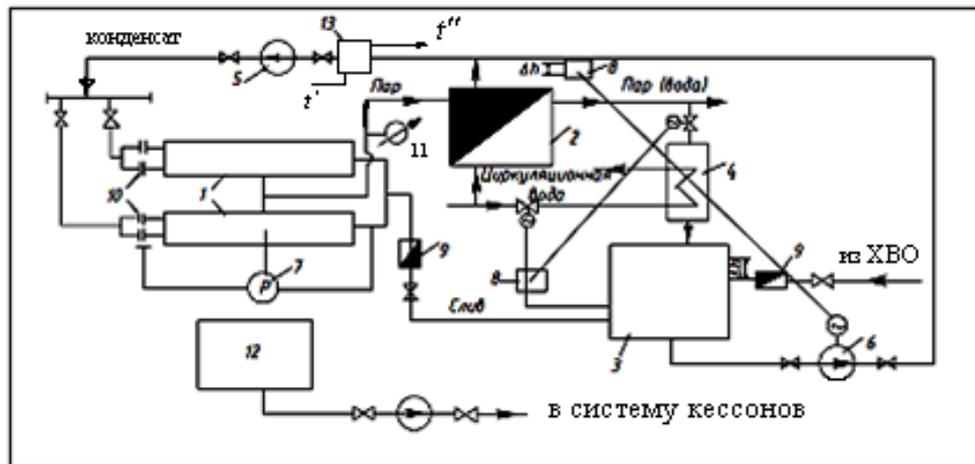
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – болт; 4 – стенка; 5 - капиллярно-пористая структура; 6 – пластина; 7 – артерия; 8 – корытце; 9 – отверстие; 10 – канал; 11,17 – патрубков; 12 – труба; 13,15 – коллектор; 14 – сифон; 16 – внутреннее оребрение.

Рисунок 7.4 – Конструктивное решение кессона с капиллярно-пористой системой с внутренним оребрением [163,165]



1 – подина; 2 – стена; 3 – кессон; 4,10 – верхняя и нижняя полки; 5 - свод; 6– опорная балка свода; 7 – пружина свода; 8 – стойка каркаса; 9 – форкопы.

Рисунок 7.5 – Установка коробчатых кессонов в зоне шлака плавильной печи: [166, 108]



1– охлаждаемая деталь; 2– паро-паровой теплообменник; 3– бак питания; 4–конденсатор линии подпитки; 5– конденсатный насос; 6– насос подпитки; 7– контактный манометр; 8– регулятор уровня; 9– обратный клапан; 10– регулирующий вентиль; 11– манометр; 12– аварийно-ремонтный бак; 13– охладитель конденсата .

Рисунок 7.6 – Установка испарительно-коденсационной капиллярно-пористой системы охлаждения деталей (кессонов) плавильной печи [163]

«Применение капиллярно-пористых систем в металлургическом производстве носит широкомасштабный и многоцелевой характер. Теплообменники в виде коробчатых кессонов обладают высокой интенсивностью теплопередачи, отводят высокие тепловые нагрузки и обеспечивают взрывобезопасные условия эксплуатации плавильных агрегатов. Позволяют на порядок снизить образование оксидов азота в факеле топки, повысить надежность работы пароохладителей, повышают устойчивость работы воздушных подогревателей к низкотемпературной коррозии. Исследования процессов теплопередачи позволят обобщить опытные данные и предложить методику расчета пористой системы» [163, с. 65].

7.2 Капиллярно-пористые теплообменники для охлаждения плавильных агрегатов

Разработаны и исследованы капиллярно-пористые теплообменники коробчатого типа в виде кессонов с целью обеспечения взрывобезопасной эксплуатации плавильных агрегатов (рис.7.2-7.4). Пористые системы не являются узкоцелевыми и могут быть использованы в металлургическом производстве для охлаждения масла (нагрева мазута) с целью охраны от загрязнения водного бассейна, для пароохладителей и барабанов котлов, утилизации тепла уходящих газов печей и их очистки, для оросительных элементов градирни. Охлаждающая капиллярно-пористая система, сохраняя преимущества испарительного охлаждения, имеет ряд новых положительных факторов, к которым следует отнести: в десятки раз дальнейшее сокращения объема охладителя, взрывобезопасность агрегатов, сокращение капитальных вложений и эксплуатационных издержек, саморегулирование теплопередачи, повышение форсировки и интенсификации теплоотвода, снижение резкопеременных циклических разрушающих напряжений, экономический и экологический эффекты.

В форсированных устройствах для плавильных печей применяется проточное охлаждение.

Проточное охлаждение может осуществляться в виде воздушного, жидкостного, испарительного, газо-жидкостного охлаждений. Среди перечисленных видов охлаждения воздушно-водоиспарительное может рассматриваться как частный случай. Для удельных тепловых потоков до 2×10^3 Вт/м², проходящих через охлаждаемые поверхности, часто использовали воздушное охлаждение. Но для больших тепловых потоков воздушное охлаждение малоэффективно из-за малой теплоемкости воздуха, а также низкого коэффициента теплоотдачи.

Существенно увеличивается коэффициент теплоотдачи для воздуха при искусственной турбулизации пограничного слоя: закрутка потока, применение шероховатостей, вставок, использование эффекта центробежных сил и другие виды. Однако и эти эффективные формы теплообмена не могут обеспечить

отвод удельных тепловых потоков в современных металлургических агрегатах.

Коэффициент теплоотдачи при охлаждении водой примерно на два порядка выше, чем при воздушном, что позволяет поддерживать более низкую температуру охлаждаемых поверхностей.

Охлаждение отдельных элементов печей осуществляли технической водой: через полость охлаждаемой поверхности проходила холодная вода, отбирая тепло. Малый нагрев воды требовал больших ее расходов и сооружения мощных водозаборных устройств, оборудования для очистки, перекачки и охлаждения воды в случае оборотной системы водоснабжения. Содержание солей приводило к отложению шлама, накипи и частому прогару охлаждаемых элементов.

Низкая температура воды на выходе исключала возможность утилизации уносимого тепла водой, хотя отвод тепла на один агрегат может составлять десятки МВт.

Система охлаждения удорожается за счет громоздких охладительных устройств при оборотном водоснабжении или при ее очистке в случае прямотока. Следует учитывать расход электрической энергии на прокачку воды.

Применялся способ охлаждения элементов печей горячей водой. В охлаждаемый элемент подается химически очищенная вода с температурой около 70°C, которая нагревается до 95°C и используется для горячего водоснабжения.

Использование горячей воды в несколько раз сокращает расход электроэнергии для перекачки ее, т. к. уменьшается расход воды. Химическая очистка предохраняет поверхности от накипеобразования.

Описанная схема чувствительна к повышению нагрузок установок, т. к. при этом может происходить вскипание воды [169, с. 34].

Предложено для охлаждения элементов печей использовать испарительное охлаждение. К недостаткам испарительной системы охлаждения относятся: возможность возникновения кризисных явлений, конструктивная сложность. Неравномерность распределения тепловых нагрузок между элементами конструкций, их изменение во времени нарушают устойчивость циркуляции, вызывают скачки температуры стенки металла и появление усталостных трещин. Все перечисленные факторы снижают надежность работы охлаждения нагреваемых поверхностей.

Существует замкнутая система охлаждения, когда испаритель выносится наружу, и имеется теплоноситель высокой температуры. Предложенные схемы охлаждения позволяют понизить температуру элементов конструкции при небольшом давлении, при этом тепло может быть использовано для получения пара. Но конструктивные сложности и особые требования по технике безопасности, которые требуются для данных схем, не позволили применять их.

«Испарительное охлаждение некипящей водой заключается в том, что элементы оборудования охлаждаются водой с одновременным воздушным охлаждением. Обычно такое охлаждение осуществляется пленкой воды, стекающей по поверхности охлаждения, обдуваемой воздухом. Вода за счет испарения и частично конвекции отдает отбираемое тепло воздуху. Коэффициент теплоотдачи к пленке воды ниже, чем при водяном охлаждении, а испарение с поверхности пленки в воздух также менее интенсивно» [162, с. 174,175].

Большая эффективность охлаждения по отношению к воздушному объясняется испарением влаги с поверхности пленки, интенсифицирующим конвективный теплообмен. Схема охлаждения сложна в конструктивном решении. Трудно создать устойчивую пленку на поверхности при высоких тепловых потоках. Даже кратковременное оголение стенки может привести к локальным перегревам. Существенным достоинством обладает воздушно-водоиспарительное охлаждение, представляющее собой охлаждение увлажненным воздухом, содержащим водяной пар и мелкодисперсную влагу. [162, с. 175].

«При таком охлаждении снижается начальная температура холодоносителя во время его увлажнения, увеличивается интенсивность отвода тепла за счет интенсивного испарения диспергированной влаги и снижается средняя и конечная температура холодоносителя» [169, с. 34].

Интенсивность теплоотдачи при воздушно-водоиспарительном охлаждении значительно больше, чем при воздушном, и чаще выше, чем при испарительном охлаждении некипящей водой. Возрастание коэффициента теплоотдачи связано с испарением части влаги с поверхности охлаждения, турбулизацией мелкодисперсными каплями пограничного слоя воздушного потока и лучистым теплообменом между стенками и капельками влаги. Процесс теплоотдачи начинает резко ухудшаться с увеличением тепловых нагрузок. Причиной этого является увеличение количества капель жидкости, которые не достигают стенки и отсутствует процесс ее смачивания.

Газо-жидкостные дисперсоиды применяются в указанных схемах, действие которых становится сложным из-за оросительных камер, сепарационных и дренажных устройств. Следовательно, появилась необходимость в поиске новых систем охлаждения.

Разновидностью внутреннего охлаждения является транспирационное, основой которого является использование пористых материалов, и осуществляемое путем продавливания охлаждающей среды сквозь пористую стенку.

Для защиты стенки они выполняются из аблирующих материалов, в составе которых присутствуют синтетические органические вещества. В продуктах разложения этих веществ есть углерод, способствующий образованию на поверхности слоя пористого кокса. Последний, обладая низкой

теплопроводностью и высокой жаростойкостью, хорошо теплоизолирует аблирующее вещество и резко уменьшает скорость его разложения.

При теплозащите термостойкими покрытиями необходим подбор материалов, выдерживающих высокий нагрев без разрушения с низким коэффициентом теплопроводности. С развитием керамических, пластмассовых и стекловолоконистых материалов появился ряд составов, пригодных для использования в качестве термостойких покрытий. Но упомянутые материалы нуждаются в тщательной проверке на совместимость. Подобранный по толщине аблирующий материал или термостойкое инертное покрытие позволило бы отказаться от наружного охлаждения.

Можно рассмотреть процесс интенсификации теплообмена в каналах, применяя в них волнистую шероховатость. Каналы имеют последовательное расположение конфузоров-диффузоров и нашли применение в регенеративных воздухоподогревателях. Процесс теплообмена можно улучшить от 1,5 до 3,3 раз для области переходного режима течения, если сравнивать этот процесс для гладких каналов.

Для труб, которые имеют пластичные, полосовые закручиватели, завихрители типа шнека, процесс теплообмена можно интенсифицировать вдвое (величина может достигнуть $160 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$), но это также приводит к увеличению гидравлического сопротивления.

Однако воздействие на поток турбулизирующими вставками (диски, закрутка) не эффективно, ибо сопровождается интенсификация с сильным ростом энергозатрат, возникают затруднения при чистке отложений. Таким образом, потребовалось разработать новую систему, которая могла бы удовлетворить требованиям взрывобезопасности работы плавильных печей, а также применяться для других целей в металлургическом производстве.

Капиллярно-пористая система может рассматриваться, как новая система, которая может быть отнесена к новому классу теплоотводящих систем. В таких системах наблюдается совместное действие капиллярного и массового потенциалов. Для различных предельных и запредельных состояний пористых покрытий проводились исследования методами голографии, фотоупругости (оптические методы), а также методом термоупругости с применяемой при этом съемкой с помощью скоростной кинокамеры.

«Расширение предела отвода тепловых нагрузок (кризиса кипения) и дальнейшей интенсификации теплопередачи достигалось за счет управления процессами разделения энергии на тепловую волну и поток пара и создания с помощью нескольких тепловых источников тепловых экранов. Наличие массовых сил, создающих недогрев и вынужденный поток теплохолодоносителя, значительно отодвигало кризис кипения. Одновременно наблюдалось воздействие на внутренние (термогидравлические) характеристики кипения путем наличия избытка жидкости в структуре и на ее поверхности. Обобщение опытных данных позволило рассчитывать тепловые

потоки, коэффициенты теплопередачи, включая предельное состояние» [169, с. 35].

«Капиллярно-пористые системы утилизируют теплоту уходящих газов и воздуха в котлах, компрессорах, в системах кондиционирования воздуха, позволяют решить проблему низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева, а по сравнению с тепловыми трубами имеют меньшие требования к очистке трубок и жидкости, снижают температурный напор, поддерживают более стабильную температуру стенки» [162, с. 177]. Процесс теплоотдачи интенсифицируется вдвое, срок службы теплонагруженных поверхностей может увеличиться пятикратно, доводя их до 10-12 лет.

Для охлаждения кессонов применяется капиллярно-пористая система, которой присущи новые положительные факторы. Такими факторами являются многократное (в десятки раз) уменьшение объема охлаждающей жидкости в пористой системе, в особенности для кессонов. Это создает условие взрывобезопасности для плавильных агрегатов; процесс теплообмена в пористой структуре становится саморегулирующимся, что имеет большое значение для переменных режимов работы и создает достаточную равномерность температурного поля в стенке агрегатов; сокращение расхода охлаждаемой жидкости обеспечивает определённый экономический эффект.

«Капиллярно-пористые системы в градирнях, выполненные в виде волнистых поверхностей, разделенные продольными волнистыми пористыми структурами и поперечными направляющими пористыми перегородками интенсифицируют теплообмен до 1,9 раз, причем за счет увеличения коэффициента теплообмена при перекрестном транспирационном движении воздуха стало возможным перераспределить составляющие в отборе тепла. Доля тепла, отбираемая испарением, сократилась с 80% до 70%, что уменьшает потери водяного пара, унос капель воды и улучшает экологические условия биосферы» [162, с. 178].

«Для решения продовольственной программы предложен способ и устройство прокладки дрены с пористыми элементами для подпочвенного орошения, что позволяет экономить воду и улучшить экологию.

Способ и устройство тепловой защиты и управления фенофазами плодовых деревьев для задержания цветения создает устойчивое равномерное температурное поле пористой системой во всем объеме почвы. Это обеспечивает стабильные ежегодные урожаи для удовлетворения нужд населения в продовольствии» [168, 170].

«Современные системы, применяемые для охлаждения плавильных агрегатов, не решают проблем взрывоопасности. Поэтому для обеспечения взрывобезопасной работы установок, содержащих жидкие металлы и расплавы, предлагается использовать пористую систему охлаждения, содержащую весьма малое количество жидкости, которое, попав в расплав, не приведет к взрыву. Такие установки находят применение в промышленных печах. В свою

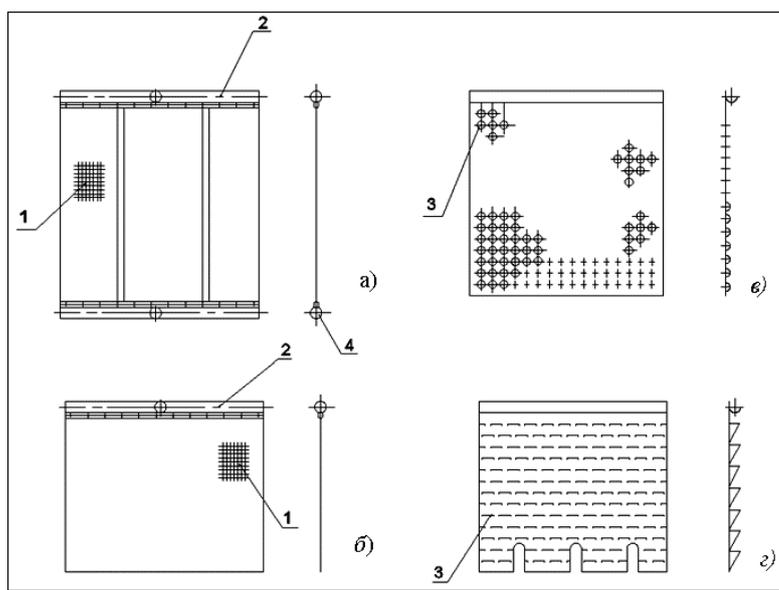
очередь такая система, являясь высокофорсированной, способна отводить мощные удельные тепловые потоки. Она увеличивает надежность и мобильность работы агрегата без усложнения и дополнительных затрат энергии по сравнению с наиболее экономичным испарительным охлаждением» [169, с. 36].

Рассмотрим конструктивное исполнение пористой системы (рис. 7.7) для теплообменника коробчатой формы. Теплообменник состоит из корпуса и съемной крышки, герметично скрепляемых по периметру болтами. Внутренняя поверхность стенки покрыта капиллярно-пористой структурой 1, прижатой перфорированными пластинами 3. Артерии 2 соединены с верхними концами структуры, через торец которой к охлаждаемой поверхности подается жидкость массовыми и капиллярными силами. Нижние концы структуры обычно свободны и погружены в корытца 4, где скапливается жидкость за счет утечек, каплеуноса или избытка. На поверхности пластин выштампованы углубления с отверстиями, которые обеспечивают выход пара из структуры в канал, а также служат уловителями выбрасываемых из структуры капель и стекающей избыточной жидкости по внешней поверхности пластины. Артерия соединена с патрубком, с разводящими трубами и коллектором. Избыток охлаждающей жидкости скапливается в нижней части и сифоном удаляется в нижний коллектор, и далее в накопитель для возврата в систему. С целью облегчения конструкции и сохранения достаточной жидкости кессоны снабжаются распорками, выполненными в виде Z-образных перфорированных пластин или ребрами жесткости. Ребра могут располагаться снаружи или внутри корпуса и крышки. На крышке, в верхней ее части, приварены патрубки с фланцами для соединения с паропроводом. Структура может быть вытянутой в вертикальном (*a*) или горизонтальном направлении, верхний или нижний концы которой (либо оба) соединены с артерией (*a, б*). Перфорированные пластины (*в, г*) изготавливают по форме и размерам в соответствии со структурой. Выштампованные перфорированные углубления в них могут иметь форму усеченного конуса (*в*), либо продольных пазов с отверстиями, обращенных кверху (*г*). [171, с. 143].

В капиллярно-пористой системе охлаждения наличие массовых сил позволяет обеспечить подвод охлаждающей жидкости к обогреваемой поверхности при высоких тепловых нагрузках ($\sim 1 \times 10^6$ Вт/м²) и создает вблизи стенки устойчивый двухфазный пограничный слой. В пористой структуре содержится весьма малое количество жидкости, что до 80 раз экономит расход воды, имеет экологическое значение и обеспечивает взрывобезопасность. [171-173].

«Описанная охлаждающая система, сохраняя преимущества испарительного охлаждения, имеет ряд новых положительных факторов, к которым следует отнести: многократное (в десятки раз) дальнейшее сокращение объема охлаждающей жидкости в системе и особенно в кессонах,

что обеспечивает взрывобезопасность агрегатов, дальнейшее сокращение капитальных вложений и эксплуатационных издержек за счет резкого уменьшения количества жидкости во внешнем и внутреннем контурах циркуляции; саморегулирование процесса теплообмена в тонком пористом слое, позволяющее снизить резкопеременные циклические разрушающие напряжения в стенке; некоторый экономический и экологический эффекты за счет перекачки существенно меньшего количества жидкости; рост форсировки и интенсификации теплопередачи» [169, с. 38].



1 - капиллярно-пористая структура; 2 - питающая артерия; 3 - прижимные перфорированные пластины; 4 – корытце.

Рисунок 7.7 – Расположение капиллярно-пористой структуры (а,б) и конструктивное выполнение прижимных перфорированных пластин (в,з) [171-175, 177]

«Капиллярно-пористые системы позволяют достигнуть экономии топлива, сырья, воздуха, воды, тепла; повысить надежность охлаждения и взрывопожаробезопасность работы оборудования; способствовать высокоэффективному разрушению горных пород, бетонов, металлов; уменьшить низкотемпературную коррозию поверхностей; сократить загрязнения биосферы ядовитыми газами, пылью, теплом; ускорить решение проблем продовольственной программы; получить большой экономический и социальный эффекты в области экологии и охраны труда» [162, с. 116].

«Внедрение оборудования и технологических процессов в энергетике должно производиться, прежде всего, с эколого-экономических позиций.

Предлагаемые разработки капиллярно-пористых систем будут способствовать проведению процессов, существенно улучшая и сохраняя природную среду.

Основными преимуществами капиллярно-пористых систем являются высокая интенсивность, большая теплопередающая способность, надежность, компактность, простота в изготовлении и эксплуатации; они улучшают режимные и технологические показатели и имеют невысокие капитальные и эксплуатационные расходы» [171, с. 141].

Для внедрения разработки исследовалось влияние различных факторов на процессы теплообмена в различных капиллярно-пористых системах тепловых энергоустановок (табл. 7.1).

«Для повышения надежности и эффективности стационарных теплообменников с учетом экологии нами разработаны следующие устройства:

- 1) Конденсаторы турбин на пористых структурах;
- 2) Интенсификаторы деаэрации в конденсато-сборниках;
- 3) Утилизаторы сбросной теплоты путем применения «триады»: тепловые трубы, вихревые трубы, тепловые насосы, создание электростанций без градиен и без дымовых труб;
- 4) Градирни с пористыми элементами;
- 5) Пористые вставки для борьбы с кавитацией в конденсатных и питательных насосах;
- 6) Интенсификаторы теплообмена в подогревателях с пористыми элементами;
- 7) Пористые структуры в деаэраторах, повышающие эффективность дегазации;
- 8) Пористые структуры для повышения эффективности сепарации пара и теплообмена в сепараторах-пароперегревателях;
- 9) Маслоохладители на тепловых трубах, исключаящие попадания масла в воду и наоборот;
- 10) Пористые маслоохладители;
- 11) Барботеры в пористых деаэраторах;
- 12) Пористые испарители;
- 13) Тепловые трубы в тепличном хозяйстве (управление фенофазами цветения, пористый полив, хранение плодов);
- 14) Волнистые пористые двухфазные теплообменники;
- 15) Пористые сетевые подогреватели;
- 16) Пористые отопители;
- 17) Пористые теплообменники на эффекте Коанда;
- 18) Пористые теплообменники в виде пенетратора;
- 19) Пористые теплообменники, использующие эффект разделения, концентрации, транспорта, стока и управления энергиями волны и газов;
- 20) Теплообменники на основе управляемых гибких пористых структур» [165, с. 103].

Таблица 7.1 - Исследование влияния различных факторов на процессы теплообмена в различных капиллярно-пористых системах теплообменного оборудования [171,175,176].

Вид теплоносителя					
взвесь, псевдоожженная среда	чистая жидкость	Газожидкостый дисперсоид (вода-воздушная смесь)			Раствор (пена)
Циркуляция теплоносителя					
закрытая			открытая		
естественная	принудительная		принудительная		
Конструкция системы					
кожухотрубная (под давлением, под разряжением)					
Эллиптические системы		Круглые трубы, (в том числе перфорированные)		Плоские трубы	
Кипение, барботаж, взрыв, транспирация, замораживание	Кипение внутри труб	Кипение на трубах	Профилированные (волнистые)	прямые	Рёбристые
Материал корпуса					
латунь	медь	нержавеющая сталь	стекло, алунд		никель
Тип системы					
Оросительная	Насыщенная	Барботажная	Затопленная	С избытком жидкости (вынужденное течение с недогревом)	
Подвод энергии					
По периметру			односторонний		
Вид энергии					
электрическая	паровая	лучистая	взрыв	ультразвуковая	газовая
Ориентация системы					
вертикальная		наклонная		горизонтальная	

Выводы по разделу 7

Разработаны и исследованы капиллярно-пористые теплообменники коробчатого типа в виде кессонов с целью обеспечения взрывобезопасной эксплуатации плавильных агрегатов. Пористые системы не являются узкоцелевыми и могут быть использованы в металлургическом производстве для охлаждения масла (нагрева мазута) с целью охраны от загрязнения водного бассейна, для пароохладителей и барабанов котлов, утилизации тепла уходящих газов печей и их очистки, для оросительных элементов градирни. Охлаждающая капиллярно-пористая система, сохраняя преимущества испарительного охлаждения, имеет ряд новых положительных факторов, к которым следует отнести: в десятки раз дальнейшее сокращения объема охладителя, взрывобезопасность агрегатов, сокращение капитальных вложений и эксплуатационных издержек, саморегулирование теплопередачи, повышение форсировки и интенсификации теплоотвода, снижение резкопеременных циклических разрушающих напряжений, экономический и экологический эффекты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа была посвящена исследованию фундаментальных процессов тепломассопереноса, протекающих при парообразовании в капиллярно-пористых структурах, которые рассматриваются как перспективное решение для создания высокоэффективных систем охлаждения. В рамках данного исследования был реализован подход, включающий моделирование, экспериментальное изучение и разработку практических рекомендаций.

В ходе работы были успешно разработаны физические и математические модели, позволившие описать сложный процесс теплообмена, происходящий в капиллярно-пористых средах при фазовом переходе жидкости в пар. Разработаны следующие модели: модель микрослоевого испарения; модель зарождения парового пузыря на парогенерирующей поверхности в ячейках пористой структуры; математическая модель процесса теплообмена; модель капиллярно-пористого покрытия для предельного состояния поверхности нагрева (задача термоупругости); Эти модели учитывают влияние капиллярных сил, пористой структуры, материала и гидродинамических характеристик потока, что обеспечивает более глубокое понимание механизмов интенсификации теплообмена.

Для разработанных моделей и получения эмпирических данных была создана экспериментальная установка, моделирующая условия работы капиллярно-пористой системы охлаждения в модели кессона. Эта установка позволила проводить измерения тепловых потоков и температурных полей в исследуемых структурах.

Серия экспериментальных исследований с использованием планирования эксперимента была проведена для различных типов капиллярно-пористых структур, отличающихся своими геометрическими параметрами и физическими свойствами. Результатом этих экспериментов стало получение эксплуатационных характеристик КПС охлаждения в виде зависимости плотности теплового потока (q) от перегрева поверхности (ΔT) относительно температура пара. Эти зависимости являются основой для оценки эффективности и оптимизации работы систем охлаждения.

Проведенный анализ распределения тепловых потоков в исследуемых структурах позволил выявить основные пути их переноса и проанализировать термогидравлические параметры кипения в сетчатых капиллярно-пористых структурах, которые могут быть использованы для целенаправленного управления теплообменом и повышения эффективности охлаждения.

Проведено сравнение полученных экспериментальных данных по тепломассопереносу в капиллярно-пористых структурах. Дан анализ процессов парообразования в исследуемой пористой среде. Приведено сравнительное исследование полученных характеристик с данными по кипению в большом объеме жидкости, в тепловых трубах и тонкопленочных испарителях. Это

позволило выявить специфические особенности и потенциальные преимущества использования капиллярно-пористых структур для интенсификации теплообмена. Результаты сравнения показали, что КПС обладают рядом преимуществ, включая более высокие коэффициенты теплоотдачи при высоких перегревах.

На заключительном этапе исследования были разработаны практические рекомендации и конкретные технические решения по применению капиллярно-пористых систем охлаждения. В качестве примера рассмотрена возможность использования таких систем для охлаждения высокотеплонагруженных парогенерирующих поверхностей, в частности кессонов плавильных агрегатов. Предложенные технические решения учитывают специфические условия эксплуатации и требования к эффективности охлаждения в данной области. Таким образом, проведенное исследование внесло вклад в понимание процессов тепломассообмена в капиллярно-пористых структурах и обосновало перспективность их использования для создания высокоэффективных систем охлаждения в различных технических приложениях, включая охлаждение элементов энергетических установок и высокотеплонагруженного оборудования. Полученные результаты и разработанные рекомендации могут служить основой для дальнейших исследований и практической реализации капиллярно-пористых систем охлаждения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Динамическая модель интенсификации теплоотдачи при кипении на пористой поверхности. Часть 2. Аналитическая модель /Накаяма, Дайкоку, Кувахара, Накадзима // Теплопередача, 1980. - Т.102, № 3. - С.69-76.
- 2 Влияние капиллярно-пористых покрытий поверхности теплоотдачи на скорость охлаждения криоинструментов / Киневский О.Ф., Наумов А.В., Косторнов А.Г., Титаренко И.В., Островский Ю.Н., Холодильная техника, 1983, № 6. - С. 36-41.
- 3 Дашков С.А., Усюкин И.П. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении в большом объеме на трубках с сеточным покрытием. В НТРС: Химическое и нефтяное машиностроение. - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1978. - № 3. – 24 с.
- 4 Исследование теплофизических характеристик низкотемпературных тепловых труб с металловолоконистыми фитилями /Семена М.Г., Косторнов А. Г., Гершуни А.Н., Зарипов В. К., Мороз А.Л. Ш. – 1976. - Т.31, № 3. - С.449-455.
- 5 Фриграндт Л. Г. Автореферат дисс. ... к.т.н. Интенсификация процесса кипения с помощью капиллярно-пористых покрытий в теплообменных аппаратах низкотемпературного газоразделения. -1984.
- 6 Мойссис Р., Беренсон П. К вопросу о гидродинамических переходах при пузырьковом кипении // Теплопередача, 1963. - №3. - С. 39 -50.
- 7 Толубинский В.И., Кривешко А.А., Островский Ю.Н. О пульсациях температуры поверхности нагрева под действующим центром парообразования. В сб.: Теплофизика и теплотехника. - Киев: Наук, думка, 1971. - Вып. 19. - С. 22 - 26.
- 8 Механизм теплообмена при кипении и его интенсивность. /Толубинским В.И., Костанчук Д.М., Кривешко А.А. и др. В кн. Тепло- и массоперенос при фазовых превращениях. - Минск: ИТМО, 1974. - Ч. I. - С. 63 - 77.
- 9 Бараненко В.И., Чичкань Л.А., Смирнов Г.Ф. Исследование Механизма теплообмена при кипении с помощью оптического метода. В кн.: Теплообмен 1974. Советские исследования. - М.: Наука, 1975, с. 214 220.
- 10 Кравец В.Ю. Теплообмен при кипении жидкостей на микроповерхностях в большом объеме применительно к охлаждению элементов радиоэлектронной аппаратуры: авторефера. ... дисс.канд.тех.наук. - 1984.
- 11 Мартин Р. Коренное усовершенствование в технике теплопередачи. -Инженер-нефтяник, 1970. - № 5. - С. 51-54.
- 12 O'Neill P.S., Gottzmann C.P., Terbot J.W. Novel heat exchanger increases cascade cycle efficiency for natural gas liquefaction. Advances in Cryogenic Engineering, 1972. - № 17. - P. 420 - 437.

- 13 Gottzmann C.P., O'Neill P.S., Minton P.E. Heat transfer: high efficiency heat exchangers // *Overa. Eng. Progr.*, 1973. - Vol.69, № 7. - P. 69 - 75.
- 14 Бунин Л.В., Берлин Б.М., Рудько Л.М. Трубчатые теплообменники. 1975. - 47 с.
- 15 Grover G.M., Cotter T.P., Erickson G.F. Structures of very high thermal conductance. *J.Appl.Physics*, 1964. - Vol. 35, №6. - P. 1990 - 1991.
- 16 Куликов А.С. Решение задачи о внутривязовом течении и определение предельных тепловых потоков при парообразовании на поверхности с капиллярно-пористым покрытием: автореф. ... дисс. канд.техн.наук. 1984.
- 17 Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография / под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. - Казань: Центр инновационных технологий, 2007. - 240 с.
- 18 А.с № 1322071, 1987. В.И. Толубинский, В.А. Антоненко, Г.В. Иваненко, Г.Р. Кудрицкий
- 19 Тонконогий А.В., Генбач А.А. Экспериментальное исследование теплообмена в капиллярно-пористом аппарате. Сб «Рабочие процессы и усовершенствования теплотехнических устройств и электрических систем», КазПТИ, Алма-Ата, 1979. - С. 43-49.
- 20 Генбач А.А., Олжабаева К.С., Белоев Х. Установки для исследования влияния давления на теплообмен в капиллярно-пористой системе охлаждения энергооборудования // Национально научно техническое содружество (национальный комитет) по ТММ. Теплотехника. - г. Варна, Болгария, 2015. - С.28-31.
- 21 Genbach A.A., Bondartsev D.Iu., Iliev I.K. Equipment for study of various heat exchange conditions in capillary-porous structures of power equipment // 6-th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD. – 2017. – P. 37-42.
- 22 Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Установки для исследования различных условий теплообмена в капиллярно-пористых структурах энергооборудования // Вестник КазНИТУ. – 2017. – №1(119). – С. 183-189.
- 23 Кремнев О. А., Сатановский А.Л. Воздушно-водоиспарительное охлаждение оборудования. - М: Машиностроение, – 1967. - 240 с.
- 24 Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Methods of Monitoring Energy Process//*Experimental thermal and fluid science, International of Thermodynamics, Experimental Heat Transfer, and Fluid Mechanics, avenue of the Americas.* - New York,1995. - Vol.10. - P. 273-286.
- 25 Генбач А.А., Федоров В.Н., Шелгинский А.Я. Интенсивность теплообмена при кипении жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле массовых сил //Труды МЭИ. – 1980. – Вып.448. – Тепломассообменные процессы и установки. – С.27-32.

- 26 Поляев В.М., Генбач А.А. Плотность центров парообразования и выброс капель из пористой структуры // Известия вузов. Машиностроение. - 1990, №9. -С.50-55.
- 27 Поляев В.М., Генбач А.А. Отрывной диаметр и частота отрыва паровых пузырей в пористых структурах // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. -1990. - №1- С.69-72.
- 28 Поляев В.М., Генбач А.А. Начальная область парообразования в пористых структурах, работающих с избытком жидкости// Известия вузов. Энергетика.-1991. - №2.- С.84-87.
- 29 Поляев В.М., Генбач А.А. Механизм процессов парообразования в пористой системе охлаждения // Теория рабочих процессов в узлах и трактах энергетических установок: Сборник трудов МАИ. – М., 1991. – С.81-90.
- 30 Поляев В.М., Генбач А.А., Минашкин Д.В. Визуализация процессов в пористом эллиптическом теплообменнике // Известия вузов. Машиностроение. – М., 1991. - №10–12. – С.75-80.
- 31 Поляев В.М., Генбач А.А. Пористое охлаждение камер сгорания и сверхзвуковых сопел // Тяжелое машиностроение. – М.,1991. - №7. – С.8-10.
- 32 Polyayev V., Genbach A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces // Thermal Engineering. - М., 1993. Vol.40, № 7. -P. 551-554.
- 33 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Исследование и расчет высокофорсированного капиллярно-пористого теплообменника, Доклады НАН РК, 2017. - №3 (313). - С. 41-47.
- 34 Genbach A.A., Jamankulova N.O. Research and calculation of the high-forced capillary-porous heat exchanger. Proceedings 6th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD, Romania, 2017. - P. 47-50.
- 35 Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. — Собр. избр. тр., т. 3. М., Изд. АН СССР. – 1959. - 461 с.
- 36 Becker R., Doring W. Kinetische Behandlung der Keimbildung in übersattigte Dampfen. – Physika, 1935. - Vol. 24, № 7. - P. 719 -752.
- 37 Bernath L.Theory of Bubble Formation in liquids. Ind. Eng. Chem., 1952. - Vol. 44, № 6. - P. 1310 -1313.
- 38 Fisher J.C., The fracture of liquids // Journal of Applied Physics, 1948, VOL. 19, № 11. -P. 1062-1067.
- 39 Frenkel J. Kinetic Theory of Liquids. Chapter 8, Oxford U.P., N.Y. 1958, 485 p.
- 40 Volmer M. Kinetic der Phasenbildung. Dresden and Leipzig, 1938, 220 p.
- 41 Bankoff S.G. Ebullition from solid surface in the Absence of pre-existing Gaseous Phase. -Trans. ASME, 1957. - Vol. 79, № 4. - P. 735-740.

- 42 Han C.Y., Griffith P. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling. Part II. The heat flux temperature difference relation. – International Journal of Heat and Mass Transfer, 1965. - Vol. 8, № 6. - P. 905-915.
- 43 Moore F. D., Mesler R. B. The measurement of rapid surface temperature fluctuations during nucleate boiling of water // American Institute of Chemical Engineering Journal, 1961. - Vol. 7, № 4. - P. 620 - 624.
- 44 О методике одновременного исследования процесса парообразования и локального измерения температуры поверхности при кипении жидкостей. — В кн.: Ученые записки Кабардино-Балкарского университета // Сер. Физика, 1966. - Вып. 31. - С. 51—58.
- 45 Сю С., Шмидт Ф. Измерение колебаний местных значений температуры поверхности при кипении в большом объеме. — «Теплопередача», 1961, № 3. - 29 с..
- 46 Толубинский В. И., Кривешко А. А., Островский Ю. Н. О пульсациях температуры поверхности нагрева под действующим центром парообразования. — «Теплофизика и теплотехника. Респ. межвед. сб., - Киев, «Наукова думка», 1971. - Вып. 19. - С. 22—26.
- 47 Cooper M.G., Lloyd A.J. P. Transient local heat flux in nucleate boiling. – Proceedings of the Third International Heat Transfer Conference, Chicago, 1966. - № 4. - P. 193 - 203.
- 48 Cooper M.G., Lloyd A.J. P. The microlayer in nucleate pool boiling. - International Journal of Heat and Mass Transfer, 1969. -Vol. 12, № 8. - P. 895-913.
- 49 Fontana D.M. Simultaneous measurement of bubble grown rate and thermal flux from heating wale to the boiling fluid near the nucleation site. - International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972. - Vol. 15, № 4. - P. 707 - 720.
- 50 Madsen N., Bonilla C.F. Heat transfer to sodium-potassium alloy in pool boiling. – Chemical Engineering Progress. Symposium Series, 1960. - Vol. 56, № 30. - P. 251-259.
- 51 Jawurek H.H. Simultaneous determination of microlayer geometry and bubble growth in nucleate boiling // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1969.– Vol.12, № 8. – P. 843-848.
- 52 Воутсикос К, Джад Р. Исследование испарения микрослоя с помощью лазерной интерферометрии // Теплопередача. – 1975.– № 1. – С. 89-94.
- 53 Теплопередача в двухфазном потоке. Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта. - М.: Энергия, 1980. - 328 с.
- 54 Литвиненко В.В. Влияние капиллярно-пористых структур на интенсификацию процессов теплообмена при кипении жидкостей // Международный научный журнал «Молодой учёный». - Казань, 2019. - № 7 (245). - С. 112-116.

- 55 Андоньев С.М. Испарительное охлаждение металлургических печей. - М.: Металлургия, 1970.
- 56 Вознович П.Д. Охлаждение металлургических печей высокотемпературным теплоносителями. - М.: Металлургия, 1959.
- 57 Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. - М.-Л.: Энергия, 1966.
- 58 Зысин В.А. Комбинированные парогазовые установки и циклы. - М.: Госэнергоиздат, 1962.
- 59 Основы теории и расчета жидкостных реактивных двигателей. Под ред. В.М.Кудрявцева. - М.: Высшая школа, 1975.
- 60 Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. - М.: Энергия, 1976, 392 с.
- 61 Генбач А.А. Об использовании капиллярно-пористого теплообменника для охлаждения высокофорсированных огнетехнических установок. Дсп. в ВИНТИ 3.01.1979, № 72-79.
- 62 Генбач А.А., Горошко И.В. Системы охлаждения плавильных агрегатов. - Алма-Ата: КазНИИНТИ, 1987. - 58 с.
- 63 Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. - Л.: Энергия, 1980. - 144 с.
- 64 Коваленко Л.М., Глушков А.Д. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 240 с.
- 65 Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Н.В. Кузнецова и др. - М.: Энергия, 1973. - 296 с.
- 66 Калинин Э.К., Дрейдер Г. А., Ярхо С.А, Интенсификация теплообмена в канатах. - М.: Машиностроение, 1981. - 205 с,
- 67 Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т.1 / Пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Щикова. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 560 с.
- 68 Горбис З.Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. - М.: Энергия, 1970. - 424 с.
- 69 Воронин В.Г., Ревякин А.В., Сасин В.Я., Тарасов В.С. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1976.
- 70 Генбач А.А. Теплопередающие возможности капиллярно-пористой системы охлаждения в поле гравитационных сил. Алма-Ата: КазПТИ, сб. "Рабочие процессы и усовершенствования теплотехнических и электротехнических устройств", 1983. - С.41-46.
- 71 Боттерилл Дж; Теплообмен в псевдоожигенном слое / пер. с англ. - М.: Энергия, 1980. - 344 с.
- 72 Рассолов Б.К., Горшков В.В., Матвеев В.И. Интенсификация теплообмена в воздухоохладителях с помощью псевдоожигенного слоя. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 76 с.

- 73 Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных пленках. - Киев: Техника, 1972. - 196 с.
- 74 Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. - М.: Энергия, 1977. - 288 с.
- 75 Теплопередача при низких температурах. / Под ред. У. Фроста. - М.: Мир, 1977. - 391 с.
- 76 Смирнов Г.Ф. Теплообмен при кипении в стесненных условиях. 5-я Всесоюзная конференция по теплообмену и гидравлическому сопротивлению. Л., 1974.- С. 85-87.
- 77 Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. - Новосибирск: Наука, 1970. - 660 с.
- 78 Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергоиздат, 1981. - 416 с.
- 79 Кутателадзе С.С. Гидродинамическая теория изменения режима кипения жидкости при свободной конвекции. "Известия АН СССР" ОТН, 1951, № 4. - С.529-536.
- 80 Кружилин Г.Н. Теплоотдача от поверхности нагрева к кипящей однокомпонентной жидкости при свободной конвекции "Известия АН СССР ОШ", 1948. - № 7. - С. 967-980.
- 81 Тепловые трубы. Перевод с английского и немецкого. Под ред. Шпильрайна Э.Э. - М.: Мир, 1972.
- 82 Купер М.Г., Мерри Д.М, Испарение микрослоя при пузырьковом кипении // В кн.: Тепло- и массоперенос. –Минск: Наука и техника, 1972. – Т.9, Ч.1. – С. 233-257.
- 83 Поляев В.М., Генбач А.А. Скорость роста паровых пузырей в пористых структурах // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. – №10. – С. 61-65.
- 84 Генбач А.А., Бурмистров А.В. Исследование теплового состояния цилиндров паровых турбин // Промышленность Казахстана. –2011. –№2 (65). – С. 91-93.
- 85 Polyayev V., Genbach A. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures / M. Jamialahmadi, H. Muller-Steinbagen and et. // Intern. Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. - Vol. 51. - P. 2482-2493.
- 86 Ose Y., Kunugi T. Numerical study on subcooled pool boiling // Progr. In Nucl.Sci. and Technology, 2011. - Vol. 2. - P. 125 - 129.
- 87 Pioro I.L., Rolsenow W., Doeffler S.S. Nucleate pool boiling heat transfer. II: assessment of prediction methods // Intern. Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. - Vol. 47. - P. 5045 - 5057.
- 88 Xing H., Kennig D.B.R. Identification of bubble nucleation sites // Proc. Of 8th National of Heat Transfer conf., 9-10 th Set. 2003, Oxford.

89 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Характеристики одиночного парового пузыря в ячейках капиллярно-пористой структуры // Вестник НАН РК. –2016 (364), –№.6. –С. 34-41.

90 Genbach A.A., Jamankulova N.O., Bondartsev D. Yu., Bakić V. Characteristics of the single steam bubble in cells of capillary-porous structure used into heat power installations. BOOK OF ABSTRACTS 3rd South East European SDEWES Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 2018, Novi Sad, Serbia 2018, 30. June -3 July, p.190.

91 Genbach A.A., Jamankulova N.O. Single steam bubble in cells of capillary-porous structure used into heat power installations // Вестник КазННТУ - 2019. - № 5 (135). -Р. 268-275.

92 Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А. Предельное состояние поверхности при термическом воздействии // ТВТ. – 1991. – Т.29, № 5. – С. 923-934.

93 Polyayev V., Genbach A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System // Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. – 1991. – Dubrovnik, Yugoslavia, 23-28 June. - P. 639-644.

94 Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы. // Известия вузов. Энергетика. – 1991. – № 12. – С. 97-101.

95 Поляев В.М., Генбач А.А. Управление теплообменом в пористых структурах // Известия Российской академии наук. Энергетика и транспорт. – 1992. – Т.38, № 6. – С. 105-110.

96 Поляев В.М., Генбач А.А. Теплообмен в пористой системе, работающей при совместном действии капиллярных и гравитационных сил // Теплоэнергетика. – 1993. – № 7. – С. 55-58.

97 Генбач А.А., Кульбакина Н.В. Пылеподавление и пылеулавливание с помощью циркуляционного пеногенератора с пористой структурой // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 2010. – № 4. – С. 62-65.

98 Поляев В.М., Генбач А.А. Управление внутренними характеристиками кипения в пористой системе // Криогенная техника и кондиционирование: Сб. трудов МГТУ. – 1991. – С. 224-237.

99 Поляев В.М., Генбач А.А. Применение пористой системы в энергетических установках // Промышленная теплоэнергетика. – 1992. – № 1. – С. 40-43.

100 Поляев В.М., Генбач А.А. Расчет тепловых потоков в пористой системе охлаждения // Известия вузов. Авиационная техника. – 1992. – № 2. – С.71-74.

101 Генбач А.А., Гнатченко Ю.А. Системы охлаждения теплонагруженного элемента детонационного горелочного устройства – Камеры сгорания, диффузора, конфузора // Вестник Каз НТУ. - Алматы. – 2007. – № 4 (61). – С.87-91.

- 102 Овсянник А.В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 284 с.
- 103 Alekseik O. S., Kravets VOL. Yu. Physical model of boiling on porous structure in the limited space, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2013. - № 4/8 (64). -P. 26-31.
- 104 Jijiv A.M., Degryatov M.VOL. Modeling of heat transfer in a porous material, Paper of Samara State Aerospace University, 2009. - P. 289-293.
- 105 Alekseik O. S., Kravets VOL. Yu., Kopchevska I. A. Heat transfer intensity at boiling on small-size surface. Technology and construction in electronic apparatuses, 2012. - № 1. - P. 49-53.
- 106 Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. - М.: Наука, 1973. - 32 с.
- 107 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Исследование хрупких капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках // Вестник НАН РК. -2016. - №3. - С. 35-41.
- 108 Genbach A.A., Jamankulova N.O., I. K. Iliev, A.K. Terziev . Study of fragile capillary-porous coatings in power installations. EENVIRO Conference on Sustainable Solutions for Energy and Environment, 2018, 9 - 13 October, Cluj – Napoca, Romania, Technical University of Cluj – Napoca, Web of Conferences. - 2019. – Vol.85.
- 109 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Построение модели развития паровой фазы в пористых структурах теплообменников электростанций // «Вестник КазННТУ». - 2017. - №4 (122). - С.31- 36.
- 110 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Модель и механизм развития паровой фазы в пористых структурах теплообменников // «Вестник НАН РК» 2017. -№6 (370). - С. 85-92.
- 111 Genbach A.A., Jamankulova N.O., Bakić V. V. Capillary-Porous Heat Exchangers for Cooling of Melting Units // Thermal Science Journal, 2018. - Vol. 22, Suppl. 5. - P. 1359-1369.
- 112 Genbach A.A., N.O. Jamankulova, V.VOL. Bakić. Capillary-porous heat exchanges for cooling of melting units. Proceedings of 18th International Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia «Energy – Efficiency – Ecology» Sokobanja, October 17-20, 2017. - P.413-419.
- 113 Поляев В.М., Генбач А.А., Минашкин Д.В. Процессы в пористом эллиптическом теплообменнике // Известия вузов. Машиностроение.- 1991. - №4-6. -С.73-77.
- 114 Поляев В.М., Генбач А.А. Анализ законов трения и теплообмена в пористой структуре // Вестник МГТУ, серия Машиностроение. – 1991. – С.86-96.
- 115 Поляев В.М., Генбач А.А., Бочарова И.Н. Влияние давления на интенсивность теплообмена в пористой системе // Известия вузов. Машиностроение. – 1992. – №4-6. – С. 68-72.

- 116 Генбач А.А., Бакытжанов И.Б. Защита от землетрясений фундаментов ТЭС с помощью пористых геозкранов // Поиск, МОН РК, 2012. - №1(2). - С.289-297.
- 117 Генбач А.А., Данильченко И. Пористый пароохладитель паровых котлов // Промышленность Казахстана, 2012. - №1(70) - С.72-75.
- 118 Генбач А.А., Олжабаева К.С. Визуализация термического воздействия на пористый материал в тепловых энергетических установках электростанций // Вестник национальной инженерной академии РК. - №3(45).- 2012.- С.63-67.
- 119 Генбач А.А., Исламов Ф.А. Исследование присопловой галтели в энергоустановках // Вестник КазНТУ, 2013. - №3(97). – С.245-248.
- 120 Генбач А.А., Исламов Ф.А. Моделирование процесса задевания ротора турбины // Вестник КазНТУ, 2013. - №6 (100), – С.235-240.
- 121 Krepper E., Koncar B., Egorov Y. CFD modeling subcooled boiling-concept, validation and application to fuel assembly design // Nucl. Eng. and Design. -2007. - №237. - P. 716-731.
- 122 Генбач А.А. Джаманкулова Н.О. Исследование процессов парообразования в пористых структурах с избытком жидкости // Вестник КазНТУ. – 2016. - №3 (115). - С. 422-428.
- 123 Genbach A.A., Jamankulova N.O., Bakić V.V. The processes of vaporization in the porous structures working with the excess of liquid // Thermal Science Journal. - 2017, Vol.21, № 1. - P. 363– 373.
- 124 Генбач А.А. Джаманкулова Н.О. Анализ процессов парообразования в пористых структурах на основе оптических методов исследования. // Вестник КазНТУ. – 2016. - №3 (115). - С. 428-432.
- 125 Андоньев С.М. , Кудинов Г.А. и др. А.с. № 551895, МПК: С 21 В 7/10; 1971, Б.и. № 15.
- 126 Генбач А.А. Джаманкулова Н.О. Устройство для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок Патент РК №32509, Бюл. № 22. -95с.
- 127 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Study of heat exchanger with a porous structure. Proceedings of 5-th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD, 2-4, 06, 2016, pp.57-62.
- 128 Генбач А.А. Джаманкулова Н.О. Исследование высокофорсированного пористого теплообменника // Вестник НАН РК. -2016. - №4. - С. 32-36.
- 129 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Исследование высокофорсированного пористого теплообменника. X Международная научно-технической конференции АУЭС, посвященная памяти Первого ректора Г.Ж. Даукеева, Алматы, АУЭС // Вестник АУЭС, 2018. – Т. 43, № 4(2). - С. 59-64.

- 130 Васильев Л.Л., Конев С.В. Теплопередающие трубки. Минск.: Наука и техника, – 1972. –152 с.
- 131 ТУ 14-4-507-99 Сетки тканые с квадратными ячейками микронных размеров
- 132 ГОСТ 6613-86. Ограничение срока действия снято по протоколу N 2-92 Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации (ИУС 2-93)
- 133 Рабинович С.Г. Погрешности измерений. - Л.: Энергия, 1978. -262с.
- 134 Каталог продукции ОВЕН. Контрольно-измерительные приборы. Москва, (2020), 2024. –133 с.
- 135 Руководство по эксплуатации ЛГФИ.407142.002 РЭ.
- 136 Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. –М.: Энергоатомиздат, 1984, – 80 с.
- 137 Сасин В.Я., Федоров В.Н., Сорокин А.Я. Экспериментальное исследование тепловой трубки на легкокипящих теплоносителях. Сб. докладов научно-технической конференции МЭИ, М., "МЭИ", 1969. - С.79-84.
- 138 Allingham W.D., McEntire I.A. Determination of boiling film coefficient for a heated horizontal tube in water-saturated wick material // J. Heat Transfer, 1961. - P.71-76.
- 139 Marto R.J. Mosteller V.L. Effect of nucleate boiling on the operation of low temperature heat pipes // ASME Paper, VHT- 15, 1969. - P. 4-7.
- 140 Филиппов Ю.Н. Экспериментальное исследование теплоотдачи в зоне испарения водяной тепловой трубы. "ИФЖ", 1977. - Т.30, № 2. - С.250-254.
- 141 Schwartz J. Performance map of the water heat pipe and the phenomenon of noncondensable gas generation. "ASME Publication", NHT - 15, 1969. - P. 1-6.
- 142 Seban R., Abhat A. Study atnd maximum evaporation from screen wicks. "ASME Publication", HWA/HT - 12, 1971.- P. 44-47.
- 143 Тананайко Ю.М. Сб. "Химическое машиностроение". - Киев, "Техника", 1965. - Вып. 1. - С.59-66.
- 144 Struve H. VDI-Forechungaheft 534, Dusseldorf, VD1 - Verlag, 1969. - 36 p.
- 145 Haase Jb. Die Warneubergang am siedenden Rieselfilm // Chem. Techn. – 1970. - № 5. - P. 283-287.
- 146 Рычков А.И., Поспелов В.К. "Химическая промышленность". - 1959. - № 5. - С. 56-59.
- 147 Breselar R. VDI - Zeitachrift, 100, 1958. - № 115. - P. 630-638.
- 148 Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика.- М.: Машиностроение, 1972. - 672 с.
- 149 Лабунцов Д.А. Приближенная теория теплообмена при развитом пузырьковом кипении // Известия АН СССР, Энергетика и транспорт, 1963. - № 1. - С. 58-71.
- 150 Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. - М.: Высшая школа, 1977. - 352 с.

- 151 Современные проблемы теплообмена. Сб.статей, М.-Л.:Энергия, 1966. - 272 с.
- 152 Теплообмен и гидродинамика. - Л.: Наука, 1977. - 216 с.
- 153 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Плотность теплового потока при кипении одиночного парового пузыря в ячейках пористой структуры // «Вестник КазНУ» 2017. - №5 (123). - С.181- 186.
- 154 Поляев В.М., Генбач А.А., Бочарова И.Н. Локальные параметры парового пузыря в ячейке пористой структуры // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 1993. - №2. – С. 47-52.
- 155 Поляев В.М., Генбач А.А. Применение пористой системы в энергетических установках // Промышленная теплоэнергетика. – 1992. – № 1. – С. 40-43.
- 156 Поляев В.М., Генбач А.А. Расчет тепловых потоков в пористой системе охлаждения // Известия вузов. Авиационная техника. – 1992. – № 2. – С.71-74.
- 157 Genbach A.A., Jamankulova N.O. Characteristics of the single steam bubble in cells of capillary-porous structure // «Вестник НАН РК» 2016. - №6. - С. 5-11.
- 158 Genbach A.A., Jamankulova N.O., I. K. Iliev. Research and calculation for high-forced capillary-porous heat exchanger. Тезисы 1-ой международной конференции "Alternative Energy Sources, Materials & Technologies (AESMT'18)"- 2018, 14 - 15 May, 2018, Болгария, Пловдив.
- 159 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Предельное состояние капиллярно-пористой структуры под индивидуальным паровым пузырем // «Известия НАН РК» –2016, –№6. –С. 154-161.
- 160 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Предельное состояние капиллярно-пористой структуры под индивидуальным паровым пузырем // Вестник НАН РК, – 2017, –№1 (365). - С 34-41.
- 161 Поляев В.М., Генбач А.А. Механизм процессов парообразования в пористой системе охлаждения // Теория рабочих процессов в узлах и трактах энергетических установок: Сборник трудов МАИ. – М.,1991. – С.81-90.
- 162 Бондарцев Д.Ю. Разработка и исследование высокофорсированной системы охлаждения элементов газотурбинных установок тепловых электростанций: дисс. ... доктора философии (PhD). –Алматы. –2019.
- 163 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Применение капиллярно-пористых систем в металлургическом производстве // Вестник НАН РК, –2017, – №3 (367). - С. 65-72.
- 164 A.A. Genbach, N.O. Jamankulova, V.VOL. Bakić. Capillary-porous heat exchanges for cooling of melting units. Proceedings of 18th International Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia «Energy – Efficiency – Ecology» Sokobanja, October 17-20, 2017. - P. 413-419.

- 165 Генбач А.А. Джаманкулова Н.О. Основные направления разработок капиллярно-пористых теплообменников нового теплоотводящего класса // «Вестник НАН РК». - 2016, –№5. –С. 101-106.
- 166 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О., Бекалай Н.К. Поиск эффективных систем охлаждения для взрывобезопасных плавильных агрегатов. «Вестник КазНИТУ» 2017, №1(119). – С. 234-238.
- 167 13 Генбач А.А., Пионтковский М.С. Пористый пылегазоуловитель с управляемой геометрией микроканалов // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 2010. – №4. – С.59-61.
- 168 Genbach A.A., Jamankulova N.O., Beloev H., Iliev I. Energy Divider with Insert for Heat Protection of Fruit Trees. Acta Technologica Agriculture, 2018, № 1. - P. 8-13. (Scopus)
- 169 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Капиллярно-пористые теплообменники для охлаждения плавильных агрегатов // Вестник НАН РК, 2017. - №4 (368). - С. 33-39.
- 170 Genbach A.A., Jamankulova N.O., I. K. IlieVol. The use of heat pipes in fruit growing. Conference on Thermal Equipment, 8th International Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD, Targoviste, Romania, June, 6 - 8, 2019), E3S Web-of-Conferences, Open Access proceedings in Environment, Energy and Earth Sciences.
- 171 Генбач А.А. Джаманкулова Н.О. Исследование тепло-массообмена в капиллярно-пористых системах охлаждения нового класса тепловых энергоустановок // Доклады НАН РК. -2016. - №5. - С. 139-145.
- 172 Genbach A.A., Jamankulova N.O. Study of heat and mass transfer in capillary-porous cooling systems of a new class of energy thermal installations. Theses 55th Annual Science Conference of Ruse University “Smart Specialization-Innovative strategy for regional economic transformation” 2016. - Ruse, Bulgaria, 2016. – 121 p.
- 173 Genbach A.A., Jamankulova N.O. Study of heat and mass transfer in capillary-porous cooling systems of a new class of energy thermal installations. PROCEEDINGS OF UNIVERSITY OF RUSE – 2016. - Vol. 55. - P.18-23.
- 174 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Разработка высокофорсированных капиллярно-пористых теплоотводящих систем // «Известия НАН РК» сер. Геология и технические науки. 2017. - №2 (422). - С. 245-251.
- 175 Genbach A.A., Jamankulova N.O. Study of heat and mass transfer in capillary-porous cooling systems of a new class of energy thermal installations «Вестник НАН РК». 2017. - №1 (365). - P. 14-19.
- 176 Genbach A.A., Jamankulova N.O., I. K. IlieVol. Application areas and calculation method for capillary-porous heat exchangers of the new heat-removing class. Materials Science and Engineering. – 2019. - №595. – 012001 p. doi:10.1088/1757-899X/595/1/012001.

177 Генбач А.А., Джаманкулова Н.О., Терзиев А. Исследование тепломассообмена в капиллярно-пористых системах охлаждения // Proceedings XXIII International Conference 17th – 20th September, 2018, Sofia, Sozopol, 2018. - P. 253-256.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Критериальный расчет по теплообмену в капиллярно-пористой системе охлаждения

Для получения определительного уравнения теплообмена, представленного как функция безразмерных комплексов, в качестве таких комплексов выбираем:

$$\text{Re}; N_g; \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}}; N_p; \text{Pr}_{\text{ж}}; (F/F_{\Phi}).$$

Функция определяемого числа Стантона примет вид:

$$\text{St} = f(\text{Re}; N_g; \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}}; N_p; \text{Pr}_{\text{ж}}; F/F_{\Phi}), \quad (1)$$

где $N_g = (1 + \cos \beta) \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot b_{\Gamma}^2 / \sigma$ – критерий Бонда, учитывающий влияние гравитационных сил на удаление паровых пузырей из фитильной структуры и подвод жидкости к греющей поверхности в зависимости от ее ориентации;

$\frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}}$ – параметр, учитывающий избыток жидкости, проходящей через поперечное сечение фитиля, создаваемый массовой силой.

При обработке экспериментальных данных значения физических свойств жидкости для расчета критериев подобия с достаточной точностью можно определить по температуре, в качестве которой принимается средняя между температурой стенки и пара, так как при $p > 0,1$ бар скачком температуры при фазовых превращениях можно пренебречь. Удельная теплота парообразования и поверхностное натяжение жидкости определяются по температуре пара.

Получено уравнение подобия теплообмена в капиллярно-пористой системе охлаждения с учетом действия поля гравитационных сил. В качестве определительного уравнения выбрана степенная зависимость безразмерного коэффициента теплообмена St в следующем виде:

$$\text{St} = C \text{Re}^{a_1} \text{Pr}^{a_2} N_g^{a_3} \left(\frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}}\right)^{a_4} N_p^{a_5} (F/F_{\Phi})^{a_6}. \quad (2)$$

Показатели степеней a_i при критериях подобия определяются путем обработки опытных данных при фиксированных геометрических размерах фитиля и охлаждающего элемента.

Определение ведется методом наименьших квадратов. Для определения влияния критерия Re на величину безразмерного коэффициента теплообмена St определялась зависимость $\text{St} \cdot \text{Pr}^{0,6} = f(\text{Re})$. При фиксированных параметрах N_g ;

$\frac{m_{ж}}{m_{п}}$; N_p . Показатель степени при критерии Pr принимался равным 0,6. Для определения показателей степени при других параметрах рассматривается их влияние на величину произведения $St \cdot Pr^{0,6} \cdot P^{-n_i}$, в котором показатель степени n_i при параметре P_i уже определен. Авторами [69] показано слабое влияние параметра N_p на безразмерный коэффициент теплообмена St , где показатель степени принимался равным 0,23.

Таким образом, результаты обобщения опытных данных по теплообмену в исследованной системе охлаждения с сетчатыми фитилями могут быть представлены в виде критериальной зависимости:

$$St \cdot Pr^{0,6} (F/F_{\phi})^{0,74} = 68 N_g^{0,3} \left(\frac{m_{ж}}{m_{п}}\right)^a N_p^{0,23} Re^{-0,53} \quad (3)$$

Для оценки влияния режимных и конструктивных параметров на интенсивность теплообмена преобразуем уравнение (3) к размерному виду:

$$\alpha = 0,88q^{0,47} (1+\cos\beta)^{0,3} \left(\frac{m_{ж}}{m_{п}}\right)^a h^{0,26} \delta_{\phi}^{-0,26} b_z^{-0,14} \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что избыточный расход жидкости не оказывает заметного влияния на интенсивность теплообмена, но он может существенно расширить границы работоспособности системы охлаждения.

С изменением угла наклона охлаждаемой поверхности коэффициент теплообмена снижается. Аналогичное влияние оказывают повышенные размеры ячеек и толщина фитиля.

Уравнение (4) учитывает режимные, а также конструктивные параметры капиллярно-пористой системы охлаждения и дает возможность по заданным их значениям рассчитать коэффициент теплоотдачи в подобных системах; Таким образом, полученное при обобщении данных эксперимента критериальное уравнение теплообмена позволяет рассчитывать интенсивность теплообмена в подобных системах в широком диапазоне изменения режимных и конструктивных параметров.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расчет погрешности измерений

По способу получения численного значения измеряемой величины все технические измерения можно разделить на прямые и косвенные.

Прямыми измерениями называются такие, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Например, измерение температуры термометром, давления — манометром. Результат может быть получен также с помощью *косвенных измерений*, когда численное значение находят на основании результатов прямых измерений, связанных с измеряемой величиной известной зависимостью

$$y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (1)$$

где y - искомая величина; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ - числовые значения величин, измеренных прямым способом.

Косвенные измерения. В практике технических и лабораторных измерений часто встречаются косвенные измерения, когда определяемая величина Z является функцией нескольких величин X, Y , измеряемых прямыми методами. Косвенные измерения, как и прямые, могут быть техническими и лабораторными. При косвенных технических измерениях для каждой из измеряемых прямыми методами величин известны пределы допускаемых погрешностей $\Delta_{\text{пр } x}, \Delta_{\text{пр } y}, \dots$, определяемых классами точности приборов.

По результатам однократных измерений X, Y, \dots рассчитывается Z . Поскольку $\Delta_{\text{пр } x} \ll X, \Delta_{\text{пр } y} \ll Y$, то, пренебрегая высшими производными, находим оценку погрешности определения Z :

$$\Delta_{\text{пр } z} = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 \Delta_{\text{пр } x}^2} + \sqrt{\left(\frac{df}{dy}\right)^2 \Delta_{\text{пр } y}^2}, \quad (2)$$

При косвенных лабораторных измерениях каждая из величин X, Y , определяемых прямыми методами, измеряется многократно средствами измерения повышенной точности, систематические погрешности при этом исключены. В результате обработки прямых измерений для каждой величины X, Y, \dots определены числом измерений m_x, m_y, \dots и величиной среднеквадратичных отклонений $\sigma_x, \sigma_y, \dots$. Значение Z , рассчитывается как $f(m_x, m_y)$, и при независимых погрешностях измерений

$$\sigma_{\text{пр } z} = \sqrt{\left(\frac{df}{dx}\right)^2 \sigma_{\text{пр } x}^2} + \sqrt{\left(\frac{df}{dy}\right)^2 \sigma_{\text{пр } y}^2}, \quad (3)$$

Для оценки границ доверительного интервала необходимо знать распределение погрешностей определения, которое зависит от вида функциональной зависимости.

Приведем пример расчета погрешности величины удельного теплового потока q , определяемого в эксперименте, описанного в главе 3.

Величина удельного теплового потока определяется по формуле:

$$q = Q / F = U \times I / F.$$

Погрешность измерения мощности q оценивается как погрешность косвенного измерения:

$$\Delta q = \sqrt{\left(\frac{df}{dU}\right)^2 \Delta U^2} + \sqrt{\left(\frac{df}{dI}\right)^2 \Delta I^2} + \sqrt{\left(\frac{df}{dF}\right)^2 \Delta F^2};$$

$$I + \Delta I = (0.77 + 0.01) \text{ A};$$

$$U + \Delta U = (195,60 + 0.01) \text{ В};$$

$$F + \Delta F = (95,64 + 0,01) \times 10^{-4} \text{ м}.$$

После проведенных расчетов определяем величину погрешности удельного теплового потока q , которая составляет $\varepsilon = 0,12\%$.

Погрешности для величин, измеренных при проведении эксперимента, определялись в зависимости от класса точности приборов и условий измерения. Ширина ячейки сетки на просвет – b , м

$$b = (0,14 \pm 0,01) \times 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\frac{\Delta b}{b} = \pm \frac{0.01 \times 100}{0.014} = \pm 7,4\% .$$

Диаметр проволоки сетки – d , м

$$d = (0,09 \pm 0,01) \times 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\frac{\Delta d}{d} = \pm \frac{0.01 \times 100}{0.09} = \pm 11\% .$$

Толщина капиллярно-пористой структуры – δ , м

$$\delta = (0,18 \pm 0,01) \times 10^{-3}, \text{ м}$$

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} = \pm \frac{0.01 \times 100}{0.018} = \pm 5,6\% .$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Планирование эксперимента

Планирование эксперимента, проведенное для пористых систем, определило выбор числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для обеспечения требуемой точности в инженерных расчетах.

На основе планирования эксперимента определяем количество значимых факторов, включенных в критериальное уравнение теплообмена в пористых структурах, и одновременно отсеиваем факторы, значимость которых невелика. Проводим количественные оценки эффектов влияния некоторых факторов и их взаимодействий на целевую функцию числа Стантона St :

$$St = \eta_i + \varepsilon_i,$$

где η_i - истинное значение выхода при i -ом эксперименте; ε_i - суммарная помеха, которая соответствует i -ому эксперименту, образованная вследствие аддитивного воздействия переменных, которые являются неуправляемыми. Поиск оптимальных условий сводился к определению режимных факторов $q, (m_{жс}/m_n)_{opt}$ и геометрических характеристик структуры $b_i, \delta_{\phi i}$ и поверхности теплообмена L_i, h_i .

На основе оптимизации, получаем значимые факторы и построим математическую модель тепломассопереноса в пористых структурах и подбираем постоянный коэффициент в формализованном критериальном уравнении и теоретических моделях, которые в целом описывают механизм процесса и позволяют получить инженерные расчетные зависимости. При помощи полного факторного эксперимента получена линейная и неполная квадратичная статистическая модель теплообмена в пористых структурах в виде теоретического уравнения регрессии для трехфакторной задачи вида:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^3 \beta_{ij} x_{ij} + \beta_{123} x_1 x_2 x_3,$$

где β_i - коэффициент, характеризующий эффект влияния управляемых переменных на целевую функцию; β_{ij}, β_{123} - коэффициенты, характеризующие эффекты влияния парных взаимодействий переменных и тройного взаимодействия соответственно; x_i - контролируемые управляемых переменные, которые изменялись в процессе опытов по плану. Эти переменные взаимно независимые, а точность их установки оценена. Наличие помехи ε делает определение числа St случайной, поэтому реально можно вычислить оценки b_i истинных генеральных значений коэффициентов β_i .

Тогда математическая модель примет вид:

$$St = y = \sum_{i=0}^7 b_i z_i,$$

в которую введена фиктивная переменная $x_0 = 1$ и осуществлен переход к переменным z_i . Для нахождения математической модели выполняются четыре этапа. На этапе планирования эксперимента установлен экспериментальный план, в котором сделан набор фиксированных значений управляемых переменных:

$q, m_{жс}, \beta$. В качестве плана выбран полный факторный эксперимент, позволивший реализовать все возможные неповторяющиеся комбинации уровней n независимых переменных, каждая из которых принудительно варьируется на двух уровнях. Тогда число таких комбинаций равно $N=2^n = 2^3$. Независимые переменные преобразованы к безразмерным переменным:

$$x_{\bar{\alpha}} = \frac{x_i - x_i^*}{\Delta x_i},$$

где x_i^* - значение управляемой переменной, соответствующей начальному базовому режиму; Δx_i - шаг варьирования. Верхние и нижние уровни варьирования будут равны $x_{b_i} = +1, x_{Ni} = -1$. Для $n=3$ полный факторный эксперимент имеет вид (табл. В.1). Таким образом, план эксперимента образован тремя столбцами управляемых переменных, а остальные столбцы матрицы получены перемножением соответствующих значений управляемых переменных.

Таблица В.1 – Таблица плана эксперимента для полного факторного эксперимента ($n=3$)

	z_0	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5	z_6	z_7
N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_7=x_1x_2x_3$
1	+	-	-	-	+	+	+	-
2	+	+	-	-	-	-	+	+
3	+	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	-
5	+	-	-	+	+	-	-	+
6	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+

Вторым этапом явилось проведение опытов; для усреднения выходной величины St каждая строка экспериментального плана дублируется три раза, а эксперимент делится на три серии опытов, в каждой из которых полностью реализован полный факторный эксперимент:

$$\bar{St} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 y_{qi}, q=1,2,\dots,n$$

Для исключения систематических ошибок при вычислении оценок коэффициентов регрессии произведена рандомизация вариантов варьирования в каждой из трех серий. Используются таблицы равномерно распределенных случайных чисел и определена последовательность реализации вариантов варьирования переменных в каждой серии опытов. Выбраны числа от 1 до 8 в порядке последовательного обхода столбцов таблицы, начиная с первого. При рандомизации второй серии опытов за первый столбец таблицы принимается столбец, следующий за последним столбцом, использованным в предыдущей серии. Последовательность реализации первой серии полного факторного эксперимента: 8,4; 1,6; 5,7; 2,3.

Третьим этапом явилось вычисление коэффициентов уравнения регрессии b_i методом наименьших квадратов, в котором минимизирована сумма квадратов отклонений наблюдаемых $St_{\text{табл}}$ и предсказанных по модели St значений выхода:

$$\min \sum_{i=1}^N (St_{\text{набл}} - \hat{St}_i)^2.$$

Коэффициенты b_i вычислены как среднее арифметическое усредненных значений выхода с учетом знаков соответствующего столбца матрицы планирования:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N z_{qi} y_q, i = 0, 2, \dots, 2^{n-1}.$$

На последнем этапе проводится статистический анализ полученных результатов. Проверяются гипотеза о значимости коэффициентов b_i методом нуль-гипотезы, $\beta_i = 0$ с помощью критерия Стьюдента

$$t_i = |b_i| / s^2(b_i),$$

где $s^2(b_i)$ - дисперсия ошибки определения коэффициента b_i :

$$s^2(b_i) = s^2(St) (Nm),$$

где $s^2(St)$ - дисперсия воспроизводимости:

$$S^2(St) = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N S_q^2(St) = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{q=1}^N \sum_{i=1}^m (St_{q,i} - St_q)^2,$$

где $N=8, m=3$.

Если найденное значение t_i превышало значение $t_q v$, определенных по таблице зависимости $t_q v$, для распределения Стьюдента от числа степеней свободы $v = N / (m-1)$ и пределов вероятности $q = 5\%$, т.е.

$$\text{Sign}(t_i - t_{кр}) = +1,$$

то нуль-гипотеза отвергается и коэффициент b_i признается значимым. При

$$\text{Sign}(t_i - t_{кр}) = +1$$

нуль-гипотеза принимается, и коэффициент b_i считают статистически незначимым, т.е. $\beta_i = 0$ и член $b_i z_i$ может быть исключен из математической модели.

Для проверки гипотезы об адекватности представления результатов эксперимента найденным уравнениям регрессии, оценено отклонение предсказанной уравнением регрессии выходной функции \hat{St}_q от результатов St_q в тех же точках Z_q факторного пространства с использованием критерия Фишера.

Дисперсия адекватности находится по формуле:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{q=1}^N (St_q - \hat{St}_q)^2,$$

где d – число членов аппроксимирующего полинома;

$$F = S_{ад}^2 / S^2(St)$$

Если вычисленное значение критерия меньше $F_{кр}$, найденного по таблицам 2-х процентных верхних пределов в зависимости от степеней свободы $v_{ад} = N - q$; то нуль-гипотеза принимается. Если гипотеза адекватности отвергается, проводится эксперимент с меньшим шагом варьирования Δx_i .

Пример расчета регрессионной модели для описания экспериментальных данных методом ПФЭ в следующем порядке:

1) выбираем основные факторы и их взаимодействия $x_1, x_2, x_3, x_4, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{23}$, приведенные в таблице 1;

2) предложить регрессионную модель для описания экспериментальных данных методом ПФЭ $N = 2^4 = 16$

3) Определить коэффициенты уравнения регрессии.

4) Оценить значимость коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента.

5) Проверить адекватность регрессионной модели по критерию Фишера.

Условием задания не предполагается учитывать взаимодействие факторов.

Поэтому мы имеем:

$k = 9$ – количество факторов;

$N = 16$ – число опытов.

Для составления уравнения регрессии необходимо определить коэффициенты уравнения $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}$. Для этого сначала определим среднее значение функции отклика:

$$y_{cp} = (y_1 + y_2)/2$$

тогда получим следующие усредненные значения y_{cp} , которые приведены в таблице В.2:

Таблица В.2 – Расчет коэффициентов уравнения регрессии

N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	y_1	y_2	\hat{y}_i	$(y_1 - \hat{y}_i)^2$	$(y_2 - \hat{y}_i)^2$	$S^2\{y_i\}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	39,2	48,5	43,85	21,62	21,62	43,25
2	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	48,0	47,5	47,75	0,063	0,063	0,13
3	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	44,7	48,5	46,6	3,61	3,61	7,22
4	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	47,2	43,7	45,45	3,063	3,063	6,13
5	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	41,7	33,4	37,55	17,22	17,22	34,45
6	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	40,5	48,2	44,35	14,82	14,82	29,65
7	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	48,2	49,2	48,7	0,25	0,25	0,50
8	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	49,4	49,5	49,45	0,003	0,002	0,01
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	98,5	95,0	96,75	3,063	3,063	6,13
10	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	115,0	92,5	103,8	126,6	126,6	253,13

Продолжение таблицы В.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
11	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	110,0	102,5	106,3	14,06	14,06	28,13
12	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	50,4	47,0	48,7	2,89	2,89	5,78
13	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	151,0	151,1	151,1	0,003	0,002	0,005
14	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	93,5	103,7	98,6	26,01	26,01	52,02
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	127,0	123,5	125,3	3,063	3,063	6,13
16	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	85,0	103,0	94	81	81	162,00
b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{23}				317,3	317,3	634,62

Регрессионная модель для описания экспериментальных данных методом ПФЭ будет выглядеть следующим образом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 \quad (1)$$

Определим коэффициенты уравнения, используя формулу (2):

$$b_j = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_{ji} \bar{y}_i, \quad (2)$$

где:

b_i – коэффициент уравнения;

j – порядковый номер, $j = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$;

N – количество опытов;

i – номер опыта;

\bar{y}_i – среднее значение функции отклика.

По рассчитанным значениям коэффициентов получим уравнение (3):

$$b_0 = 74,25; b_1 = 8,69; b_2 = 3,75; b_3 = 1,20; b_4 = 28,79; b_{12} = -5,1; b_{13} = 8,38; b_{14} = 7,40; b_{23} = 1,29;$$

$$y = 74,25 + 8,69x_1 + 3,75x_2 + 1,2x_3 + 28,79x_4 - 5,1x_1x_2 + 8,38x_1x_3 + 7,4x_1x_4 + 1,29x_2x_3 \quad (3)$$

Для статистического анализа полученного уравнения регрессии необходимо определить дисперсию воспроизводимости $S^2\{y\}$. Приняв значение

дублирования опытов равным $m = 2$ (по условию), определим дисперсию воспроизводимости для каждого опыта:

$$S^2\{y\} = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m \cdot (\bar{y}_i - \bar{y}_{iu})^2 . \quad (4)$$

Определим дисперсию воспроизводимости:

$$S^2\{y\} = (1/16) \cdot 317,31 = 39,66; f_{воспр} = N(m-1) = 16.$$

Определяем значимости коэффициентов по критерию Стьюдента, для этого рассчитаем значения t_p для каждого коэффициента:

$$t_{pi} = |b_i| / \sqrt{S^2\{y\}}, \quad (5)$$

где t_p – значение критерия Стьюдента, которое находят по таблицам.

Значимость коэффициентов определяется сравнением расчетного t_p и табличного значения $t_{табл}$, которое для $N=16$ по таблице коэффициентов t Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($p_i = 0,95$) составляет $t_{табл} = 3,18$: тогда незначимыми будут лишь два коэффициента – b_3 и b_{23} .

Проверим адекватность регрессионной модели по критерию Фишера:

Посчитаем дисперсию адекватности:

$$S_{адекв}^2 = \frac{1}{N-d} \cdot \sum_{i=1}^N \cdot m_i (\bar{y}_i - \bar{y}_p)^2 \quad (6)$$

Получим при $m_i = 2$, $N = 16$, $d = 9$; $\sum_{i=1}^N \cdot m_i (\bar{y}_i - \bar{y}_p)^2 = 634,615$ соответственно:

$$S_{адекв}^2 = (1/7) \times 634,615 = 90,659.$$

Определим F_p по критерию Фишера для проверяемой модели:

$$F_p = S_{адекв}^2 / S^2\{y\}; F_p = 2,286 . \quad (7)$$

Адекватной будет считаться та модель, значение F_p которой меньше табличного значения (по критерию Фишера) $F_{табл}$, который при $f_{воспр} = 16$, $f_{адекв} = 16-9 = 7$, для $\alpha = 0,05$ составляет $F_{табл} = 2,665$.

В случае $F_p < F_{табл}$, $2,286 < 2,665$, что говорит об адекватности модели.

После проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии составляется новое уравнение, на основании нового уравнения вновь проводят проверку адекватности полученного уравнения регрессии.

Как было указано выше лишь два коэффициента – b_3 и b_{23} незначимые, соответственно полученное новое уравнение регрессии будет выглядеть следующим образом (2.8):

$$y = 74,25 + 8,69x_1 + 3,75x_2 + 28,79x_4 - 5,1x_1x_2 + 8,38x_1x_3 + 7,4x_1x_4. \quad (8)$$

Согласно вышеизложенному алгоритму, проверим новое уравнение на адекватность.

Тогда получим при $m_i = 2$, $N = 16$, $d = 7$, $S^2_{адекв} = 70,513$, $F_p = 1,778$. Тогда для $F_p < F_{табл}$ $1,778 < 2,550$, соответственно модель адекватная.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Исследование и расчет высокофорсированного капиллярно-пористого теплообменника

Таблица Г.1 - Произведем расчет капиллярно-пористого теплообменника.

Расчет капиллярно-пористой системы охлаждения		
Параметр	величина	при $p = 3$ бар, $t_c = 130$ °C
Гидравлическое сопротивление определяется по закону Дарси		
$\Delta p = \mu_{ж} \cdot m_{ж} \cdot l / (p_{ж} \cdot F_{\phi} \cdot K_y), \text{ Н/м}^2;$		
$\mu_{ж}$, Па·с	$212.7 \cdot 10^{-6}$	Па·с динамическая вязкость жидкости
$\rho_{ж}$, кг/м ³	934.58	плотность жидкости
$m_{ж}$, кг/с	0.287	$m_{ж} = \beta \cdot q \cdot \frac{F_{и}}{r} = 1.1 \cdot 6 \cdot 10^5 \cdot 0.942 / 2164 \cdot 10^3 = 0.287$ расход жидкости
$\beta = 1,1$	1,1	коэффициент избытка жидкости
$F_{и}$, м ²	0.942	поверхность теплообмена
r , Дж/кг	$2164 \cdot 10^3$	$r = 2164 \cdot 10^3$ теплота парообразования
$q_{и}$, Вт/м ²	$6 \cdot 10^5$	тепловая нагрузка
F_{ϕ} , м ²	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$F_{\phi} = l \cdot \delta_{\phi} = 1 \cdot 1.04 \cdot 10^{-3} = 1.04 \cdot 10^{-3}$ площадь поперечного сечения фитиля
l , м	1	длина
δ_{ϕ} , м	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$\delta_{\phi} = 2 \cdot 0.52 \cdot 10^{-3} = 1.04 \cdot 10^{-3}$
K_y , м ²	$1.49 \cdot 10^{-7}$	$K_y = 5.5 \cdot 10^{-7} \cdot (b_r/d)^{-1.29} = 5.5 \cdot 10^{-7} \cdot (0.55/0.2)^{-1.29} = 1.49 \cdot 10^{-7}$ условный коэффициент проницаемости
b_r , м	$0.55 \cdot 10^{-3}$	$b_r = 2 \cdot 5.5 \cdot 10^{-3} / 2 = 0.55 \cdot 10^{-3}$ гидравлический диаметр структуры
d , м	$0.2 \cdot 10^{-3}$	средний диаметр проволоки сетки
ΔP , Н/м ²	421,5	$\Delta P = \frac{212.7 \cdot 10^{-6} \cdot 0.287 \cdot 1}{934.58 \cdot 1.04 \cdot 10^{-3} \cdot 1.49 \cdot 10^{-7}} = 424$

Продолжение таблицы Г.1

1	2	3
ΔP , Н/м ² в тепловых трубках	$1,47 \cdot 10^4$	$\Delta P = \frac{212,7 \cdot 10^{-6} \cdot (0,287/6) \cdot 1}{934,58 \cdot 1,04 \cdot 10^{-8} \cdot 7,14 \cdot 10^{-10}} = 1,47 \cdot 10^4$
<p>Гидравлическое сопротивление предлагаемой структуры будет в $424/1,43 \cdot 10^4 = 34,7$ раза меньше. При сравнении сетчатых структур с металлокерамическими, войлочными и порошковыми материалами, для которых максимальное значение проницаемости может составить $11 \cdot 10^{-10}$ м², т.е. всего в $\frac{1,1 \cdot 10^{-9}}{7,14 \cdot 10^{-10}} = 1,54$ раза больше, чем для сетчатых структур, работающих в поле капиллярных сил, а гидравлическое сопротивление – в 1.54 раза меньше.</p> <p>Таким образом, в предлагаемой капиллярно-пористой структуре, которая работает при комбинированном действии массовых и капиллярных сил, гидравлическое сопротивление при кипении воды будет в 34,7 раза меньше, чем в тепловых трубах с мелкоячеистыми сетками. (и тем более с волокнистыми и керамическими материалами) что позволяет охлаждать поверхности нагрева больших размеров применительно к кессонам плавильных печей.</p> <p style="text-align: center;">$\Delta P_{кпс} < \Delta P_{теп.труб}$ в 34,7 раз.</p>		
<p>Для расчета коэффициента теплоотдачи воспользуемся критериальным уравнением, полученным нами в результате обобщения опытных данных при кипении воды в капиллярно-пористой структуре, работающей в поле капиллярных и массовых сил</p>		
$St'_n \cdot Pr_{ж}^{0,6} \cdot (F_n/F_\phi)^{0,74} = 59 \cdot N_g^{0,3} \cdot \bar{m}^a \cdot \left(\frac{\lambda_{ж\phi}}{\lambda_{ж}}\right) \cdot k_{ст}^{-1} \cdot \bar{N}_p^{0,23} \cdot Re_n^{-0,53}$		
St'_n		$St'_n = a_n / (G_{ж} \cdot C_{pж})$
a_n , Вт/м ² · К		$a_n = q_n / (t_{ст} - t_n)$
q_n Вт/м ²	$6 \cdot 10^5$ Вт/м ²	тепловая нагрузка
ΔT , К	$(t_{ст} - t_n)$	разность температур
N_g	критерий Бонда	$N_g = (1 + \cos \beta) \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot b_r^2 / \sigma;$
σ , Н/м	$\sigma = 0,05293$	коэффициент поверхностного натяжения
$\beta = 90^\circ$	90°	угол наклона испарителя
$\bar{m} = 1.1$	1.1	параметр, учитывающий избыток жидкости

Продолжение таблицы Г.1

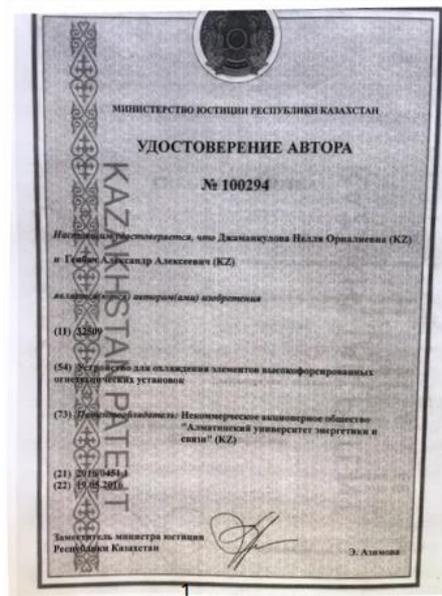
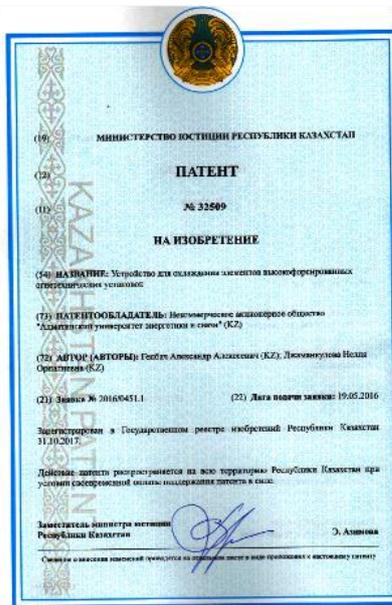
1	2	3
$G_{ж}$, кг/м ² с		$G_{ж} = \rho_{ж} \cdot w_{ж} = q_{и} \cdot F_{и} / (\varepsilon \cdot F_{\phi} \cdot r)$ удельный расход жидкости
$\rho_{ж}$ кг/м ³	934.58	плотность жидкости
$\cos 90^\circ = 0$	$N_a = (1 + \cos 90^\circ) \cdot 934.58 \cdot 9.81 \cdot (0.55 \cdot 10^{-3})^2 / 0.05293 = 0.0524$	
$q_{и}$ Вт/м ²	$6 \cdot 10^5$	тепловая нагрузка
$C_{рж}$ Дж/(кг·К)	4265	изобарная теплоемкость жидкости
$F_{и}$, м ²	0.942	поверхность испарителя
ε	$\varepsilon = 0.7$	пористость структуры
F_{ϕ} , м ²	$1,04 \cdot 10^{-3}$	площадь поперечного сечения фитиля $F_{\phi} = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$
r , Дж/кг;	$2164,1 \cdot 10^3$	теплота парообразования $r = 2164,1 \cdot 10^3$ Дж/кг;
$G_{ж}$ – удельный расход жидкости, $G_{ж} = \rho_{ж} \cdot w_{ж} = q_{и} \cdot F_{и} / (\varepsilon \cdot F_{\phi} \cdot r)$, кг/м ² с ,		
$G_{ж} = 6 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,942}{0,7 \cdot 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot 2164,1 \cdot 10^3} = 359 \text{ кг/м}^2\text{с}$		
$Pr_{ж}$		$Pr_{ж} = \nu_{ж} / a_{ж}$ - критерий Прандтля;
$\nu_{ж}$, м ² /с	$0,233 \cdot 10^{-6}$	коэффициент кинематической вязкости
$a_{ж}$, м ² /с	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$a_{ж} = \lambda_{ж} / (\rho_{ж} \cdot C_{рж}) = 0.683 / 934,58 \cdot 4265 = 1,7 \cdot 10^{-7}$ коэффициент температуропроводности жидкости
$\lambda_{ж}$, Вт/м К	0.683	Теплопроводность жидкости
$\rho_{ж}$, кг/м ³	934.58	плотность жидкости
$Pr_{ж}$	1,37	$Pr_{ж} = \nu_{ж} / a_{ж}$ - критерий Прандтля;
		$Pr_{ж} = 0.233 \cdot 10^{-6} / 1,7 \cdot 10^{-7} = 1.37$
$\lambda_{\text{эф}}, \lambda_{ж}$ – коэффициенты теплопроводности (эффективный и жидкости);		$\lambda_{\text{эф}} / \lambda_{ж} = 1 + (0,5 \cdot a' \cdot b_r + c)^{-1}$
$a' = 1,8 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$; $c = 0,73$		для латуни

Продолжение таблицы Г.1

1		2	3
$k_{ст}$ – коэффициент, учитывающий теплоаккумулирующую способность стенки		$k_{ст} = 1 + \left[\frac{(p \cdot C \cdot \lambda)_{ж}}{(p \cdot C \cdot \lambda)_{ст}} \right]^{0,5}$	
$p = 7,86 \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$ $C = 486$ Дж/кг · К; $\lambda = 16 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$		для стальной стенки (сетки) $k_{ст} = 1 + \left[\frac{(934,58 \cdot 4265 \cdot 0,683)_{ж}}{(7860 \cdot 486 \cdot 16)_{ст}} \right]^{0,5} = 1,21$	
N_p – критерий давления		$N_p = \sigma / (P_n \cdot b_r);$	
N_p	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$N_p = \frac{0,05293}{3 \cdot 10^5 \cdot 0,00055} = 3,2 \cdot 10^{-4}$ l	
Re_n		критерий Рейнольдса, $Re_n = b_r \cdot w_n / \nu_n,$	
$w_n, \text{ м/с}$		средняя скорость пара, $w_n = q_n / (r \cdot p_n)$	
$p_n, \text{ кг/м}^3$	1,7	p_n – плотность пара	
$\nu_n, \text{ м}^2/\text{с}$	$8,85 \cdot 10^{-6}$	кинематическая вязкость пара, $\nu_n = 8,85 \cdot 10^{-6}$	
		$w_n = 600000 / (2164100 \cdot 1,7) = 0,0024 \text{ м/с};$	
$Re_n = b_r \cdot w_n / \nu_n,$	0,15	$Re_n = 0,00055 \cdot \frac{0,0024}{8,85} \cdot 10^{-6} = 0,15$	
$a_n = q_n / (t_{ст} - t_n)$, Вт/м ² · К		$a_n = q_n / (t_{ст} - t_n) = 600000 / 10 = 6 \cdot 10^4$	
St'_n число Стантона	0,039	$St'_n = a_n / (G_{ж} \cdot C_{pж}),$	
$\alpha_n \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	6124,5	$\alpha_n = St'_n \cdot G_{ж} \cdot C_{pж} = 0,039 \cdot 359 \cdot 4265 = 59714,265 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ · коэффициент теплоотдачи	
$t_{ст.н}$ $t_{ст.н} = q_n / \alpha_n + t_n$	98°С.	температура стенки теплообменника $t_{ст.н} = \frac{q_n}{\alpha_n} = \frac{600000}{6124,5} = 98^\circ\text{С}.$	
t_n	228°С.		
Полученное значение температуры стенки удовлетворяет условиям надежной работы оборудования. Следовательно, структуру с такими геометрическими характеристиками следует принять.			

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Патент РК №32509. «Устройство для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок».



ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт внедрения в производство

АО «АЛМАТИНСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ» **ТЭЦ-1 имени Б.Оразбаева**



Для представления
в диссертационный совет

Акт внедрения

научных положений, новизны и идеи диссертации Джаманкуловой Н.О. на тему «Разработка и исследование пористого теплообменника для энергетических предприятий»

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Джаманкуловой Н.О. на тему: «Разработка и исследование пористого теплообменника для энергетических предприятий» обладают актуальностью, представляют практический интерес в области энергосбережения и энергоэффективности, а также экологической безопасности. К наиболее значимым результатам диссертационного исследования относятся:

1. Разработка и исследование высокофорсированного пористого теплообменника, предназначенного для охлаждения теплонагруженных элементов установок энергетических предприятий;
2. Создание модели процесса тепломассообмена на основе фундаментальных исследований капиллярно-пористых систем, работающих в поле массовых и гравитационных сил;
3. Разработка механизма тепломассообмена и инженерного расчета капиллярно-пористой системы охлаждения для теплонагруженных элементов теплообменных устройств (подогреватели, охладители и др.);
4. Получение уравнений для расчета тепловых потоков на основе интегральных и термодинамических характеристик кипения капиллярно-пористой системы и возможность управления теплопередачей;
5. Расчет теплообмена и гидравлического сопротивления в системе охлаждения капиллярно-пористого теплообменника;
6. Проведение аналогий в процессах разрушения капиллярно-пористых покрытий и металлических парогенерирующих поверхностей нагрева;
7. Разработка инженерного расчета капиллярно-пористого теплообменника для охлаждения теплонагруженных элементов и установок на энергетических предприятиях;

При решении вопроса финансирования, изготовления и выполнения монтажно-наладочных работ, возможно внедрение данной разработки на энергетических предприятиях, где основным оборудованием являются теплообменные устройства.

Управляющий директор ТЭЦ-1 им.Б.Оразбаева АО «АлЭС» _____ И.Сырғабас

Главный инженер ТЭЦ-1 им.Б.Оразбаева АО «АлЭС» _____ А.Ким

Начальник ПТО ТЭЦ-1 им.Б.Оразбаева АО «АлЭС» _____ А.Шахметов

