

АННОТАЦИЯ

диссертации, представленной на соискание ученой степени
доктора(PhD) по специальности «8D07102– Теплоэнергетика»

ДЖАМАНКУЛОВОЙ НЕЛЛИ ОРНАЛИЕВНЫ

Разработка и исследование пористого теплообменника для энергетических предприятий

Актуальность исследования

Детали и узлы металлургических установок особенно в плавильных агрегатах работают при высокой температуре и соответственно требуют интенсивного охлаждения.

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.

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,

Необходимость предупреждения перегрева и пережога сильно нагретых поверхностей стенок энергооборудования.

Вопросы разработки перспективных конструкций теплообменников с пористой структурой охлаждения являются актуальными.

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 тепломассопереноса 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 тепломассопереноса парообразованием;
4. исследование механизма процессов тепломассопереноса 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:

- 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);

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

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

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

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

5. 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;

6. Разработаны рекомендации и технические решения капиллярно-пористых систем охлаждения, защищённые патентом.

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.

Научные новизна, выносимая 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 , ΔT);
- обобщение 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, защищенные патентом, для высокотеплонагруженных парогенерирующих поверхностей на примере кессонов плавильных агрегатов.

Личный вклад соискателя заключается в обосновании актуальности работы, патентном поиске, экспериментальном обзоре 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 XXIIInd 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) МНиВО 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.

Во введении представлена актуальность исследовательской работы, конкретизирована исследуемая проблема. Показана основная идея, научная новизна, достоверность работы, а также апробация результатов и публикации.

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.

Вопросы разработки перспективных конструкций теплообменников с пористой структурой охлаждения являются актуальными. В этом случае может быть эффективна капиллярно-пористая система охлаждения, которая содержит малое количество жидкости, взрывобезопасна и обладает высокой форсировкой и интенсивностью теплообмена.

Таким образом, актуальность данной проблемы очевидна, необходима работа по исследованию, конструированию и внедрению более экономичных устройств, позволяющих интенсифицировать процессы. Целью исследования стала разработка теплообменного устройства на пористых элементах и исследование теплообмена парообразованием в пористых структурах при совместном действии капиллярных и массовых сил.

В главе I приведены результаты патентного поиска и

экспериментального обзора, подробно описан ряд существующих моделей.

Рассмотрены вопросы интенсификация теплообмена с помощью пористых элементов; различные подходы к механизму процесса парообразования; эффективные способы охлаждения поверхностей нагрева высокофорсированных установок; испарительное охлаждение металлургических печей. Для достижения цели исследования были поставлены следующие задачи:

1. исследование процессов тепломассообмена 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 тепломассообмена парообразованием;
4. исследование механизма процессов тепломассообмена парообразованием с помощью голографии и скоростной киносъемки;
5. расчет тепловых потоков и их управление с помощью термогидравлических характеристик кипения в сетчатых капиллярно- пористых структурах

Глава II посвящена аналитическому исследованию физической и математической моделей процесса парообразования (тепломассообмена, гидродинамики и прочности) в капиллярно-пористых структурах. Приведены и рассмотрены такие модели: модель процесса теплообмена при микрословом испарении; математическая и физическая модели процесса парообразования; модель зарождения паровых пузырьков; математическая модель процесса парообразования для условий предельного состояния поверхности теплообмена; механизм процесса парообразования в пористой структуре теплообменника. Модели, выбранные для работы, являются математически обоснованными.

В главе III приведено описание экспериментальной установки и их элементы для исследования тепломассообмена в капиллярно-пористых структурах. Проведено исследование процессов парообразования в пористых структурах, работающих с избытком жидкости. Описано устройство для охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок, выполненного на модели кессонов плавильных агрегатов, идея которого запатентована. Представлена методика проведения экспериментов, описание и характеристики измерительных приборов, основные уравнения для определения основных параметров, а также оценка погрешностей измерения.

В главе IV описан пористый теплообменник, который 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. Механизм теплообмена изучался с привлечением голографической интерференции и скоростной киносъемки.

Дано сравнение исследованной системы с тепловыми трубами и тонкопленочными испарителями. Применение сеток с крупными ячейками упрощает требования к охлаждающей жидкости.

В главе V 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. 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.

В главе VI приводится обобщение опытных данных позволяющее 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 построены физические модели и получать простые инженерные формулы для расчета отводимых тепловых потоков в зависимости от вида пористой структуры и геометрии парогенерирующей поверхности.

В главе VII рассмотрены области применения капиллярно-пористых теплообменников, перечислены устройства на пористых структурах, разработанные для повышения надежности и эффективности стационарных теплообменников с учетом экологии. Подробно описано применение капиллярно-пористых систем в металлургическом производстве. Проиллюстрированы капиллярно-пористые теплообменники для охлаждения плавильных агрегатов. Приведены результаты исследования влияния различных факторов на процессы тепломассообмена в различных капиллярно-пористых системах теплообменного оборудования

Показаны разработанные и исследованные 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.

В заключении отражены основные результаты и выводы по диссертационной работе о поставленных задачах исследования в поиске решений вопросов интенсификации охлаждения с применением капиллярно-пористых систем.

В приложениях приведены: критериальный расчет по теплообмену в капиллярно-пористой системе охлаждения; расчет погрешности измерений и планирование эксперимента; исследование и расчет высокофорсированного капиллярно-пористого теплообменника.