

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»



На правах рукописи

Аль-Джанаби Акрам Хамзах Абед

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВОДОВОЗДУШНОГО АЭРОЗОЛЯ**

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор,
ЩЕКЛЕИН Сергей Евгеньевич

Официальные оппоненты: **МОРОЗОВ Андрей Владимирович**, доктор технических наук, доцент, АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск Калужской обл., ведущий научный сотрудник лаборатории № 19 Отделения ядерной энергетики;

НАЗАРОВ Александр Дмитриевич, доктор технических наук, ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем энергосбережения;

КУПРЯЖКИН Анатолий Яковлевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры технической физики

Защита состоится «26» ноября 2020 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.03.04 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1593>

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. В настоящее время проблема охлаждения поверхностей теплообменных аппаратов воздушными потоками относится к одному из приоритетных направлений в энергетике, металлургии, химической технологии. В последнее время на АЭС и ТЭС стали находить все более широкое применение «сухие градирни», где тепло рассеивается путем конвективной теплопередачи через поверхность теплообмена без испарения жидкости в атмосферу. Это создает преимущества в сохранении водных ресурсов и особенно важно в маловодных регионах. Таким образом, сухая градирня становится привлекательной для использования в структуре АЭС и ТЭС вследствие отсутствия потребности в значительных водных ресурсах и связанного с переносом влаги в атмосферу «парникового эффекта».

Аналогичный принцип отвода теплоты используется на современных атомных электростанциях путем оснащения пассивными системами аварийного отвода тепла от оборудования (СПОТ) при возникновении аварийных ситуаций к конечному поглотителю (воздуху окружающей среды). При этом интенсивность отвода тепла к воздуху с наружной поверхности теплообменников, обеспечиваемая естественной конвекцией, чрезвычайно мала, что требует создания больших поверхностей теплообмена, применения различного рода интенсификаторов (рифление и оребрение поверхности, высотное размещение и пр.). Интенсивность отвода тепла в этих условиях в значительной степени зависит от температуры окружающего воздуха (располагаемого температурного напора). Высокая температура окружающей среды, особенно в летние дни, приводит к снижению мощности для электростанций, использующих системы сухого охлаждения, до 20-30%. Поэтому в странах с жарким климатом. (Иран, Бангладеш, Египет, Саудовская Аравия и пр.) предъявляют дополнительные требования к увеличению отвода теплоты в системах охлаждения.

Не менее важной является проблема отвода остаточного тепловыделения отработанных шаровых ТВЭЛ газоохлаждаемых реакторов (ВТГР). Однако исследование процессов теплообмена ТВЭЛ, особенно при возникновении общесистемных аварий и потере энергоактивных систем охлаждения, практически не изучено. Хотя к современным и перспективным АЭС предъявляется требование наличия систем пассивного отвода тепла к конечному поглотителю (атмосферному воздуху), не только от активных зон реакторов, но и от хранилищ отработанного ядерного топлива.

В этой связи разработка новых технологий охлаждения, более компактных и эффективных, способных работать при высокой температуре окружающего воздуха, является **актуальной** задачей для создания новых образцов техники, отвечает приоритетному направлению развития науки, технологий и техники РФ: п. 8 «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика».

Применение гибридного подхода к охлаждению теплообменных поверхностей с использованием увлажнения воздуха микрокапельным орошением (водяным туманом) значительно повышает эффективность воздушного теплообмена при минимальном количестве расходуемой воды.

Целесообразность использования водовоздушного аэрозольного охлаждения элементов современного энергетического оборудования можно объяснить тем, что данная технология обладает повышенной интенсивностью протекающих процессов теплообмена. Определяющими в данном случае процессами являются совместное воздействие конвективного теплообмена и тепломассообмена на охлаждаемой поверхности, вызванного испарением осаждающихся из водовоздушного потока капель воды.

Важным и вместе с тем малоизученным является вопрос о влиянии испарения капель в потоке и на нагретой поверхности на интенсивность процессов теплообмена в широком диапазоне плотностей орошения.

Отсутствие надежных экспериментальных данных по охлаждению элементов теплообменных устройств различной конфигурации в каналах с водовоздушным потоком затрудняет понимание происходящих процессов и не позволяет сформулировать надежные инженерные рекомендации для расчетов и проектирования подобных систем.

Объектом исследования являются система пассивного отвода тепла (СПОТ) и сухие градирни (СГ) на базе АЭС.

Предмет исследования – повышение безопасности и эффективности системы пассивного отвода тепла (СПОТ) и сухих градирен (СГ) на базе атомной электростанции.

Цель работы – исследование теплообменных и гидродинамических характеристик водовоздушного аэрозольного потока при взаимодействии с охлаждаемой поверхностью теплообменных установок в условиях вынужденного течения и естественной конвекции; получение критериальных зависимостей, содержащих основные теплофизические и режимные параметры, для проведения инженерных расчетов теплообменных установок с водовоздушными аэрозольными потоками; разработка методов расчета теплообменных процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышения надежности оборудования и систем.

Задачи исследования:

1. Разработка и создание экспериментального стенда для исследования вынужденного или свободного конвективного теплообмена и гидравлического сопротивления одиночного шарового элемента и рядов из шаровых элементов в среде водовоздушного аэрозольного потока.
2. Проведение экспериментальных исследований по гидродинамике и теплообмену перспективных энергетических аппаратов на примере взаимодействия с водовоздушным потоком отдельного шара и рядов шаровых элементов, а также цилиндрических элементов в каналах различной конфигурации.
3. Разработка и создание экспериментального стенда для исследования вынужденного нестационарного конвективного теплообмена между водовоздушным аэрозольным потоком и одиночным шаровым элементом.

4. Разработка экспериментального стенда для исследования вынужденного или свободного конвективного теплообмена и гидравлического сопротивления цилиндрических элементов (трубного пучка) с водовоздушным потоком.
5. Проведение численного анализа теплообмена и структуры течения при обтекании потоком воздуха в условиях вынужденной и естественной конвекции рядов из шаровых элементов, расположенных в цилиндрическом канале, с помощью программного комплекса ANSYS – FLUENT v.17.
6. Построение и анализ физической модели взаимодействия капель водовоздушного аэрозольного потока с нагретой шаровой и цилиндрической поверхностями в каналах.
7. Получение критериальных зависимостей, содержащих основные теплофизические и режимные параметры, для проведения инженерных расчетов теплообменных установок с водовоздушными аэрозольными потоками.

Научная новизна исследования:

1. Предложен и экспериментально исследован процесс теплоотдачи шаровых и цилиндрических элементов к водовоздушному аэрозольному потоку для различных значений интенсивности орошения, при которых достигается максимальный эффект интенсификации теплообмена.
2. Впервые разработана и научно обоснована физическая модель течения и осаждения капель воды на шаровую и цилиндрическую поверхность, которая позволяет оценить условия образования на ней пленки воды с тепломассообменной составляющей общего режима теплообмена с водовоздушным потоком.
3. Впервые установлено совместное влияние скорости набегающего водовоздушного потока и содержания капельной влаги в потоке на интенсивность теплообмена, как с шаровыми, так и цилиндрическими элементами в каналах.
4. Предложены новые эмпирические корреляции, обобщающие зависимости между критериями Нуссельта и режимными параметрами (число Рейнольдса, число Вебера и параметр фазового перехода воды в пар), определяющими процесс теплообмена в энергетических установках с охлаждением водовоздушным аэрозольным потоком.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в исследовании повышении эффективности процесса передачи теплоты в энергетических установках систем охлаждения АЭС за счет использования водовоздушного аэрозольного потока, образуемого путем подачи на охлаждающую поверхность влажного воздуха и мелких капель воды, что имеет существенное значение в области совершенствования энергоэффективности, энергосбережения и безопасности ядерной энергетики. Разработана новая физическая модель теплообмена элементов системы охлаждения установок к водовоздушному аэрозольному потоку, позволяющая оценить отдельные стадии процессов испарения капель и образования пленки воды на нагретой поверхности. Получены новые критериальные зависимости, содержащие основные

теплофизические и режимные параметры, позволяющие проводить инженерные расчеты теплообменных установок с водовоздушными аэрозольными потоками.

Методология и методы диссертационного исследования

Для достижения цели и решения поставленных задач исследования использовались основные теоретические положения конвективного теплообмена, тепломассообмена и теории теплового пограничного слоя. При проведении экспериментальных исследований привлекались методы стационарного и нестационарного теплообмена. Численное моделирование процессов теплообмена выполнено с помощью коммерческого программного обеспечения ANSYS FLUENT v.17. Результаты экспериментальных и расчетных исследований сравнивались с результатами, полученными другими авторами. Экспериментальные данные обрабатывались методом наименьших квадратов и представлялись в виде критериальных уравнений.

Личный вклад автора

Работа выполнена под научным руководством д-р техн. наук, проф. Щеклеина С.Е. Большая часть работы выполнена автором самостоятельно. Им проведен комплекс экспериментальных исследований, их обработка и анализ, разработка физической модели теплообмена и ее верификация, а также подготовка материалов к публикации. Все основные результаты, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, получены автором лично. Автор выражает благодарность д-ру техн. наук, ст.н.с. Пахалуеву В. М. за активную помощь в проведении задач и обработке результатов эксперимента.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты экспериментальных исследований по гидродинамике и теплообмену при вынужденной и естественной конвекции при обтекании шаровых элементов в цилиндрическом канале с водовоздушным потоком в условиях стационарного и нестационарного теплообмена.
2. Результаты экспериментального исследования гидродинамики и теплообмена цилиндрических элементов (трубного пучка) с водовоздушным потоком при вынужденной и естественной конвекции.
3. Критериальные зависимости коэффициентов интенсификации теплоотдачи к шаровым и цилиндрическим элементам в каналах с водовоздушными потоками в условиях вынужденной и естественной конвекции.
4. Физическая модель взаимодействия водовоздушного потока с нагретыми шаровыми и цилиндрическими поверхностями, а также условия оседания и испарения капель на поверхности
5. Результаты численного моделирования теплообмена и структуры течения при обтекании потоком воздуха рядов из шаровых элементов, расположенных в цилиндрическом канале.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием известных, зарекомендовавших себя методов расчета и эксперимента, проверенного программного обеспечения, а также сравнением полученных данных с экспериментальными данными других авторов.

Апробация результатов работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на девяти конференциях:

1. Международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение», г. Екатеринбург, 2017.
2. Международной научно-технической конференции «Энергетические системы», г. Белгород, 2018.
3. The International Conference «Information technologies in business and industry», Tomsk, 2018.
4. IV Международной конференции «Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур», г. Екатеринбург, 2018.
5. Международной научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение», г. Екатеринбург, 2018.
6. Международной научно-технической конференции «Энергетические системы», г. Белгород, 2019.
7. XXXV сибирском теплофизическом семинаре, посвящённом 75-летию профессора Виктора Ивановича Терехова, Новосибирск, 2019.
8. The International Conference «Information Technologies in Business and Industry», Tomsk, 2019.
9. The 4th International Symposium on Fluid Mechanics and Thermal Sciences, Malaysia, 2019.

Также они рассматривались на научных семинарах кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, в период с 2019 по 2020 гг.

Публикации. Основные результаты представлены в 20-ти публикациях, из них 11 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 10 статей опубликованы в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science; 9 тезисов в сборниках международных и российских научных конференций.

Диссертация была выполнена на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, основных выводов, списка сокращений и обозначений и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 188 страницах, включая 122 рисунка, 5 таблиц и 11 приложений. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена общая постановка проблемы, обоснована актуальность, указаны объект и предмет исследования. Сформулированы цель, основные задачи, представлена научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов и представлены основные защищаемые положения.

В первой главе проведен обзор литературных данных по завершенным на настоящее время работам, связанным с разработкой систем охлаждения энергетического оборудования АЭС. Даны общие технические характеристики, описание конструкции, принцип работы систем пассивного отвода тепла (СПОТ) и сухих градирен (СГ) на АЭС. Проанализированы преимущества и недостатки систем охлаждения оборудования, большинство из которых работает по принципу действия природных сил, таких как естественная циркуляция теплоносителя. Показано, что системы воздушного охлаждения оказываются менее эффективными по сравнению с другими. Это становится заметно в регионах с жарким засушливым либо субтропическим климатом, особенно в жаркие дни. Повышение температуры окружающей среды приводит к значительному снижению эффективности теплоотвода. Высокая температура атмосферного воздуха в жаркие дни приводит к уменьшению полезной мощности пассивных теплоотводящих систем с воздушным охлаждением вплоть до 20–50% от номинальной. На основании проведенного анализа состояния проблемы определены направления исследований и дана постановка задачи исследований. В работе предлагается использование гибридного подхода к охлаждению энергетического оборудования АЭС с использованием водовоздушного аэрозоля (водяного тумана). Главная идея состоит в том, чтобы впрыскивать небольшое количество микрокапель воды (аэрозоля) в охлаждающий поток воздуха для повышения эффективности охлаждения (снижения конечной температуры теплообменной поверхности).

Вторая глава посвящена описанию экспериментальных установок, разработанных для проведения исследований процессов теплообмена сферических и цилиндрических элементов в каналах с водовоздушным аэрозольным потоком, даны технические описания основных элементов и узлов экспериментальных установок, а так же методика проведения экспериментов и обработки результатов самого эксперимента. Экспериментальные установки предназначены для получения надежных данных по теплообмену в системах охлаждения водовоздушного аэрозольного потока в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 2.5 \cdot 10^3 \sim 5.5 \cdot 10^4$, чисел Рэлея $Ra = 1.8 \cdot 10^2 \sim 1.9 \cdot 10^5$ и в диапазоне орошения потока воздуха водой $j = 20.48 \sim 111.68$ кг/(м²·ч). Оборудование установок выбиралось таким образом, чтобы выдержать тепловой поток величиной $q = 279 \sim 12.831$ Вт/м² и нагрев элементов до 300°C.

На рисунке 1 представлена структурная схема экспериментальных установок, используемых в исследованиях различных объектов в рамках диссертационной

работы. Экспериментальные исследования состояли из двух этапов: на первом этапе были проведены исследования особенностей гидродинамики и теплообмена

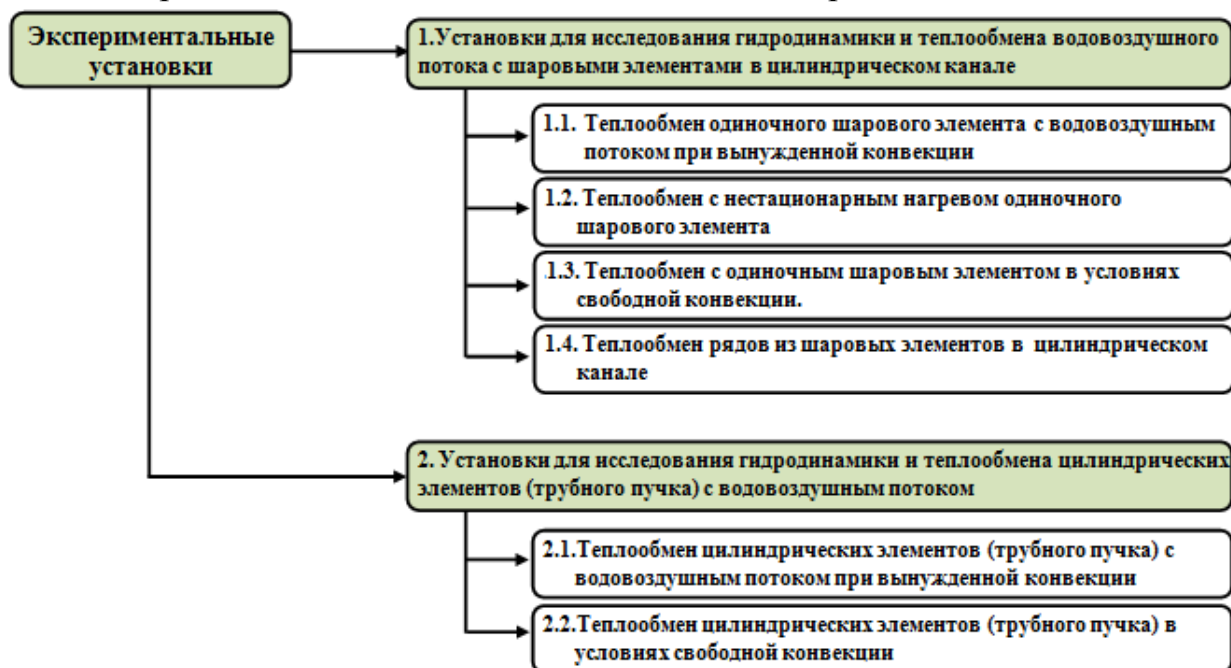


Рисунок 1. Экспериментальные установки, используемых в исследованиях

отдельного и рядов из шаровых элементов при взаимодействии с водовоздушным аэрозольным потоком при вынужденной и свободной конвекции в стационарном и нестационарном режиме теплообмена. На втором этапе проводилось изучение гидродинамики и теплообмена цилиндрических элементов (трубного пучка) в канале с водовоздушным потоком при вынужденной и свободной конвекции теплоносителя. В качестве источника водяного аэрозоля был использован ультра-

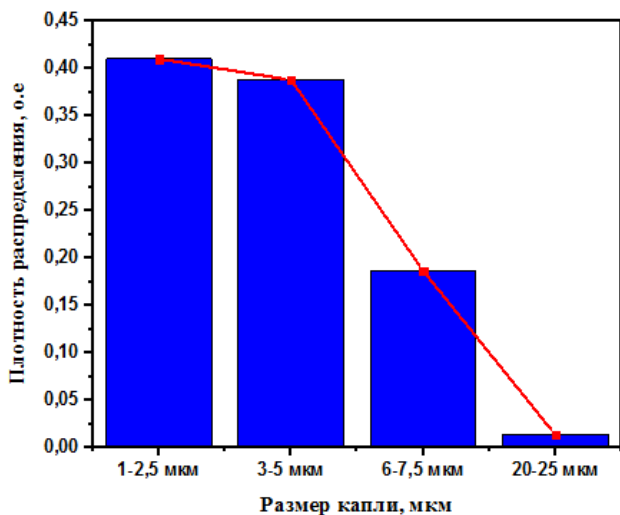


Рисунок 2. Плотность распределения капель по их размерам

звуковой генератор с излучением на частоте 1,7 МГц. Средний размер частиц образующего водяного аэрозоля из очищенной воды, рассчитанный по уравнению Ланга, составил 2,7 мкм. Размеры капель оценивались также экспериментально при помощи методики осаждения на масляной пленке с последующим микроскопическим фотографированием и обработкой с целью получения модального размера капель аэрозоля. Ориентировочный состав аэрозольного потока приведен на рисунке 2 в виде плотности распределения капель по их размерам.

Большая часть капель имела размеры менее 3-5 мкм, что близко к расчетным значениям.

В третьей главе приведён анализ численного моделирования теплообмена и структуры течения при обтекании потоком воздуха шаровых элементов.

Исследования проводились на основе решения трехмерного стационарного усредненного по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) с использованием закона сохранения массы, момента и энергии в декартовой системе координат. Рассматривался ряд из трех шаровых элементов, расположенных внутри вертикального цилиндрического канала, с постоянным отношением диаметра канала к диаметру шара 1.35. В качестве примера на рисунке 3 приведены результаты численного моделирования в виде линий тока при последовательном обтекании шаровых элементов воздушным потоком для минимального $Re = 2.5 \cdot 10^3$ и максимального $Re = 5.5 \cdot 10^4$ значений числа Рейнольдса.

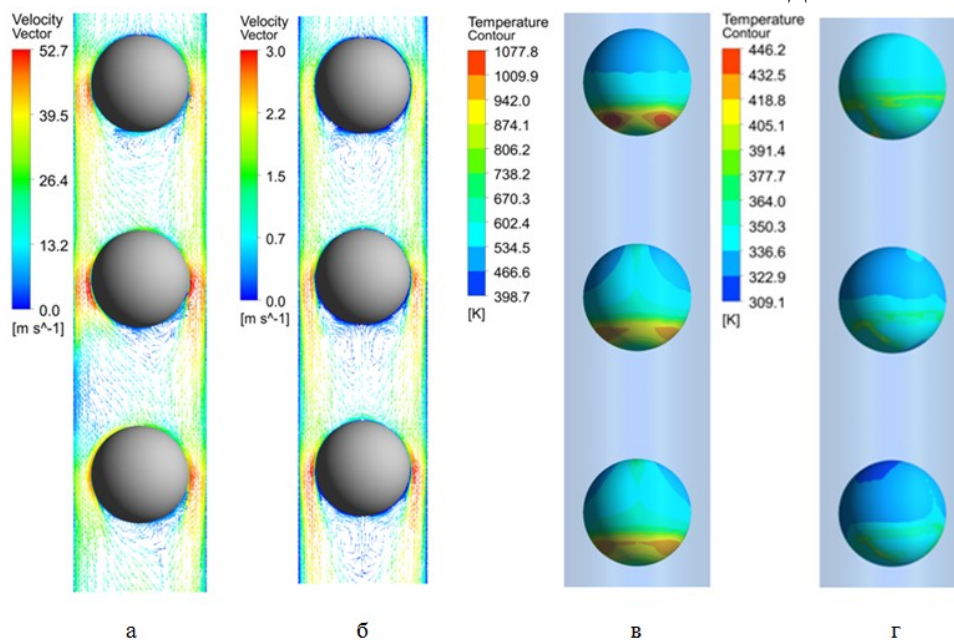


Рисунок 3. Схема обтекания шаровых элементов и соответствующее распределение температуры по поверхности: а и в – $Re = 2.5 \cdot 10^3$; б и г – $Re = 5.5 \cdot 10^4$.

Здесь же приведены значения распределения температуры на поверхности шаровых элементов, характеризующие соответствующую неравномерность локального теплообмена. Наличие ограничительных стенок канала и его значительная загроможденность шаровыми элементами ведет к образованию устойчивых вихревых зон, занимающих большую часть сечения канала. В узкой области между стенками канала и шаровой поверхностью скорость потока резко возрастает и остается в дальнейшем заметно выше вдоль стенок канала, в результате чего формируется пристенный кольцевой слой, взаимодействующий с застойными вихревыми зонами в пространстве между шарами. В случае присутствия в потоке частиц (твердых или капельных), движущихся со скоростью несущего потока воздуха, общая картина обтекания элементов несущим потоком сохраняется, но сопровождается осаждением частиц на обтекаемых поверхностях.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований по теплоотдаче отдельного шара и рядов из шаровых элементов с водовоздушным аэрозольным потоком в цилиндрическом канале, а также критериальные уравнения, обобщающие экспериментальные данные. **В разделе 1 главы 4** рассмотрена методика экспериментальных исследований. С целью были проведены исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления однофаза -

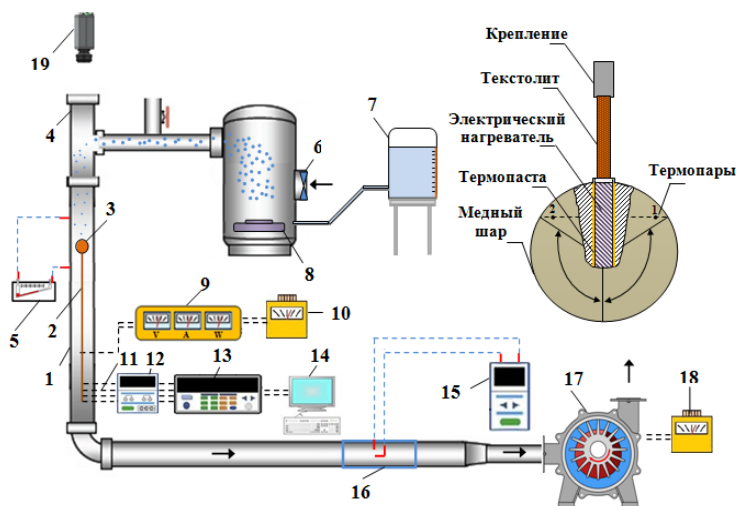


Рисунок 4. Схема экспериментального стенда.

- 1 - трубка из оргстекла; 2 - крепление;
- 3 - медный шар; 4 - камеры смешения;
- 5 - микроманометр; 6 - маломощный вентилятор;
- 7 - бак; 8 - ультразвуковой генератор аэрозоля;
- 9 - мультиметр; 10, 18 - регулятор напряжения;
- 11 - термопары; 12 - аналоговый модуль вывода;
- 13 - модуль сбора данных; 14 - компьютер;
- 15 - дифманометр; 16 - трубка Пито;
- 17 - воздуходувка (воздушный насос);
- 19 - тепловизор

увеличивается по мере возрастания интенсивности орошения воздуха водой при постоянном тепловом потоке на поверхности теплообмена. Результаты экспериментов также показали, что значения коэффициента гидравлического сопротивления для водовоздушного аэрозольного потока незначительно

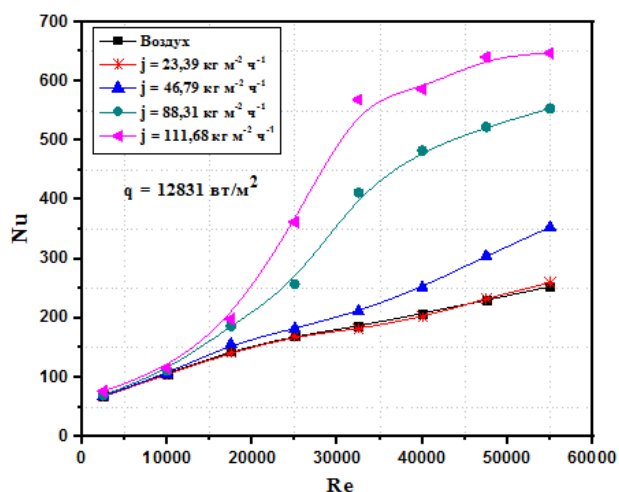


Рисунок 5. Изменение среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса при различной интенсивности орошения j

Для оценки интенсификации теплообмена введен коэффициент интенсификации (η) равный отношению коэффициента теплопередачи водовоздушного

зным воздушным потокам, что позволяет сделать вывод о работоспособности экспериментальной установки и достоверности полученных данных, а также получить базовые данные для сравнения с последующими результатами. В разделе 2 главы 4 представлены результаты исследований по гидродинамике и теплообмену одиночного шарового элемента. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 4. На рисунке 5 приведены результаты изменения среднего коэффициента теплоотдачи в виде зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса потока при различной интенсивности орошения (j). Данные по теплообмену показали, что в результате испарения капель воды число Нуссельта

увеличивается по мере возрастания интенсивности орошения воздуха водой при постоянном тепловом потоке на поверхности теплообмена. Результаты экспериментов также показали, что значения коэффициента гидравлического сопротивления для водовоздушного аэрозольного потока незначительно превышают соответствующие данные для однофазного воздушного потока (на 1.8-5.9%). Аппроксимация экспериментальных данных с привлечением расчетных параметров (Re , We , K) позволила получить обобщающую зависимость между критериями Нуссельта и режимными параметрами – числами Рейнольдса, Вебера $We = j^2 d_{ш} / (2\rho_{ж}\sigma)$, и параметром фазового перехода воды в пар $K = r / [C_{ж}(T_{п} - T_{ср})]$ в виде уравнения:

$$Nu = 2.59 Re^{0.66} We^{0.14} K^{0.152}; \quad (1)$$

аэрозольного потока к коэффициенту теплопередачи однофазного потока при постоянном числе Рейнольдса. Как следует из рисунка 6, имеется область оптимальной интенсификации теплообмена, определяемая соотношением

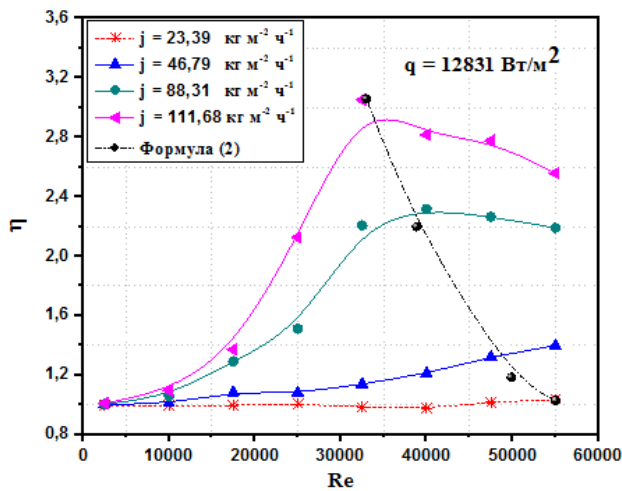


Рисунок 6. Положение оптимального коэффициента интенсификации теплообмена от числа Рейнольдса потока различной интенсивности орошения

механизмов испарения и осаждения жидкости на поверхности шара. Массовое влагосодержание аэрозоля в зоне оптимальных значений η находится в диапазоне от 0.3-0.6%. Зависимость оптимальных значений коэффициента интенсификации теплообмена $\eta = Nu_j / Nu_b$ от расхода воздуха (числа Re) и массового влагосодержания x при $d/D = \text{const}$ представлена уравнением (2), охватывающим диапазон чисел Рейнольдса от $3.2 \cdot 10^4$ до $5.5 \cdot 10^4$ с интенсивностью орошения потока воздуха водой от 23,39 до 111.68 кг/(м²·ч).

$$\eta_{\text{макс.}} = 1 + Re^{1.18} x^{2.2}; \quad x = \frac{jA_{\text{канал}}}{G_{\Sigma}}; \quad (2)$$

Где $A_{\text{канал.}}$ - внутренняя площадь цилиндрического канала. На основе проведенных исследований предложена **физическая модель** теплообмена шара с водовоздушным капельным потоком с осаждением капель на нагретую поверхность и их испарением с образованием паровоздушной среды вблизи поверхности шара (рисунок 7). Область начала испарения капель, движущихся со скоростью потока, располагается на некотором расстоянии от его поверхности. Размер области можно оценить как толщину теплового пограничного слоя (ТПС) $\delta_t = \lambda_{\text{ср}} / \alpha$. Принятые допущения в модели теплообмена позволяют записать условия

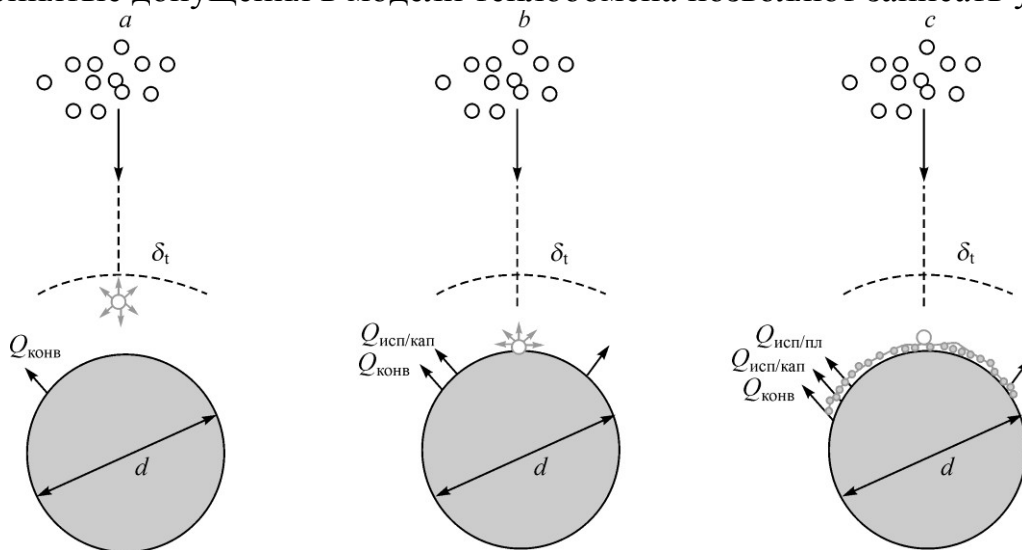


Рисунок 7. Механизм теплообмена шара с водовоздушным потоком. $l^* < \delta_t$ (a), $l^* = \delta_t$ (b), $l^* > \delta_t$ (c); $Q_{\text{конв}}$, $Q_{\text{исп/кап}}$ и $Q_{\text{исп/пл}}$ - конвективная, капельная и пленочная составляющие теплового потока с поверхности шара

взаимодействия капельного водовоздушного потока с нагретой поверхностью в виде толщины теплового пограничного слоя δ_t и длины пробега капли l^* со скоростью потока до момента ее испарения. Условие осаждения капель можно представить как:

$$l^*/\delta_t = U \cdot \frac{\alpha}{\lambda_{cp}} \cdot \frac{d_k^2 \cdot \rho_{жс} \cdot r}{4\lambda_{жс}(T_{II} - T_{cp})} \cdot \phi^{-1}; \quad (3)$$

где $\lambda_{жс}$ и $\rho_{жс}$ – коэффициент теплопроводности и плотность воды; r – теплота парообразования; Поправка Φ , учитывающая влияние испарения на теплообмен, практически не отличается от единицы для случая малости энтальпии пара по сравнению с теплотой парообразования. Расчеты для капель диаметром 2.7 мкм показали, что при $Re \geq 2 \cdot 10^4$ параметр $l^*/\delta_t \geq 1$, что можно считать началом осаждения и испарения капель непосредственно с поверхности шара и причиной резкого увеличения КТО. Для того чтобы оценить количество влаги, оседающей на поверхности шара, по отношению к первоначальному на входе в канал, можно воспользоваться уравнением теплового баланса с учетом догрева аэрозольных капель до температуры поверхности:

$$q = \alpha_{ка} \cdot (T_{II} - T_{cp}) \cdot (1 - n) + j \left[r + C_{жс} (T_{II} - T_{cp}) \right] \cdot n; \quad (4)$$

$$q = \alpha \cdot (T_{II} - T_{cp}); \quad (5)$$

где $\alpha_{ка}$ – конвективная составляющая КТО, α – общий КТО с водовоздушным потоком. Полученные экспериментальные данные позволяют оценить относительную массу капель, достигающих поверхности шара, прежде чем они испарятся в пограничном слое.

$$n_i = \left[1 - \left(\frac{\alpha_j}{\alpha_{ка}} \right)^{-1} \right] \cdot \frac{q_i}{0.5 \cdot j \cdot r \cdot \left[1 + \frac{C_{жс} (T_{II} - T_{cp})}{r} \right]}; \quad (6)$$

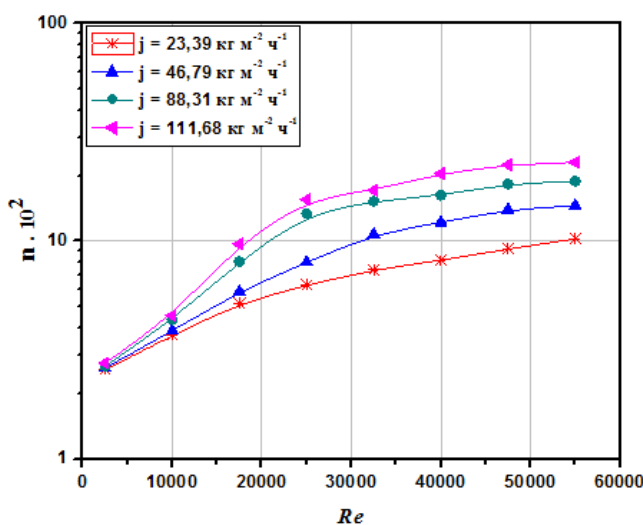


Рисунок 8. Относительная масса капель, оседающих на поверхность шара в зависимости от числа Re водовоздушного потока и плотности его орошения

где n определяет долю поверхности, занятую водяными каплями, или массу влаги, оседающей на теплообменной поверхности, по отношению к ее массе, содержащейся в набегающем водовоздушном потоке. На рисунке 8 приведены результаты расчета по осаждению капель на шаровую поверхность с использованием экспериментальных значений КТО. В разделе 3 главы 4 представлены результаты опытов с нестационарными режимами теплообмена, выполненных в целях исследования смены механизмов теплообмена на поверхности охлаждаемого шара от чисто

конвективного до пленочного в условиях взаимодействия с водовоздушным аэрозольным потоком. Исследования проводились с начальными температурами разогрева $T_{\text{ни}} = 100, 200$ и 300°C при различных числах Re . В качестве источника тепла была выбрана высокочастотная индукционная нагревательная станция с медной спиральной катушкой, обеспечивающей работу на частотах в диапазоне от 50 до 100 кГц.

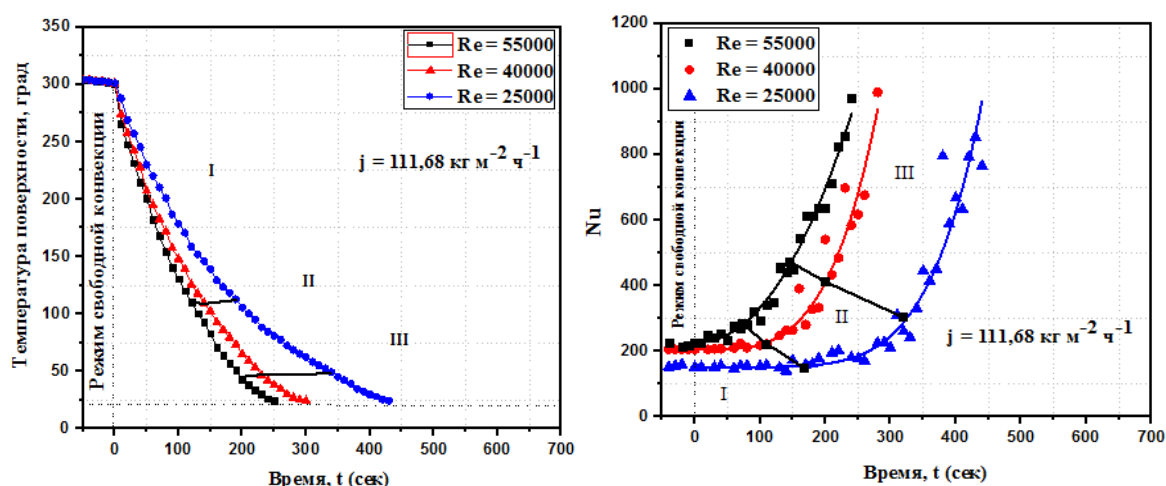


Рисунок 9. Изменение температуры шара и числа Нуссельта от времени охлаждения при различных числа Рейнольдса

Результаты экспериментов показали, что в процессе охлаждения шара различаются три участка: I – участок с чистой конвекцией; II – участок испарения капель воды; III – участок испарения плёнки воды (рисунок 9). На первом участке, когда температура шара достаточно высокая, капли воды не вступают в прямой контакт с нагретой поверхностью, а полностью испаряются вблизи поверхности шара в пределах теплового пограничного слоя. На втором участке происходит мгновенное испарение капель воды при их контакте с нагретой поверхностью. На этом этапе не происходит образования водяной плёнки из-за высокой температуры шара и высокой скорости обтекающего потока, уносящего частично испарившийся водяной аэрозоль, не давая ему накапливаться. Третий участок возникает после образования водяной плёнки из-за достаточно низкой температуры шара.

В разделе 4 главы 4 представлены результаты исследований теплообмена в условиях свободной конвекции. Исследования производились в двух вариантах: в первом случае шар размещался в неограниченном объёме (вне канала) с постоянной температурой среды 24°C ; во втором случае шар помещался в цилиндрический канал с отношением диаметра канала к диаметру шара D/d , равным 1.35. На рисунке 10 приведены значения чисел Нуссельта и коэффициента интенсификации теплообмена η с различными значениям j и диапазоном числа Релея от $0.4 \cdot 10^5$ до $1.89 \cdot 10^5$. Результаты экспериментов показали, что коэффициент интенсификации теплообмена $\eta = Nu_j / Nu_v$ больше в 1.4, 1.95, 2.29 и 2.56 раза, чем при воздушном охлаждении для соответствующих значений j .

$$\eta = 1 + Ra^{0,34} We^{0,5}; \quad (7)$$

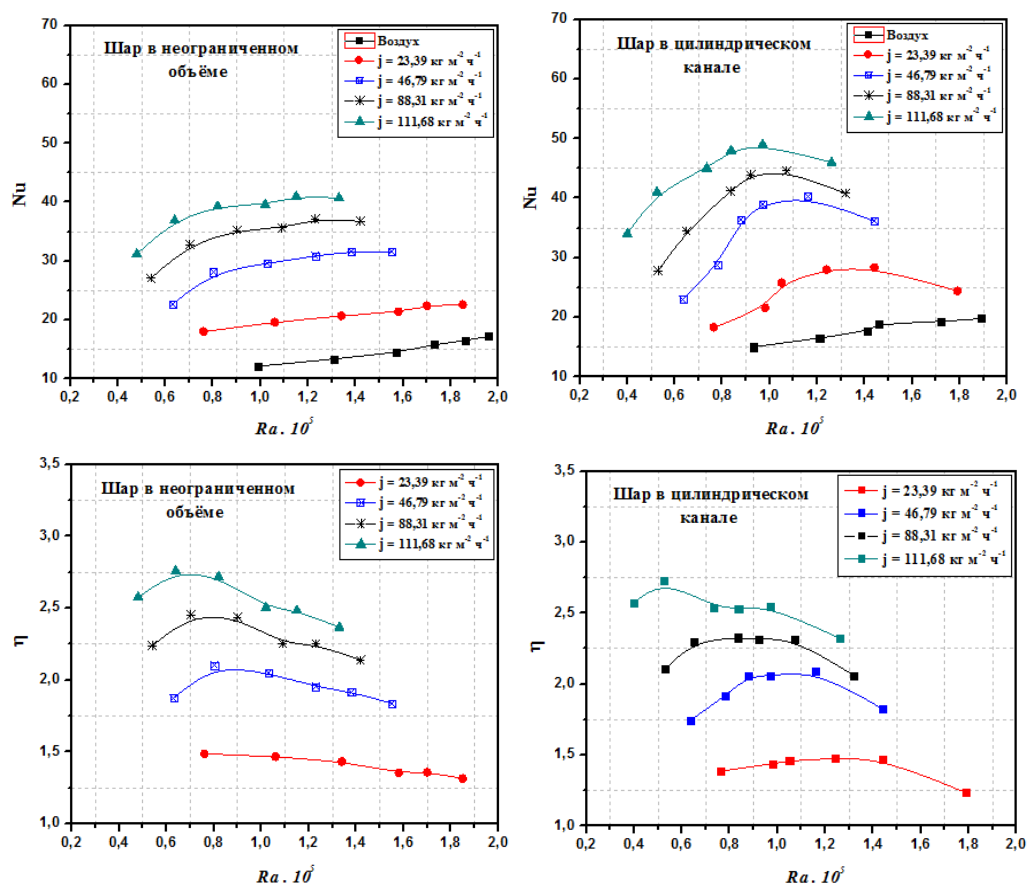


Рисунок 10. Изменение среднего числа Нуссельта от числа Рэлея при различных интенсивности орошения (j) шара в канале.

Полученные данные по интенсификации теплообмена обобщены степенной зависимостью (7).

В разделе 5 главы 4 представлено влияние на теплоотдачу места расположения шара-калориметра в канале. Три медных шара располагались в вертикальном цилиндрическом канале на расстоянии $2d_{ш}$ между собой. Максимальные значения коэффициента теплоотдачи соответствовали первому шаровому элементу, на поверхности которого оседала значительная часть

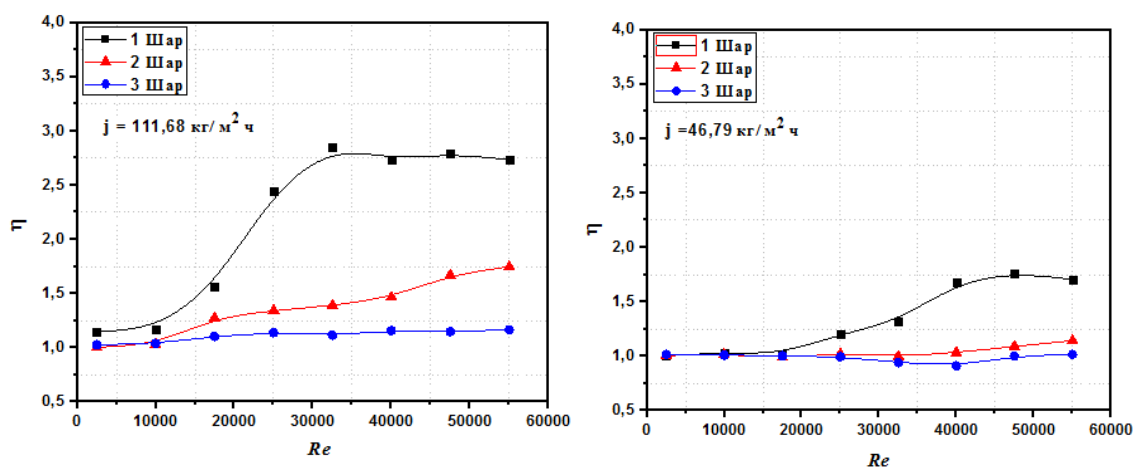


Рисунок 11. Зависимость коэффициента интенсификации теплообмена в рядах шаровых элементов от числа Рейнольдса при различной интенсивности орошения (j).

капельной влаги, содержащейся в набегающем на него водовоздушном потоке, что подтвердилось при дальнейшем анализе механизма осаждения капель. Влияние тепломассообменной составляющей КТО особенно явно проявляется при сравнении интенсивности теплообмена шаровых элементов в воздушных и водовоздушных потоках при одинаковых числах Рейнольдса. На рисунке 11 отчетливо видно резкое снижение тепломассообменной составляющей КТО для второго и третьего шаровых элементов, как при больших значениях плотности орошения $j = 111.68 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, так и при малом значении $j = 46.79 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Общей тенденцией процесса теплообмена системы из шаровых элементов является снижение КТО от первого элемента к последнему, причем для третьего элемента – до уровня теплообмена с воздушным потоком. Все это говорит о значительном уменьшении концентрации капельной влаги, оседающей на поверхности шаровых элементов по мере их обтекания в канале. Полученные данные по интенсификации теплообмена обобщены степенной зависимостью.

$$\eta = 1 + C_i \text{Re}^{1.31} \text{We}^{1.05}; \quad (8)$$

где значения коэффициентов C_i составляли $C_1 = 26.36$; $C_2 = 10.39$; $C_3 = 5.39$ для 1, 2 и 3 шара соответственно.

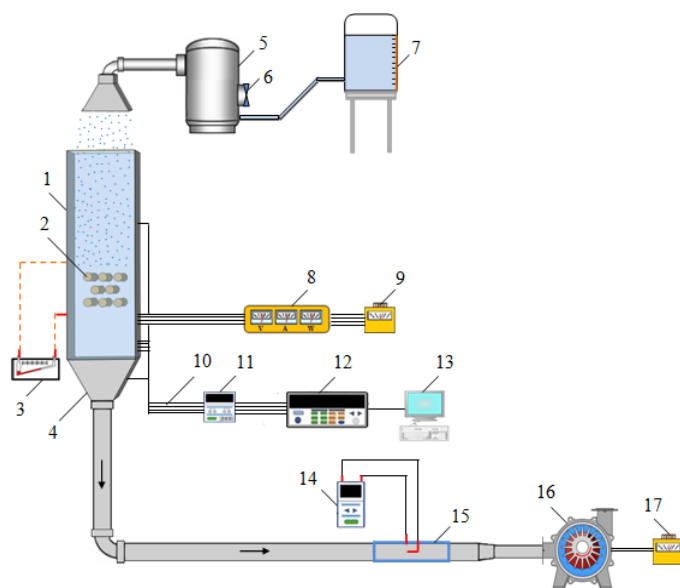


Рисунок 12. Схема экспериментальной установки для исследования теплообмена теплообменника с шахматным расположением трубок: 1–изолированный канал; 2–цилиндрические элементы; 3–наклонный манометр; 4–переходник; 5–ультразвуковой генератор аэрозоля; 6–маломощный вентилятор; 7–бак; 8–мультиметр; 9,17–регулятор напряжения; 10–термопары; 11–аналоговый модуль вывода; 12–модуль сбора данных; 13–компьютер; 14–дифманометр; 15–трубка Пито; 16–воздушный насос.

В главе 5 рассмотрена особенность гидродинамики и теплообмена пучка цилиндрических элементов с их шахматным расположением, помещенных в прямоугольный канал. **В разделе 1 главы 5** представлены результаты исследования теплообмена на экспериментальном стенде (рисунок 12) при значениях теплового потока $q = 5.3 \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2$, числах Рейнольдса $\text{Re} = 2.5 \cdot 10^3 \sim 1.25 \cdot 10^4$ и интенсивности орошения потока воздуха водой $j = 20.48 \sim 97.85 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Результаты экспериментов показали, что вследствие ускорения потока в узком сечении после первого ряда, теплоотдача второго ряда увеличивается за счёт возрастания тепломассообменной и конвективной составляющих теплообмена потока с поверхностью цилиндров. В этом случае интенсивность теплоотдачи

второго ряда с водовоздушным аэрозольным потоком заметно отличается от значений для первого ряда, что видно из сравнения экспериментальных данных на рисунке 13. Максимальные значения числа Nu приходятся на второй ряд цилиндрических элементов с интенсивностью теплоотдачи, заметно превышающей значения для первого ряда и в 1.1~2.5 раза выше соответствующих значений третьего ряда. Полученные данные по интенсификации теплообмена обобщены критериальной зависимостью

$$\eta = 1 + C_i Re^{1.19} We^{1.13}; \quad (9)$$

где значения коэффициентов C_i составляли $C_1 = 371.05$, $C_2 = 671.75$, $C_3 = 170.20$ для 1, 2 и 3 рядов соответственно. Можно предположить, что ряды из цилиндров в аэрозольном потоке создают своеобразный экранирующий эффект, связанный с

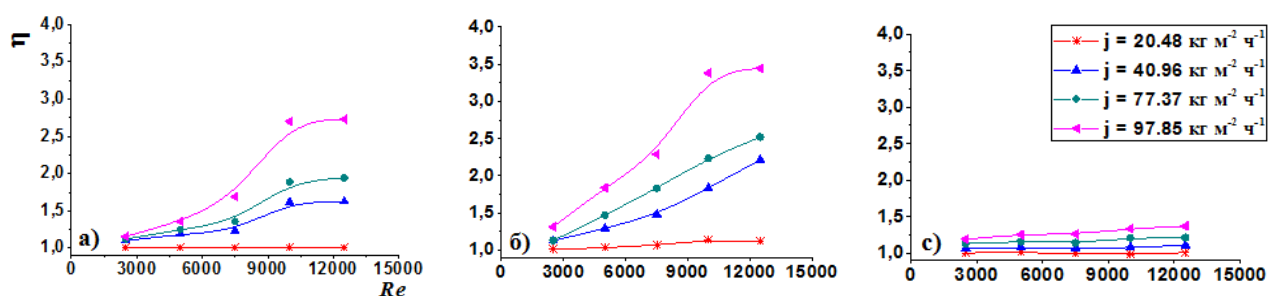


Рисунок 13. Изменение среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса при различной интенсивности орошения (j): а) Ряд - I; б) Ряд - II; в) Ряд - III.

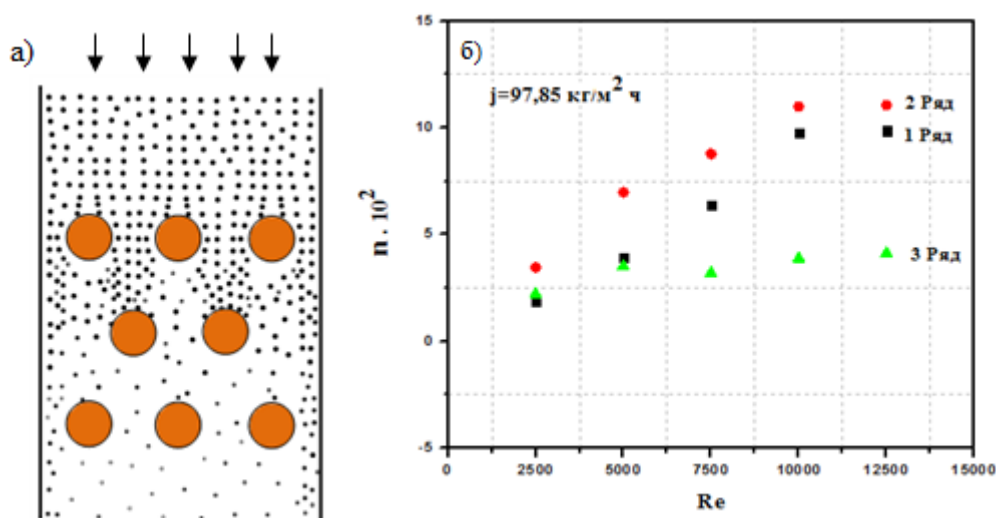


Рисунок 14. а) модель осаждения аэрозольных частиц на поверхность цилиндров; б) численное значение относительного количества капельной влаги, оседающей на 1,2 и 3-м ряду в зависимости от числа Re потока ($j = 97.85 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$).

уменьшением концентрации частиц непосредственно в вихревом следе за ними и увеличении их концентрации на периферии следа (рисунок 14а). Поэтому второй ряд цилиндров при их шахматной упаковке оказывается в зоне с повышенной концентрацией частиц, в результате чего создается эффект немонотонного изменения КТО цилиндров в направлении течения потока. Элементы 3-го ряда

оказываются в области паровоздушного потока с содержанием капельной влаги менее 2% от первоначального на входе в канал их КТО мало отличается от условий обдува потоком воздуха. На рисунке 14.б приведены численные значения параметра осаждения n_i , рассчитанные по формуле (6) для цилиндров каждого ряда, при условии, что капельная влага оседает и испаряется на верхней половине поверхности цилиндров.

В разделе 2 главы 5 представлены результаты исследований теплообмена пучка цилиндров в условиях свободной конвекции в диапазоне $j = 20.48 \sim 97.85$ кг/(м².ч), числах Релея в интервале $Ra = 1.8 \cdot 10^3 \sim 1.2 \cdot 10^4$. Число Nu в этих условиях носит не монотонный характер относительно числа Релея, как это видно из рисунка 15.

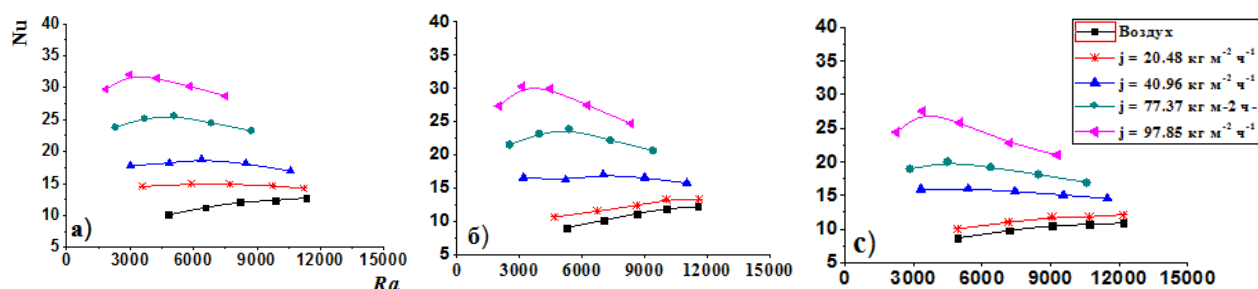


Рисунок 15. Изменение среднего числа Нуссельта от числа Релея при различной интенсивности орошения (j) : а) Ряд-I; б) Ряд-II; с) Ряд-III.

При этом интенсивность теплоотдачи достигает максимума при определённой разности температур цилиндра и набегающего потока ΔT (числа Ra). Максимальный коэффициент интенсификации теплообмена η возрастает в 2.7 раза на поверхности первого ряда при $j = 97.85$ кг/(м².ч), в то время как для второго и третьего рядов значения η возрастают в меньшей степени (в 2.6 и 2.4 раза при $j = 97.85$ кг/(м².ч)). Полученные данные по интенсификации теплообмена представлены обобщенной зависимостью (10) с погрешностью не превышающей 7.5%.

$$\eta = 1 + C_i Ra^{-0.79} We^{0.67}; \quad (10)$$

где значения коэффициентов C_i составляли $C_1 = 1.95 \cdot 10^7$, $C_2 = 1.91 \cdot 10^7$, $C_3 = 1.85 \cdot 10^7$ для 1, 2 и 3 рядов соответственно.

В главе 6 проведен анализ возможности практического использования полученных результатов исследований в технологии водовоздушного аэрозольного охлаждения оборудования на АЭС. В разделе 1 главы 6 рассмотрены возможности повышения эффективности системы аварийного расхолаживания САРХ-ВТО на примере реактора БН. Целесообразность применения охлаждения установок на АЭС водовоздушным потоком рассматривалась на основе существующих общих оценок эффективности применяемого воздушного оборудования. С этой целью проведен расчёт мощности системы аварийного расхолаживания САРХ-ВТО реактора на быстрых нейтронах БН воздушными теплообменниками. В результате были получены

данные располагаемой мощности теплообменника с водовоздушным аэрозольным потоком при интенсивности орошения и скорости потока воздуха с учетом влияния температуры атмосферного воздуха на тепловую мощность САРХ.

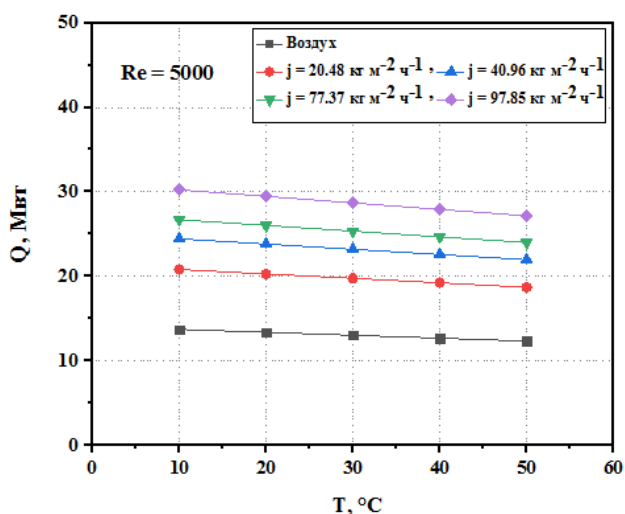


Рисунок 16. Зависимость тепловой мощности САРХ-ВТО от температуры окружающего воздуха.

Как видно из рисунка 16, значения отводимой мощности Q слабо зависят от внешних факторов, обеспечивают активный теплоотвод в широком диапазоне температур окружающей среды и в то же время в 2-2.8 раза превышают интенсивность теплоотвода при использовании воздушного охлаждения. Известно, что высокая температура окружающей среды, особенно в летние дни, приводит к снижению мощности электростанций, использующих системы воздушного охлаждения, до 20-30%. Поэтому в странах с высокими температурами окружающей среды (Иран, Бангладеш,

Египет, Саудовская Аравия и пр.) предъявляют дополнительные требования к увеличению отвода теплоты в системах охлаждения. Предлагаемая технология водовоздушного охлаждения является эффективным решением этой проблемы. В разделе 2 главы 6 представлены результаты расчетов повышения эффективности системы охлаждения оборотной воды на примере модели сухих градирен АЭС. Предлагаемая гибридная система охлаждения с естественной тягой сочетает в себе преимущества как мокрой, так и сухой систем охлаждения и является компромиссным решением при недостаточном или нестабильном источнике охлаждающей воды. Результаты расчётов показали, что среднее количество отводимой теплоты в случае охлаждения водовоздушным аэрозольным потоком в

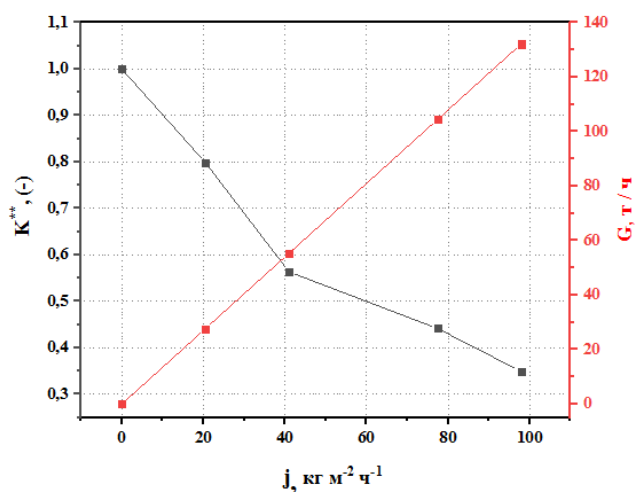


Рисунок 17. Изменение относительной площади поверхности теплообмена градирни $K^{**} = A_j / A_v$ и расхода воды от интенсивности орошения

2 раза больше, чем при обдуве воздушным потоком в условиях постоянной температуры окружающей среды. Положительным моментом использования водовоздушного охлаждения градирен, несомненно, является значительное снижение площади теплоотдающей поверхности и, следовательно, габаритов установки, что можно видеть из рисунка 17. Необходимая площадь поверхности теплообмена значительно уменьшается с увеличением интенсивности орошения, что ведет к значительному снижению размеров и веса

теплообменных модулей, способных работать при повышенной температуре окружающего воздуха. В разделе 3 главы 6 рассмотрена возможность интенсификации систем охлаждения отработанного ядерного топлива при его переработке и хранении. Среднее количество теплоты, снимаемое водовоздушной аэрозольной средой в 2 - 3.5 раза больше, чем при использовании воздушной среды с естественной циркуляцией. Вследствие испарения капель воды температура поверхности снижается по мере увеличения интенсивности орошения воздуха водой, что приводит к уменьшению промежутка времени охлаждения корзины в 1.5-4 раза по сравнению с охлаждением одним воздухом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общим итогом диссертационной работы являются научно-обоснованные технические решения, способствующие повышению эффективности работы систем охлаждения энергетических аппаратов при использовании водовоздушного потока, получаемого путем впрыскивания небольшого количества микрокапель воды (аэрозоля) в поток воздуха. Предлагаемые технические решения могут быть использованы для повышения эффективности работы системы пассивного отвода тепла СПОТ и сухих градирен СГ на базе АЭС, работающих в условиях жаркого и сухого климата. Помимо АЭС и ТЭС предлагаемая технология охлаждения может найти так же применение на других промышленных объектах с теплообменными установками, использующими системы воздушного охлаждения.

В результате выполненной работы получены следующие результаты:

1. Проведены исследования и анализ особенностей гидродинамики и теплообмена при взаимодействии с водовоздушным потоком отдельного и рядов из шаровых элементов, а также цилиндрических элементов в каналах различной конфигурацией в условиях вынужденной и естественной конвекции потоков при стационарном и нестационарном режимах теплообмена.
2. Установлено совместное влияние скорости набегающего водовоздушного потока и содержания капельной влаги в потоке на интенсивность теплообмена как с шаровыми, так и цилиндрическими элементами в каналах в диапазоне $2.5 \cdot 10^3 \leq Re < 1.25 \cdot 10^3$ и $20.48 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) \leq j \leq 111.68 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ причем с ростом числа Re влияние степени орошения потока на теплообмен значительно возрастает.
3. Теплообмен шаровых элементов, последовательно расположенных внутри цилиндрического канала, характеризуется значительной неравномерностью в направлении их обтекания. Коэффициент теплоотдачи первого элемента в 1.3-1.8 раза выше, чем второго и третьего элементов, что связано с экранирующим эффектом первого элемента, определяющим последующий характер течения и особенности данной системы охлаждения.
4. Максимальные значения коэффициента теплоотдачи цилиндрических элементов в прямоугольном канале, расположенных в шахматном порядке, соответствуют второму ряду в направлении натекающего водовоздушного потока. В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса, средний коэффициент

теплоотдачи в 1.12, 1.7 и 2.9 раза выше, чем в потоке воздуха для первого, второго и третьего ряда при максимальной интенсивности орошения. Поэтому при охлаждении водовоздушным аэрозольным потоком в условиях вынужденного течения предполагается сделать промежуточный теплообменник с малорядными конструкциями.

5. Проанализировано влияние впрыска микро-капель воды в поток воздуха (в воздушной среде), создаваемый при естественной конвекции нагретыми шаровыми и цилиндрическими элементами в каналах, коэффициент теплоотдачи в этом случае в 1.5-2.7 раза выше, чем при охлаждении воздушной средой в зависимости от температуры поверхности элементов и количества впрыскиваемой в поток воды.
6. Разработанная физическая модель течения и осаждения капель воды на шаровую и цилиндрическую поверхности позволила оценить условия образования на ней пленки воды и долю тепломассообменной составляющей в общем значении коэффициента теплоотдачи.
7. Коэффициент гидравлического сопротивления водовоздушного аэрозольного потока в каналах с охлаждаемыми элементами незначительно превышает соответствующий параметр при однофазном течении воздушного потока (до 6%) для всего диапазона интенсивностей орошения воздуха водой, что говорит о высокой теплогидравлической эффективности аэрозольного охлаждения.
8. Полученные критериальные уравнения теплообмена можно рекомендовать к использованию в инженерных расчетах в установках систем охлаждения с шаровыми и цилиндрическими элементами (трубные пучки) при использовании водовоздушного аэрозольного потока в качестве охлаждающей среды.
9. Проведенные расчёты технологических процессов в объектах ядерной техники с водовоздушным аэрозольным потоком показали, что предлагаемая гибридная система охлаждения приводит к:
 - повышению отводимой мощности системы аварийного расхолаживания САРХ-ВТО реактора на быстрых нейтронах в 2-2.8 раза по сравнению с охлаждением воздухом в широком диапазоне температур окружающей среды;
 - повышению эффективности системы охлаждения оборотной воды на примере модели сухих градирен АЭС в 2 раза, чем при обдуве воздушным потоком в условиях постоянной температуры окружающей среды;
 - уменьшению промежутка времени охлаждения корзины отработанного ядерного топлива в 1.5 раза по сравнению с охлаждением одним воздухом.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях,
определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:*

1. **Abed A. H.** Heat transfer of a spherical element with air-water aerosol in a cylindrical channel / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // Thermophysics

and Aeromechanics. – 2020. – V.27, №. 1. – P. 105-115, 0.69 п.л / 0.23 п.л. (WOS, Scopus).

2. Abed A. H. Experimental Investigation In Improving Thermal Performance Of Passive Heat Removal System Using Mist Assisted Evaporative Cooling / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. –2020. – V.69, №.1. – P. 98-109, 0.75 п.л / 0.52 п.л. (Scopus)

3. Abed A. H. Numerical and Experimental Investigation of heat transfer and flow structures around three heated spheres in tandem arrangement / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 791. – P. 012002, 0.5 п.л / 0.3 п.л. (Scopus)

4. Abed A. H. An experimental investigation on the transient heat transfer characteristics using air/water droplets two-phase flow / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – V. 791. – P. 012001, 0.5 п.л / 0.3 п.л. (Scopus).

5. Abed A. H. Heat transfer intensification in emergency cooling heat exchanger of nuclear power plant using air-water mist flow /A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika. – 2019. – V.3. – P. 16-27, 0.45 п.л / 0.15 п.л. (Scopus).

6. Абед А.Х. Водовоздушное аэрозольное охлаждение рядов из цилиндрических элементов в прямоугольном канале / А.Х. Абед, С.Е. Щеклеин, В.М. Пахалуев // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2019. – №. 28-33. – P. 63-72, 0.63 п.л / 0.21 п.л.

7. Abed A. H. Numerical simulation and experimental investigation of heat transfer and flow structures around heated spherical bluff bodies / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V.1333. – P. 032002, 0.37 п.л / 0.27 п.л. (Scopus)

8. Abed A. H. On the possibility to improve heat transfer of a sphere by natural convection and water mist / A. H. Abed, V. Klimova, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V.1382. – P. 012124, 0.45 п.л / 0.15 п.л. (Scopus)

9. Abed A. H. Investigation of heat transfer coefficient of spherical element using infrared thermography (IR) and gas - water droplets (mist) as working medium / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – V. 481. – P. 012033, 0.45 п.л / 0.15 п.л. (WOS, Scopus)

10. Abed A. H. Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer of sphere cooling using air/water mist two phase flow / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. –2019. – V. 552. – P. 012001, 0.6 п.л / 0.36 п.л. (Scopus)

11. Abed A. H. Investigation of hydrodynamic characteristics of laminar flow condition around sphere using PIV system / A. H. Abed, S. E. Shcheklein // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1015. – P. 032001, 0.6 п.л / 0.36 п.л. (WOS, Scopus)

Публикации в других научных изданиях:

- 12. Abed A. H.** Experimental investigation of hydrodynamics and heat transfer characteristics of two-phase gas/liquid mist flow in a tandem arrangement of heated spheres / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. –2019. – V.19, № 2. – Р. 14-21; 0.5 п.л / 0.3 п.л.
- 13. Абед А.Х.** О возможности интенсификации теплоотдачи сферы при естественной конвекции тумана / А.Х. Абед, В. А. Климова, С. Е. Щеклеин // Тр. конф. «Сибирский теплофизический семинар, посвящённый 75-летию Заслуженного деятеля науки РФ Терехова Виктора Ивановича», 2019. – С. 194, 0.06 п.л / 0.02 п.л.
- 14. Абед, А.Х.** Heat transfer intensification of emergency cooling heat exchanger of nuclear power plant using air - water mist flow / А.Х. Абед, S. E. Shcheklein С.Е., V. M. Pakhaluev // Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». – 2018. – С. 85-86, 0.13 п.л / 0.07 п.л.
- 15. Абед, А.Х.** Особенности теплообмена моделей шаровых тепловыделяющих элементов в потоке газа при многорядном расположении / А.Х. Абед, В. А. Климова, С. Е. Щеклеин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 60-64, 0.25 п.л / 0.17 п.л.
- 16. Абед, А.Х.** Экспериментальная установка для исследования теплообмена шарового элемента, расположенного в цилиндрическом канале / А.Х. Абед, С. Е. Щеклеин, А. М. Балдин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 56-59, 0.25 п.л. / 0.17 п.л.
- 17. Абед, А.Х.** О возможности использования инфракрасной термографии для неинвазивного измерения распределения температуры поверхности шарового элемента / А.Х. Абед, С. Е. Щеклеин, А. М. Балдин // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.). – Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 35-38, 0.25 п.л. / 0.17 п.л.
- 18. Абед, А.Х.** Свободно-конвективное охлаждение тепловыделяющей сферы расположенной в цилиндрическом канале / А.Х. Абед, С. Е. Щеклеин, А. М.

Балдин// Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 10–14 декабря 2018 г.). — Екатеринбург: УрФУ, 2018. – С. 39-42, 0.25 п.л. / 0.17 п.л.

19. Щеклеин С.Е. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при охлаждении сферы с использованием потока воздушно-водяного тумана / С.Е. Щеклеин, В.М. Пахалуев, **А.Х. Абед** // 3-я Международная научно-техническая конференция «Энергетические системы»: Сб. трудов. – Белгород, 2018. – С. 52-58, 0.45 п.л. / 0.27 п.л.

20. Abed A. H. Experimental investigation of hydrodynamics flow characteristics around a sphere using particle image velocimetry (PIV) / A. H. Abed, S. E. Shcheklein, A. D. Nikitin // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н. И. (1945–2015) – Даниловских чтений (Екатеринбург, 11–15 декабря 2017 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 664-667, 0.25 п.л. / 0.17 п.л.