



ФЭИ  
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «НАУКА И ИННОВАЦИИ»

**Акционерное общество  
«Государственный научный центр  
Российской Федерации –  
Физико-энергетический институт  
имени А.И. Лейпунского»  
(АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»)**

пл. Бондаренко, д. 1, г. Обнинск,  
Калужская область, 249033  
Телефон (484) 399-82-49, факс (484) 395-85-45  
E-mail: [postbox@ipre.ru](mailto:postbox@ipre.ru)  
ОКПО 08624390, ОГРН 1154025000590  
ИНН 4025442583, КПП 402501001

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

Ученому секретарю диссертационного  
совета УрФУ 05.03.04  
Ташлыкову Олегу Леонидовичу  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

### **Отзыв**

официального оппонента, доктора технических наук

Морозова Андрея Владимировича на диссертацию

Аль-Джанابي Акрама Хамзаха Абеда «Интенсификация теплообмена  
энергетического оборудования АЭС с использованием водовоздушного аэрозоля»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая  
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Диссертационная работа А.Х. Абеда посвящена исследованию  
теплообменных и гидродинамических характеристик водо-воздушного  
аэрозольного потока при взаимодействии с охлаждаемой поверхностью  
теплообменных установок в условиях вынужденного течения и естественной  
конвекции для повышения эффективности систем пассивного отвода тепла и  
сухих градирен, применяемых на атомных электростанциях.

Актуальность темы диссертационной работы следует из необходимости  
разработки и обоснования дополнительных путей повышения безопасности  
атомных станций с водо-водяными реакторами. В рамках решения поставленной  
задачи диссертантом проведено расчетное и экспериментальное исследование

Вх. №05-19/1-318  
от 10.11.20г.

теплообменных и гидродинамических характеристик водо-воздушного аэрозольного потока при взаимодействии с теплообменной поверхностью, получены критериальные зависимости, содержащие основные теплофизические и режимные параметры для проведения инженерных расчетов теплообменных установок с водо-воздушными аэрозольными потоками, разработаны методы расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышения надежности оборудования и систем.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений, библиографического списка, одиннадцати приложений и содержит 188 страниц.

### **Содержание диссертационной работы**

Во **введении** обоснована актуальность проведенных в диссертации исследований, сформулированы цели и задачи работы, изложены вопросы достоверности и обоснованности полученных результатов. Также сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, положения и результаты, выносимые на защиту. Представлены данные по апробации диссертационной работы и личному вкладу соискателя.

**Первая глава** посвящена обзору литературных данных по 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 на АЭС. Проанализированы преимущества и недостатки систем охлаждения, большинство из которых работает на пассивном принципе действия, таком как естественная циркуляция теплоносителя. Показано, что системы воздушного охлаждения оказываются менее эффективными по сравнению с водоохлаждаемыми. Это наиболее наглядно проявляется в регионах с засушливым, либо субтропическим климатом, особенно в жаркие дни. Определены методологическая основа, направление и цель исследования, результаты которого представлены в диссертационной работе.

Во **второй главе** приводится описание экспериментальных установок, разработанных для проведения исследований процессов теплообмена от сферических и цилиндрических элементов в каналах с водо-воздушным аэрозольным потоком, даны технические описания основных элементов и узлов стендов, а также методика обработки результатов экспериментов. Экспериментальные установки предназначены для получения данных по теплообмену в системах охлаждения с помощью водо-воздушного аэрозольного потока. Программа исследований включала в себя два этапа: на первом были изучены особенности гидродинамики и теплообмена от шаровых элементов при взаимодействии с водо-воздушным аэрозольным потоком при вынужденной и свободной конвекции в стационарном и нестационарном режимах теплообмена. На втором этапе проводилось изучение гидродинамики и теплообмена от цилиндрических элементов (модели трубного пучка) в канале с водо-воздушным потоком при вынужденной и свободной конвекции теплоносителя. В качестве источника водяного аэрозоля был использован ультразвуковой генератор с излучением на частоте 1,7 МГц.

В **третьей главе** работы проведено численное моделирование процессов теплообмена и гидродинамической структуры течения при обтекании потоком воздуха шаровых элементов. Исследования проводились на основе решения трехмерного стационарного уравнения Навье-Стокса с использованием законов 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 равным 1,35. В результате проведения расчетов были определены параметры распределения температуры поверхности шаровых элементов, характеризующие соответствующую неравномерность локального теплообмена.

В **четвертой главе** приводятся результаты экспериментального исследования процесса теплоотдачи от шаровых элементов к водо-воздушному аэрозольному потоку в цилиндрическом канале, а также представлены

критериальные зависимости, обобщающие полученные экспериментальные данные.

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. Также было установлено, что значения коэффициентов гидравлического сопротивления для водо-воздушного аэрозольного потока незначительно превышают соответствующие величины для однофазного воздушного потока (на 1,8-5,9%).

На основе проведенных исследований предложена физическая модель процесса теплообмена от шара к водо-воздушному капельному потоку с осаждением капель на нагретой поверхности и их испарением с образованием паровоздушной среды вблизи поверхности шара.

Представлены результаты экспериментов с нестационарными режимами теплообмена, выполненных для исследования смены механизмов передачи тепла на поверхности охлаждаемого шара от конвективного до пленочного в условиях взаимодействия с водо-воздушным аэрозольным потоком. В результате проведенного анализа было установлено, что влияние тепломассообменной составляющей на коэффициент теплообмена особенно явно проявляется при сравнении интенсивности процессов передачи тепла от шаровых элементов в воздушных и водо-воздушных потоках при равных числах Рейнольдса.

В **пятой главе** рассмотрены особенности гидродинамики и теплообмена при охлаждении пучка цилиндрических элементов с шахматным расположением, помещенных в прямоугольный канал. В ходе экспериментов было установлено, что применение для их охлаждения водо-воздушного аэрозольного потока позволяет увеличить в 1,5-3,5 раза интенсивность теплообмена по сравнению с охлаждением воздухом при незначительном росте гидравлического сопротивления.

Предложена физическая модель процесса отвода тепла от цилиндрических элементов с помощью водо-воздушного потока и получено критериальное уравнение, описывающее исследуемые процессы.

В **шестой главе** рассмотрена возможность практического использования полученных результатов исследований для охлаждения оборудования АЭС.

В частности, рассмотрена возможность повышения эффективности системы аварийного расхолаживания (САРХ) реактора на быстрых нейтронах за счет использования аэрозольного водо-воздушного потока.

Для этого был проведен расчёт мощности системы аварийного расхолаживания реактора БН воздушными теплообменниками. Результаты расчёта показали, что среднее количество теплоты, снимаемое водо-воздушным аэрозольным потоком, в 2–3,5 раза больше, чем при использовании воздушного потока. Таким образом, было продемонстрировано, что впрыск микро-капель воды в воздушный поток, поступающий на вход в теплообменник САРХ, обеспечивает значительную интенсификацию теплообмена при незначительном потреблении воды. В то же время это приводит к уменьшению размеров и веса теплообменных модулей, способных обеспечивать необходимую мощность при повышенной температуре окружающего воздуха.

Также была проведена оценка повышения эффективности системы охлаждения оборотной воды с использованием сухих градирен на АЭС. Предлагаемая гибридная система охлаждения на естественной циркуляции сочетает в себе преимущества мокрой и сухой систем охлаждения и является компромиссным решением при недостаточном или нестабильном источнике охлаждающей воды. Это особенно актуально для стран с высокими среднегодовыми температурами воздуха, в которых ведется сооружение АЭС по российским проектам (Индия, Иран, Бангладеш, Египет и др.). Результаты расчётов показали, что среднее количество отводимой теплоты в случае охлаждения водо-воздушным аэрозольным потоком в 2 раза больше, чем при обдуве воздухом в условиях постоянной температуры окружающей среды. Как и в случае САРХ, положительным моментом использования водо-воздушного

охлаждения градиент является значительное снижение площади теплопередающей поверхности и, следовательно, габаритов установки.

Кроме того, была рассмотрена возможность интенсификации системы охлаждения отработанного ядерного топлива при его переработке и хранении. Установлено, что среднее количество теплоты, снимаемое водо-воздушной аэрозольной средой в 2 – 3,5 раза больше, чем при использовании воздушной среды с естественной циркуляцией. Вследствие испарения капель воды, температура поверхности тепловыделяющей сборки снижается более интенсивно по мере увеличения интенсивности орошения воздуха водой, что приводит к уменьшению времени охлаждения отработавшего ядерного топлива в 1,5-4 раза по сравнению с охлаждением воздухом.

**В заключении** подводятся итоги выполнения работы.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в следующем:

- предложен и экспериментально исследован процесс теплоотдачи от шаровых и цилиндрических элементов к водо-воздушному аэрозольному потоку для различных значений интенсивности орошения, при которых достигается максимальный эффект интенсификации теплообмена;

- впервые разработана и научно обоснована физическая модель течения и осаждения капель воды на шаровой и цилиндрической поверхностях, которая позволяет оценить условия образования на них пленки воды при теплообмене с водо-воздушным потоком;

- впервые установлено совместное влияние скорости набегающего водо-воздушного потока и содержания капельной влаги в потоке на интенсивность теплообмена, как с шаровыми, так и цилиндрическими элементами в каналах;

- предложены новые эмпирические корреляции, обобщающие зависимости между числом Нуссельта и режимными параметрами, определяющими процесс теплообмена в энергетических установках охлаждения с водо-воздушным аэрозольным потоком.

**Практическая значимость диссертационной работы** состоит в том, что автором предложен способ повышения эффективности процесса передачи тепла в

энергетических установках, заключающийся в подаче на охлаждаемую поверхность влажного воздуха и мелких капель воды, что имеет существенное значение для совершенствования систем охлаждения АЭС. Разработана новая физическая модель теплообмена от нагреваемых поверхностей к водо-воздушному 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 расчеты теплообменных установок с подачей водо-воздушного аэрозольного потока.

**Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов диссертационной работы** обеспечивается и подтверждается тем, что экспериментальные исследования базируются на использование апробированных методик исследований, аттестованных измерительных устройств и систем технологических параметров.

**По диссертационной работе имеются следующие замечания:**

1. Как отмечено во второй главе работы, на экспериментальном стенде в качестве охлаждаемой поверхности использовался рабочий участок в виде медного шара, материал и форма которого значительно отличаются от трубного пучка теплообменных аппаратов. Однако, из литературы известно, что форма поверхности, степень шероховатости и ряд других факторов могут значительно повлиять на коэффициент теплообмена. Из текста работы непонятно, чем обусловлен выбор именно такой формы и материала экспериментального участка.

2. Методика определения образующихся капель, заключающаяся в их осаждении на масляной пленке (п. 2.3.2) описана недостаточно подробно. Неясен способ определения размеров капель, не указана погрешность метода. В то же время, это является важнейшей характеристикой аэрозольного потока.

3. Из текста работы неясно, как определялись тепловые потери в узле крепления шаров, учитываемые при расчете плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи (формулы 2-6 и 2-7 на стр. 61).

4. В подписи к рисунку 3.5 на стр. 72 неверно указано число Рейнольдса ( $Re=2500$ ). При скорости потока достигающей 28 м/с это, скорее всего,  $Re=32500$ .

5. В тексте диссертации на стр. 92 автор пишет, что при проведении экспериментов по исследованию теплообмена с нестационарным охлаждением одиночного шарового элемента с 300 до 24 °С (рис. 4.10а) продолжительность охлаждения для режимов с водо-воздушным аэрозолем оказалась в 49, 62 и 65 раз меньше по сравнению с воздушным потоком. Однако из рисунка 4.10а видно, что даже при самой большой интенсивности орошения, продолжительность охлаждения снижается примерно в 2,8 раза, но никак не в 65 раз.

6. Выводы, полученные в четвертой главе работы, применимы только к шарообразной поверхности при размещении ее в канале малой площади при условии полного орошения ее поверхности мелкодисперсной влагой. В реальных промышленных объектах будут использоваться форсунки, что неизбежно приведет к неравномерности орошения площади теплообменной поверхности. Это вызывает вопросы при использовании полученных результатов для практического применения.

7. В экспериментах движение водо-воздушного аэрозольного потока при охлаждении рабочего участка осуществлялось сверху вниз, в то время как в реальном теплообменнике системы аварийного расхолаживания движение воздуха осуществляется в обратном направлении. Как учитывается этот факт при переносе результатов на реальный объект?

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы А.Х. Абеда. Диссертация в полном объеме отвечает критериям, которые установлены Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Автореферат выполнен с соблюдением установленных требований, полно и точно отражает содержание диссертации. Диссертационная работа представляет собой весомый вклад в развитие техники исследований и научных знаний о процессах гидродинамики и теплообмена при отводе тепла от охлаждаемых поверхностей с помощью водо-воздушного аэрозоля.



Считаю, что представленная диссертационная работа полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а её автор Аль-Джаноби Акрам Хамзах Абед заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Официальный оппонент - доктор технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории №19 отделения ядерной энергетики АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»

Морозов Андрей Владимирович

*А.В. Морозов* 03.11.2020

Почтовый адрес: Бондаренко пл., д. 1, г. Обнинск, Калужской обл., 249033

Контактный телефон: +7 (48439) 9-81-19

Адрес электронной почты: sas@ippe.ru

Подпись д.т.н. А.В. Морозова удостоверяю:

Заместитель генерального директора по науке и инновационной деятельности АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», к.э.н.



Айрапетова Наталья Германовна

Я, Морозов Андрей Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Аль-Джаноби Акрама Хамзаха Абед, и их дальнейшую обработку.