

## Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Аль-Джанаби Акрам Хамзах Абед «Интенсификация теплообмена энергетического оборудования АЭС с использованием водовоздушного аэрозоля», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Работа автора посвящена решению актуальных фундаментальных задач, связанных с исследованием теплообменных и гидродинамических характеристик водовоздушного аэрозольного потока при взаимодействии с охлаждаемой поверхностью теплообменных установок в условиях вынужденного течения и естественной конвекции; получению критериальных зависимостей, содержащих основные теплофизические и режимные параметры, для проведения инженерных расчетов теплообменных установок с водовоздушными аэрозольными потоками; разработке методов расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышения надежности оборудования и систем.

Работа автора напрямую направлена на повышение эффективности процесса передачи теплоты в энергетических установках систем охлаждения АЭС за счет использования водовоздушного аэрозольного потока, образующегося путем введения в поток воздуха мелких капель воды, что имеет существенное значение для совершенствования энергоэффективности, энергосбережения и безопасности ядерной энергетики.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, основных выводов, списка сокращений/обозначений и библиографического списка. Диссертация изложена на 188 страницах, включая 122 рисунка, 5 таблиц, 9 приложений. Список цитируемой литературы содержит 154 наименования.

**Во введении** рассмотрена общая постановка проблемы, обоснована актуальность, указаны объект и предмет исследования. Сформулированы цель, основные задачи, представлена научная новизна, показана

Вх. №05-19/1-373  
от 10.11.20г.

теоретическая и практическая значимость полученных результатов и представлены основные защищаемые положения.

**В первой главе** проведен обзор литературных данных по завершенным на настоящее время работам, связанных с разработкой систем охлаждения энергетического оборудования атомных электростанций. Даны общие технические характеристики, описание конструкции, принцип работы систем пассивного отвода тепла и сухих градирен на атомных электростанциях. Проанализированы преимущества и недостатки систем охлаждения оборудования, большинство из которых работает по принципу действия природных сил, таких как естественная циркуляция теплоносителя. Такие системы имеют недостаток, заключающийся в том, что высокая температура атмосферного воздуха в жаркие дни приводит к уменьшению полезной мощности пассивных теплоотводящих систем с воздушным охлаждением вплоть до 20–50%. Сделанный автором анализ литературы показал, что применение водяного аэрозоля является эффективным способом охлаждения во многих энергетических и промышленных установках. Однако технология охлаждения водяным аэрозолем для атомных электростанций в литературе рассматривается редко и лишь немногие теоретические и экспериментальные исследования направлены на повышение эффективности систем пассивного отвода тепла, сухих градирен с использованием методов интенсификации (канавки, оребрение и т.д.). В этой связи автором определена задача работы, направленная на исследование гидродинамики водовоздушного потока и его теплообмена с охлаждаемой поверхностью с целью определения диапазона режимных параметров (значений влагосодержания, температура поверхности и скорости потока), при которых достигается максимальный эффект интенсификации теплообмена. 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 (снижение 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. Описаны особенности установок для исследования процессов теплообмена при вынужденной и свободной конвекциях с стационарным и нестационарным нагретым одиночным шаровым элементом и рядов из шаровых элементов в цилиндрическом канале, установки для исследования теплообмена цилиндрических элементов (трубного пучка) в прямоугольном канале с водовоздушным потоком. Даны описание шарокалориметра и теплообменника из трех рядов цилиндрических стержней с шахматным расположением, систем крепления и нагрева, расположением датчиков температуры потока теплоносителя и теплонагруженных элементов, генерации водяного аэрозоля, камерой для смешивания аэрозоля с потоком воздуха.

Также во второй главе приведены методики измерения температуры поверхности теплообменников и водовоздушного аэрозольного потока, расхода воздуха, расхода воды на образование аэрозоля, мощности, потребляемой электронагревателем, гидравлического сопротивления потоков в каналах, система сбора данных; методика обработки экспериментальных результатов с формулами основных параметров; оценка погрешностей экспериментальных данных, рассчитанных по формулам для критерия Нуссельта и коэффициента теплоотдачи одиночного шара. Все это в значительной мере определяет достоверность полученных в диссертации результатов.

**В третьей главе** приведены результаты 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.

Глава имеет два основных раздела.

В первом – рассматривается физическая модель и CFD моделирование трёх нагретых шаров с тандемным расположением в канале при вынужденной конвекции. Во втором - физическая модель и CFD моделирование одного нагретого шара в режиме свободной конвекции.

Достоверность данных, полученных в ходе численного моделирования, подтверждена сравнением с результатами экспериментальных исследований, полученными в аналогичных условиях обтекания шаров и данными других авторов.

В результате моделирования показано, что для тандема шаров при вынужденной конвекции число Нуссельта для второго и третьего шаров примерно на 63–72% выше, чем для первого шара вследствие турбулизации потока шарами по мере их обтекания.

В условиях свободной конвекции воздуха структура теплового пограничного слоя и его гидродинамического аналога в первую очередь зависят от числа Рэлея и условий теплообмена. Число  $Nu$  для шара, расположенного в цилиндрическом канале, заметно выше, чем при расположении шара в неограниченном объёме что связано с увеличением скорости потока проходящего между поверхностью шара и цилиндрическим каналом.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи отдельного и рядов из шаровых элементов с водовоздушным аэрозольным потоком в цилиндрическом канале, а также критериальные уравнения, обобщающие экспериментальные данные.

В начале главы представлены результаты сравнения экспериментального исследования теплоотдачи к однофазному воздушному потоку с результатами других авторов. Результаты сравнения показали

работоспособность экспериментальной установки и достоверность полученных данных.

В главе можно выделить блок по исследованию теплообмена одиночного шарового элемента с водовоздушным потоком, в условиях свободной конвекции и теплообмена с нестационарным охлаждением и блок по исследованию теплообмена рядов из трех шаровых элементов, установленных последовательно друг за другом с водовоздушным потоком в цилиндрическом канале.

В этих разделах представлены экспериментальные данные, анализ которых позволил автору сделать вывод, что использование водовоздушного потока значительно эффективнее по сравнению с однофазным воздушным. При этом коэффициент гидравлического сопротивления водовоздушного аэрозольного потока в каналах с охлаждаемыми шаровыми элементами незначительно превысил соответствующий параметр при однофазном течении (до 6%) для всего диапазона интенсивностей орошения воздуха водой.

Автором получена обобщающая зависимость между критериями Нуссельта и Рейнольдса, Вебера и параметром  $K$  фазового перехода.

**В главе 5** рассмотрена особенность гидродинамики и теплообмена пучка цилиндрических элементов с их шахматным расположением, помещенных в прямоугольный канал.

Приведены экспериментальные данные по исследованию теплообмена пучка цилиндров в канале с воздушным и водовоздушным потоками, результаты исследований теплообмена пучка цилиндров в условиях свободной конвекции.

Результаты показали, что применение водовоздушного аэрозольного потока для охлаждения цилиндрических элементов в прямоугольном канале в разы эффективнее при принудительной и свободной конвекциях по сравнению с воздушным охлаждением. Коэффициент гидравлического

сопротивления для водовоздушного аэрозольного потока незначительно превышает значения для однофазного воздушного потока.

Автором получено критериальное уравнение теплообмена, которое можно использовать в инженерных расчетах энергетических аппаратов с цилиндрическими элементами (трубными пучками) при их охлаждении водовоздушным аэрозольным потоком.

**В главе 6** проведен анализ практического использования полученных результатов исследований в технологии водовоздушного аэрозольного охлаждения оборудования на АЭС.

Автором проведен расчёт мощности системы аварийного расхолаживания САРХ-ВТО реактора на быстрых нейтронах. Показано, что использование теплообменника с водовоздушным аэрозольным потоком обеспечивает 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.

Предложена гибридная система охлаждения с естественной тягой оборотной воды на примере модели сухих градирен АЭС. Система сочетает в себе преимущества, как мокрой, так и сухой систем охлаждения и является компромиссным решением при недостаточном или нестабильном источнике охлаждающей воды. Использование водовоздушного охлаждения градирен приводит к значительному снижению площади теплоотдающей поверхности и, следовательно, габаритов установки.

Показано, что среднее количество теплоты, снимаемое водовоздушной аэрозольной средой в 2 - 3.5 раза больше, чем при использовании воздушной среды с естественной циркуляцией систем охлаждения отработанного ядерного топлива при его переработке и хранении.

**В заключении** сформулированы выводы по диссертации.

Научна новизна и научна ценность рассматриваемой диссертационной работы подтверждается следующими результатами:

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; 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; 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; предложены новые эмпирические корреляции, обобщающие зависимости между критериями число Нуссельта и режимными параметрами (число Рейнольдса, Вебера и параметром фазового перехода), определяющими процесс теплообмена в энергетических установках охлаждения с водовоздушным аэрозольным потоком.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в 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 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.

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

Основное содержание диссертации отражено в 20-ти публикациях, из них 8 статей опубликованы в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и WebofScience; 3 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и Аттестационным советом УрФУ; 9 тезисов в сборниках международных и российских научных конференций.

В целом по работе можно сделать следующие замечания:

- 1) Из описания экспериментальной видно, что водяной аэрозоль попадал во входной участок через систему труб с переходом под 90 градусов. Неизбежно часть влаги оседает на стенках каналов. В работе нет данных о количестве влаги, достигшей теплонагруженных элементов.
- 2) При исследовании теплообмена теплонагруженных элементов при естественной конвекции в канале, непонятно, как организовывалось и контролировалось попадание всего водовоздушного потока в канал.
- 3) Присутствие капель жидкости микронного диаметра в воздушном потоке неизбежно уменьшают температуру потока. В работе нет данных об истинной температуре охлаждающего водовоздушного аэрозольного потока.
- 4) Присутствие водяных капель в воздушном потоке может привести к дополнительной неопределенности при измерении расхода с помощью трубок Пито и измерении гидравлического сопротивления наклонным манометром водовоздушного потока, особенно при больших значениях интенсивности орошения потока воздуха водой.



- 5) В разделе «Оценка погрешностей измерений» приводится неопределенность определения числа Нуссельта, числа Рейнольдса и коэффициента трения для одиночного шара. Наверно, следовало бы привести значения неопределенности этих параметров для тандема шаров в цилиндрического канале и цилиндрических элементов в прямоугольном канале. Не приведена оценка неопределенности определения числа Рэлея, которое используется для оценки эффективности охлаждения исследуемых элементов при естественной конвекции.
- 6) В разделах по исследованию теплообмена шаровых и цилиндрических элементов нет сравнения с результатами других авторов.
- 7) Нет данных о расстояниях между цилиндрами в ряду и самими рядами конструкции, которая использовалась в экспериментах по исследованию теплообмена цилиндрических элементов. Без этой информации невозможно проводить сопоставление с результатами других авторов.
- 8) В предложенной конструкции для интенсификации отработанного ядерного топлива при его переработке и хранении автором не объяснено, куда отводится пар, возникающий при испарении распылённой воды в контейнере.
- 9) По оформлению диссертации и автореферата имеются следующие замечания:
- В тексте используются переменные, индексы к переменным, описания которых нет ни в тексте, ни списке сокращений.
  - СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ включает как список сокращений, так и список условных обозначений. Обычно их разделяют.
  - Используется одна переменная для обозначения разных величин. Например,  $P$  используется для обозначения давления в парогенераторе (стр. 24) и как мощность нагревателя.

- Несколько рисунков в тексте имеют пояснительные надписи на иностранном языке.
- На стр. 115 диссертации есть ссылка на формулы 4.28 – 4.30, которых под такими номерами нет.
- На рисунке 5.4 неверная ссылка на источник (формула Жукаускаса).
- В формулах и тексте диссертации имеются опечатки.

Указанные замечания не носят принципиальный характер и не меняют общей положительной оценки работы.

Автореферат по своему содержанию и выводам соответствует диссертации.

Тема диссертационного исследования соответствует паспорту специальности 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации п. 1 Моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих расчетное обоснование облика и безопасного функционирования объектов ядерной техники, п. 3. Разработка методов расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышению надежности оборудования и систем, п. 5. Разработка методов управления сроком службы объектов ядерной техники.

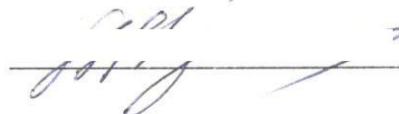
Оформление диссертации отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Считаю, что диссертационная работа Аль-Джанаби Акрам Хамзах Абед выполнена по актуальной тематике на высоком научном уровне, является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой представлены новые научно-обоснованные технические решения,

внедрение которых имеет большое значение для развития объектов атомной энергетики и обеспечение замкнутости ядерно-топливного цикла.

Обобщая результаты анализа диссертационной работы Аль-Джаноби Акрам ХамзахАбед, следует отметить, что она отвечает требованиям п.9. Положения о присуждении ученых степеней УрФУ, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.03 - Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Официальный оппонент – ведущий научный сотрудник Лаборатории проблем энергосбережения Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, доктор технических наук (01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики)

 Назаров Александр Дмитриевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект, Академика Лаврентьева д. 1., Тел.: +7(383) 330-90-40, E-mail: [director@itp.nsc.ru](mailto:director@itp.nsc.ru)

Подпись А.Д. Назарова удостоверяю:

Заместитель директора  
по научной работе ИТ СО РАН,  
д.ф.-м.н.

Дата «05» 11 2020





П.А. Куйбин

Я, Назаров Александр Дмитриевич, даю согласие на включение персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Аль-Джаноби Акрам Хамзах Абед, и их дальнейшую обработку.