

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Карпова Павла Николаевича «Теплообмен при испарительном охлаждении поверхности многоструйным импульсным спреем», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Газокапельные потоки (спреи) широко используются в различных отраслях современных технологий. Они являются одним из наиболее эффективных и перспективных методов охлаждения высоконагруженных поверхностей и исследованиям таких течений в последнее десятилетие уделяется все более пристальное внимание. Ведущие международные научные коллективы (Губайдуллин, Пахомов, Щеклеин, Mudawar, Moreira, Kim и др.) занимаются проблемами интенсификации тепломассообмена при охлаждении поверхности распыленной жидкостью. Данный интерес объясняется высокими темпами глобальной цифровизации и переходу к более мощным и в тоже время компактным микропроцессорам, созданию больших центров обработки и хранения данных, развитию гибридных электросиловых установок. Важное место спреи занимают и в традиционных областях техники – в металлургии, строительных технологиях и текстильной промышленности и др. Выносимая на защиту работа затрагивает вопросы решения проблем подавления высоких тепловых потоков с больших поверхностей при использовании минимального количества охлаждающей жидкости.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка литературы (129 наименований), двух приложений. Основной текст изложен на 132 страницах, содержит 58 иллюстраций и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель работы, поставлены основные задачи исследования. Обозначена научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, апробация результатов. Приведены положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлено современное состояние вопроса охлаждения теплонагруженной поверхности капельным и газокапельным

потоком в научной литературе. Показаны основные принципы формирования капельного потока, приведены данные о влиянии геометрии распылителя. Проанализирован процесс взаимодействия потока капель с поверхностью. Дан краткий сравнительный обзор по интенсивности теплообмена.

**Во второй главе** представлено описание опытного стенда, методик измерения параметров и их обработки, а также проведен анализ неопределенностей измерений. Показана оригинальная экспериментальная установка, разработанная специально для исследований охлаждения больших поверхностей с помощью импульсных спреев с вариацией продолжительности импульса и частоты их повторения. Приведены данные, полученные при исследовании газочапельного потока формируемого 16 жидкостными электромагнитными форсунками и постоянным спутным потоком газа.

**В третьей главе** представлены результаты исследования нестационарного теплообмена при натекании одиночного по времени импульса спрея различной длительности. Приведен анализ большого количества экспериментальных данных о распределении величины локального коэффициента теплоотдачи при кратковременной работе всех жидкостных форсунок для различных времен длительности импульсов.

**В четвертой главе** описываются основные характеристики потока диспергированной жидкости. Показано влияние постоянного спутного потока газа на формирование цуга капель и параметры осажденной пленки жидкости. Приведены экспериментальные результаты величины осредненного по времени коэффициента теплоотдачи в зависимости от удельного расхода и давления в системах подачи воды и воздуха.

**В пятой главе** приведены данные о величине коэффициента теплоотдачи при использовании водно-спиртового раствора в качестве охлаждающей жидкости. Приведены данные о величине коэффициента теплоотдачи в широком диапазоне концентраций этилового спирта. Подробно рассматриваются данные при концентрациях от 0 до 10%.

Основными оригинальными моментами работы являются, составляющими предмет научной новизны, являются полученные результаты систематических экспериментальных исследований при импульсной работе спрея. Показаны диапазоны изменения интенсивности нестационарного теплообмена при изменении длительности импульсов подачи, массовой скорости капель спрея, давления и скорости спутного воздушного потока. Показаны возможности управления коэффициентом теплоотдачи за счет изменения состава бинарной смеси жидкостей спрея. Автор показал, что при концентрации этанола в водном растворе  $K_1 \sim 50-60\%$  наблюдается максимум коэффициента теплоотдачи, превышающий более чем 1.5 раза его значение для чистой воды. При этом теплообмен для этанола заметно выше, чем для воды, несмотря на более высокие значения скрытой теплоты парообразования у воды по сравнению с этанолом. Это говорит о сложности обменных механизмов и аэро-гидродинамике воздушно-капельной смеси, ее взаимодействия с поверхностью и поведением образующейся жидкой пленки. Важно подчеркнуть, что кроме коэффициентов теплообмена в диссертации по всем ее разделам рассматривается поведение параметра тепловой эффективности, представляющего собой полноту использования полной энтальпии спрея для охлаждения стенки (своего рода энтальпийный к.п.д. системы охлаждения). Этот параметр является определяющим в случаях дефицита жидкой фазы, расходуемой на охлаждения и при необходимости более полной ее утилизации. Эксперименты показали, что короткие по времени импульсы являются с этой точки зрения наиболее эффективными.

Хотелось бы сделать еще один общий важный вывод, следуемый из полученных автором результатов. Определяющее влияние в режиме испарительного охлаждения на интенсивность среднего по времени теплообмена оказывает среднемассовая скорость капельной фазы. Давление перед жидкостными форсунками практически не сказывается, а скорость спутного потока усиливает теплообмен в пределах 20%.

При общей высокой оценке рецензируемой работы, представляется желательным отметить и некоторые недостатки, устранение которых в дальнейших исследованиях способствовало бы повышению ее эффективности. Основные вопросы и замечания по работе:

- Недостаточно широко освещен вопрос современного состояния проблемы в научной литературе. Приведенных сравнений недостаточно для более четкого понимания, какой из мало изученных проблем охлаждения газочапельным потоком посвящена данная работа;
- Рисунок 2.9 подписи в описании времен работы электромагнитной форсунки на английском языке.
- Недостаточно четко представлены данные об изменении размера капель в зависимости от удаления от источника.
- Недоверие вызывают данные о максимальной величине теплоотдачи, полученные с датчика локального теплового потока. Датчик располагался на поверхности теплообменника, создавая дополнительные «неровности» также данные получены для режимов с частичным покрытием рабочей поверхности.
- Непонятен введенный автором термин одиночной струи т. к. блок представляет собой массив 16 форсунок.
- На рисунке 4.2 показано влияние скорости спутного воздушного потока на величину локального теплового потока. Но на всех приведенных графиках указывается только давление газа. Нет информации о сопоставлении скорости газа в зависимости от начального давления.
- Рисунок 4.5 мало информативен. Непонятно что автор здесь хотел сказать.
- Рисунок 2.18 не согласуется с текстом. На рисунке приведены данные о доле воды на поверхности в зависимости от начальных условий – давлений жидкости и газа, и расстояния блока форсунок до поверхности орошения. На графике указаны всего два расстояния –

540 и 200 мм. По тексту к рисунку сделан вывод о том, что оптимальное расстояние составляет – 230 мм.

- Непонятно для чего приводится информация о толщине пленки для одного режима. Допущена опечатка в подписи к рисунку 4.8. на рисунке обозначены зонды №1 и №4 а описание приведенных данных для зондов под номерами №1 и №2.
- Рисунок 4.12 легенда к графикам сложна для понимания.
- В главе 5 ничего не сказано о том, как определялась концентрация водно-спиртового раствора.

### **Заключение**

Диссертационная работа Карпова П.Н. на тему «Теплообмен при испарительном охлаждении поверхности многоструйным импульсным спреем» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выносимые для защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

В диссертации приведены сведения о практическом использовании научных результатов, полученных в работе. Предложенные автором диссертации решения в достаточной степени аргументированы.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты, полученные в процессе её выполнения. Работа основательно апробирована на большом числе престижных российских и зарубежных конференций.

Содержание диссертации соответствует её названию и сформулированным задачам, а также паспорту научной специальности 01.04.14– «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Диссертационная работа по структуре и содержанию отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

По своей актуальности, степени научной новизны, теоретической и практической значимости, а также уровню и целостности полученных результатов, работа удовлетворяет критериям п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённом Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 01.10.2018), а её автор **Карпов Павел Николаевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14– «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент  
Заведующий кафедрой атомных станций  
и возобновляемых источников энергии  
ФГАОУ ВО УрФУ,  
д.т.н., профессор

Щеклеин Сергей Евгеньевич

Щеклеин Сергей Евгеньевич доктор технических наук,  
специальность 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника,  
заведующий кафедрой «Атомных станций и возобновляемых источников  
энергии» Федерального автономного государственного образовательного  
учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
Телефон 8-343-375-95-08 E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

« 30 » 11 2021 г.

Подпись С.Е. Щеклеина заверяю:

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
УРФУ  
МОРОЗОВА В.А.

Проставил в совет 04.12.2021  
Уч. секретарь Де Шу/Бенуш  
0.12/1

Сотворил озвонившем 04.12.2021

Щеклеин С.Е.