

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора

Кузнецова Геня Владимировича

на диссертацию Карпова Павла Николаевича «Теплообмен при испарительном охлаждении поверхности многоструйным импульсным спреем», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы диссертационной работы

Методы испарительного охлаждения нагретых поверхностей применяются в различных отраслях техники достаточно давно и эффективно, но все примеры применения этого метода являются следствием экспериментального подбора параметров потока распыленной до микрокапельного, как правило, состояния используемой для охлаждения жидкости. Общей теории процессов отвода теплоты от нагретой поверхности при ее взаимодействии с потоком диспергированной жидкости пока нет. Соответственно, нельзя утверждать, что даже используемые в настоящее время технологии струйного импульсного охлаждения нагретых поверхностей соответствуют наилучшему, в каждом конкретном случае набору технологических параметров (число струй, распределение капель по размерам в каждой струе, длительности импульсов, расход жидкости и др.). Плохо изучены и основные закономерности теплофизических процессов, протекающих при взаимодействии капельных потоков с нагретыми твердыми поверхностями. При этом нет оснований после изучения литературы по проблеме утверждать, что исследования в этой области не ведутся. Известны неоднократные попытки описания процессов растекания одиночных капель по поверхности (как холодным, так и нагретым), начиная с 70-х годов двадцатого века. Но пока результаты этих исследований недостаточны для прогноза характеристик процессов теплообмена при испарительном охлаждении поверхности струйными капельными потоками-спреями.

По этим причинам тема диссертации П.Н. Карпова, целью которой является экспериментальное исследование локальных и интегральных характеристик теплообмена при взаимодействии импактного импульсного газочапельного потока со слабонагретой поверхностью в условиях испарительного охлаждения, безусловно, актуальна.

Оценивая актуальность темы диссертации П.Н. Карпова следует также отметить, что по своему содержанию и достигнутым результатам она полностью соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (утверждено указом Президента РФ № 899 от 07 июля 2011 года).

Общая характеристика диссертации.

Рукопись диссертации состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 129 источников и двух приложений. Рукопись содержит 132 страницы текста, включая 38 рисунков и 3 таблицы.

Во введении автор обосновывает актуальность своего диссертационного исследования, формирует цель и задачи исследования, защищаемые положения, обосновывает научную и практическую значимость полученных результатов.

В первой главе приведены результаты выполненного автором диссертации анализа литературы по тематике диссертационного исследования. Показано, что при использовании струйных газочапельных потоков достигается наиболее высокий эффект охлаждения нагретых поверхностей вследствие испарения. Установлено, что даже при относительно малых расходах жидкости в результате развития межфазной поверхности можно отводить тепловые потоки до 100 Вт/см^2 . Показано, что импульсные спреи являются, скорее всего, наиболее перспективными из методов газочапельного охлаждения, т.к. при определенном сочетании параметров спрея можно обеспечить полное испарение используемой для охлаждения поверхности жидкости. На основании анализа содержания, изученных им первоисточников автор диссертации делает вывод, что, несмотря на большое число работ по исследованию охлаждения нагретых поверхностей капельными потоками, очень мало результатов изучения влияния системы струй в однофазной или двухфазной среде на интенсивность теплоотвода от поверхностей различного оборудования. Дефицит знаний в этой области теплофизики создает объективные предпосылки для обоснования целесообразности диссертационного исследования П.Н. Карпова.

Во второй главе рукописи автор приводит описание использованного им экспериментального стенда, методик измерений характеристик процесса и параметров струй капель, а также анализирует неопределенности (по классической терминологии погрешности) измерений. Используемый автором стенд обеспечивал возможность регистрации интегральных параметров теплоотдачи, расходы и температура газа и охлаждающей жидкости, давление в системе подачи газа и жидкости. Автор диссертации разработал оригинальное устройство многоструйного импульсного источника газочапельного потока с 16 форсунками для распыления жидкости и 25 соплами для подачи воздуха. Устройство обеспечивало генерацию капель размерами до 150 мкм на выходе из форсунок. При подходе к поверхности в результате комплекса процессов дробления и коагуляции формировался эшелон капель с распределением капель по размерам. Относительно большие по размерам ($120\text{-}160 \text{ мкм}$) в авангарде и малые ($20\text{-}40 \text{ мкм}$) в «хвосте». В экспериментах обеспечивалась возможность управления подачей жидкости и газа с заданным в достаточно широком диапазоне изменения отношением масс жидкости и воздуха в капельном потоке. Для регистрации теплового потока использовался датчик, обеспечивающий определение интегрального и локального коэффициентов теплоотдачи в широком диапазоне изменения основных параметров спрея.

Третья глава рукописи посвящена описанию результатов экспериментального исследования нестационарного теплообмена при воздействии на поверхность одиночного импульса спрея разной длительности. Автор решал задачу выбора оптимального режима теплоотвода в результате вариации значений длительности и частоты импульса для исключения

возможности взаимодействия двух последовательных импульсов. В этой главе приведены в качестве основных иллюстраций зависимости коэффициента теплоотдачи от времени при разной продолжительности импульсов. Также показано, как длительность импульсов влияет на максимальный и средний по времени коэффициент теплоотдачи.

В четвертой главе приведены установленные в экспериментах автора основные характеристики потока диспергированной жидкости. Установлено влияние постоянного спутного потока газа на формирование эшелона капель и характеристики пленки жидкости, образующейся на поверхности. Получены зависимости коэффициентов теплоотдачи от скорости спутного воздушного потока для разных расходов жидкости, а также зависимости этих коэффициентов от расхода охлаждающей жидкости при разных длительностях импульса (от 2мс до 10мс) и частоте повторений от 1 до 10Гц. Проведено обобщение полученных в экспериментах результатов в виде кусочно-линейной зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса. Установлено, что максимальный эффект по отводу теплового потока достигается при использовании коротких импульсов (малых расходах охлаждающей жидкости).

В пятой главе приведены результаты экспериментов по определению коэффициентов теплоотдачи при использовании в качестве охлаждающей жидкости воздушно-спиртового раствора. Установлено, что в этом случае независимо от длительности импульсов при концентрации спирта в растворе 50-60% коэффициент теплоотдачи превышает аналогичное значение для однородной воды в 1,5 раза. Сделан вывод о более высокой степени утилизации энергии (по сравнению с водой) охлаждающей жидкости, если в качестве теплоносителя используется спирт.

В заключении приведены основные результаты работы.

Общая методология и методика исследования

Методика исследования, применяемая в диссертации, включает в себя совокупность экспериментальных подходов к изучению теплообмена при натекании капельных струй жидкостей на нагретую поверхность. Автор диссертации разработал экспериментальный стенд для реализации своей методики. При их разработке автор использовал современные представления о процессах теплопереноса при натекании капельных потоков жидкости на нагретую поверхность и механизмах отвода теплоты в рассматриваемом случае. При планировании, организации, проведении экспериментальных исследований и обработке результатов большое внимание автор уделил анализу неопределенностей (по старой терминологии случайных и систематических погрешностей) измерений регистрируемых параметров и характеристик. После анализа и обобщения установленных при проведении экспериментальных исследований основных закономерностей, исследовавшихся в диссертации достаточно сложных теплофизических и гидродинамических процессов, П.Н. Карпов сформулировал гипотезы о механизмах исследовавшихся им физических процессов. Следует отметить, что все формулировки и выводы по объяснению физики изучавшихся в экспериментах процессов теплопереноса соответствуют

современным представлениям теории теплофизических и гидродинамических процессов.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность полученных автором диссертации результатов и, соответственно, защищаемых положений и выводов определяется высоким уровнем метрологической проработки всех разделов диссертации. Выполнен очень большой объем достаточно сложных по подготовке, проведению, регистрации основных параметров и характеристик, обработке результатов измерений при натекании газокапельных струй на нагретые поверхности. Для регистрации основных параметров и характеристик исследовавшихся процессов использовались разработанные автором методики и алгоритмы, а также разработанные ранее другими исследователями. Во второй главе (раздел 2.7) представлены результаты оценки погрешностей (неопределенностей по терминологии автора) всех основных измеряемых в экспериментах характеристик и параметров. Этому разделу исследований автор уделил достаточно много внимания, поэтому каких-то сомнений в достоверности результатов экспериментов нет. Все основные выводы и защищаемые положения сформулированы П.Н. Карповым на основании детального анализа и последующего обобщения результатов выполненных им экспериментов.

Научная новизна полученных результатов.

П.Н. Карповым получена большая группа результатов экспериментальных исследований, имеющих как фундаментальное, так и прикладное значение. Наиболее значимыми и соответствующими критерию новизны, по мнению оппонента, являются следующие:

1. По результатам экспериментов установлены коэффициенты теплоотдачи в условиях нестационарного теплообмена при взаимодействии импульсного многоструйного спрея с вертикальной нагретой поверхностью в достаточно широких и соответствующих практике диапазонах изменения длительности импульсов, частоты их следования, давления газа на входе, скорости газа и дисперсного состава капельного потока.

2. Показано, что наибольшей эффективностью обладают капельные потоки с малыми (менее 10мс) временами импульсов.

3. Спутный поток газа оказывает интенсифицирующий эффект – коэффициенты теплоотдачи увеличиваются почти в два раза.

4. Установлены коэффициенты теплоотдачи при воздействии одиночного импульса спрея на нагретую поверхность.

Практическая значимость

Результаты исследований П.Н. Карпова имеют несомненное практическое значение – установленные в экспериментах численные значения коэффициентов теплоотдачи могут использоваться при разработке конкретных систем охлаждения нагретых поверхностей деталей машин различного назначения при использовании спрейных систем.

Также достаточно оригинальные результаты экспериментов, приведенные в рукописи диссертации П.Н. Карпова, могут использоваться при верификации современных пакетов программ и вновь создаваемых при оценке работоспособности последних при решении задач теплоотвода от нагретых поверхностей деталей машин в условиях использования систем спрейного охлаждения.

Замечания по диссертации

1. Автор несколько раз при описании полученных им результатов использует термины и словосочетания, осложняющие понимание сущности этих результатов. Так, например, на стр.58 используется словосочетание «измерения однородности распределения капельного потока у поверхности...». Можно заметить, что однородность сама по себе не измеряется в экспериментах.

2. На стр.71 вводится в рассмотрение характеристика производительности «спрей – системы» – тепловая эффективность, которая представляется как «отношение интегрального потока тепла через теплообменник к суммарной величине разности энтальпий парогазо-капельной смеси». В дальнейшем эта характеристика называется параметром тепловой эффективности (стр.89) и коэффициентом тепловой эффективности и является безразмерной, если ориентироваться, например, на рис. 4.13 и рис. 4.14. Но размерности потока тепла и энтальпий не идентичны. Поэтому остается открытым вопрос о размерности этой характеристики тепловой эффективности (возможно, в определении этой величины на стр. 71 есть опечатка или неточность формулировки).

3. Попытка обобщения полученных автором диссертации экспериментальных данных в виде зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса в рукописи не обоснована. В число Re не входят параметры, характеризующие процесс испарения жидкости (например, теплота фазового перехода). А этот процесс играет важную роль в отводе теплоты от нагретой поверхности если ориентироваться на формулу (3.2) на стр.71.

Значимость для науки и практики полученных в диссертации П.Н. Карпова результатов, положений и выводов сделанные замечания не снижают.

Заключение о соответствии диссертации критериям.

Диссертация П.Н. Карпова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно, содержит результаты экспериментальных исследований, соответствующие критерию новизны.

Диссертация П.Н. Карпова соответствует специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту рукописи диссертации, которая написана правильным русским языком, в доказательном стиле и хорошо иллюстрирована.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации П.Н. Карпова «Теплообмен при испарительном охлаждении поверхности многоструйным импульсным спреем» можно сделать обоснованное заключение о том, что она соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013

(ред. от 01.10.2018), а ее автор Карпов Павел Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
доктор физико-математических наук
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника),
профессор

Кузнецов Гений Владимирович

18.11.2021

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, тел.: 8 (3822) 60-63-33,
tpu@tpu.ru; <http://www.tpu.ru/>
E-mail: marisha@tpu.ru
тел.: 8(3822)60-62-48

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю

Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета

Александровна

Принят в совет 06.12.2021
Уч. секретарь ДС Ву Воронин О.В.

Созданной означенной 09.12.2021

Карпов П.Н.