

На правах рукописи



Карпов Павел Николаевич

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРИТЕЛЬНОМ ОХЛАЖДЕНИИ
ПОВЕРХНОСТИ МНОГОСТРУЙНЫМ ИМПУЛЬСНЫМ СПРЕЕМ**

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск

Научный руководитель: **Терехов Виктор Иванович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория термогазодинамики, главный научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, профессор, г. Томск;

Щеклеин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии, заведующий, г. Екатеринбург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва.

Защита диссертации состоится «23» декабря 2021 г. в 10⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» ноября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Олеся Владимировна Боруш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Метод охлаждения нагретых поверхностей газочапельным потоком является одним из наиболее эффективных, поэтому он вызывает интерес исследователей и является перспективным для его внедрения в энергетику, машиностроение, металлургию, химическую и пищевую промышленность. По имеющимся в литературе данным спрей - метод по интенсивности теплообмена сравним с пленочным или импактным жидкостным охлаждением, но при значительно меньших массовых расходах охладителя.

В зависимости от температуры охлаждаемой поверхности могут существовать различные режимы, характеризующиеся разными особенностями теплопереноса. Можно выделить режимы пленочного и пузырькового кипения, переходные режимы и режимы многофазного и однофазного охлаждения. Большое число работ по охлаждению с помощью газочапельных потоков посвящено режимам с кипением, что объясняется широким использованием капельного охлаждения в металлургии и атомной энергетике. Работ по изучению испарительного режима охлаждения, когда температура поверхности ниже точки кипения, сравнительно немного, в то время как в последние годы в связи с интенсивным развитием широкого класса новых технологий, в том числе компьютерной техники и возрастанием мощности тепловыделения при работе процессоров, возникла необходимость в создании новых эффективных систем охлаждения.

Одним из перспективных способов формирования спрея является импульсное распыление жидкости через управляемые форсунки, когда расход жидкой фазы определяется частотой и длительностью цуга капель, что позволяет эффективно управлять процессом испарения капель, попадающих на теплообменную поверхность. При этом процесс теплообмена зависит от параметров спрея, размера капель, температуры поверхности, перепада давления на форсунках, скорости спутного потока газа, расстояния между соплом и преградой и других факторов. Большой прикладной интерес представляют также методы охлаждения протяженных поверхностей с помощью многоструйных устройств, программное управление которыми позволяет создавать различные режимы с регулируемым по пространству и времени распределением жидкой фазы. Сложность процессов теплопереноса, протекающих при охлаждении импульсным спреем и их многофакторность не позволили к настоящему времени составить полную картину взаимосвязанных термогидродинамических процессов.

Степень разработанности. Большинство экспериментальных и численных исследований в области газочапельного охлаждения посвящено изучению спреев, формируемых одиночным соплом (Moreira et al., Mudawar et al., Labergue et al). Для однофазных режимов такой способ охлаждения изучен достаточно основательно (Chen et al.), тогда как для двухфазных газочапельных потоков проблема теплообме-

на при натекании системы струй на охлаждаемую поверхность получила развитие только в последнее время (Zhao et al.). Эта задача значительно сложнее случая с однофазным течением из-за необходимости обеспечения равномерности капельного орошения охлаждаемой поверхности.

Результаты исследований, проведенных в Институте теплофизики СО РАН группой ученых под руководством Терехова В.И. показали, что при импульсном орошении интегральный коэффициент теплоотдачи выше, чем в случае непрерывного потока спрея при одинаковых расходах жидкой фазы. Создание управляемых эффективных охлаждающих систем на основе импульсного газочапельного потока является одним из перспективных направлений для решения рассматриваемой проблемы. Ряд выполненных исследований показал эффективность применения многоструйного программируемого импульсного газочапельного потока для импактного охлаждения больших поверхностей (Терехов В.И., Серов А.Ф. и др.).

Из приведенного краткого обзора следует, что эффективность охлаждения нагретой поверхности двухфазным потоком зависит от сочетания большого количества гидродинамических параметров и конструктивных особенностей системы.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование локальных и интегральных характеристик теплообмена при взаимодействии импактного импульсного газочапельного потока со слабонагретой поверхностью в условиях испарительного охлаждения.

Для выполнения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Экспериментальное исследование структуры газочапельного потока, сформированного многоструйным двухфазным источником оригинальной разработки;
2. Провести исследование нестационарного теплообмена при натекании одиночного по времени импульса в зависимости от его длительности;
3. Определить влияние на величину коэффициента теплоотдачи потока длительности импульса, интервала между импульсами, вариации давления перед форсунками при использовании в качестве хладагента воды и этанола, а также их смесей;
4. Изучить влияние спутного потока воздуха на формирование охлаждающей пленки жидкости на поверхности теплообменника и теплоперенос.

Научная новизна представленных результатов в работе заключается в следующем:

1. Впервые получен комплекс экспериментальных данных по эффективности испарительного охлаждения протяженных поверхностей с помощью программируемого многоструйного импульсного спрея в широком диапазоне длительности и частоты следования импульсов.

2. Установлено, что тепловая эффективность спрея возрастает по мере сокращения длительности импульса, которая достигается за счет испарительного охлаждения и вовлечения в процесс всей жидкости, выпущенной многоструйным источником.

3. Показано влияние постоянного спутного потока газа на коэффициент теплообмена через формирование турбулентной пленки жидкости на поверхности теплообменника и возврат вторичных отраженных капель.

4. Использование «одиночных импульсов» позволяют добиться максимальной эффективности при охлаждении спрей системой за счет вклада испарительного охлаждения.

5. Обосновано увеличение коэффициента теплоотдачи при охлаждении водно-спиртовым раствором при концентрации этилового спирта в растворе 40–60%.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты важны для теоретического обоснования и практического применения систем охлаждения, создаваемых на основе импактного импульсного многоструйного газочапельного потока. Полученные экспериментальные данные о величине коэффициента теплоотдачи при малых длительностях импульса показали эффективность использования всей охлаждающей жидкости, осажденной на поверхности теплообменника. Данный режим предпочтителен в разработках систем, где имеются особые условия к утилизации отработанного охладителя.

Включение в разработку перспективных систем охлаждения больших поверхностей управляемого многоструйного источника позволяет контролировать и управлять локальным перегревом на такой поверхности за счет своевременного включения в работу необходимой форсунки. Полученные данные о зависимости осажденной пленки от удельного расхода охлаждающей жидкости также позволяют дать рекомендации по эффективному охлаждению при создании новых перспективных систем.

Достоверность результатов подтверждается использованием современных методик регистрации теплофизических параметров, применением в экспериментальных работах аттестованного оборудования, калибровкой измерительного оборудования, оценкой неопределенности измерений, сравнением с экспериментальными данными других исследователей.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные результаты по исследованию нестационарного коэффициента теплоотдачи в режиме испарительного охлаждения одиночного по времени импульса при вариации его длительности от 2 до 50 мс.

2. Опытные данные по интегральной величине коэффициента теплоотдачи при охлаждении поверхности импактным импульсным газочапельным потоком при

различных начальных условиях: длительность импульса от 2 до 10 мс, частота повторений от 1 до 10 Гц.

3. Результаты экспериментальных исследований о величине коэффициента теплоотдачи и тепловой эффективности спрея при использовании в качестве охлаждающей жидкости водно-спиртового раствора

Личный вклад автора. Постановка задач исследований проводилась научным руководителем д.т.н. Тереховым В.И. и д.т.н. Серовым А.Ф. Консультантом по методам измерений и обработки данных был д.т.н. Назаров А.Д. Основная часть работы, включая модернизацию и совершенствование новых измерительных методик, проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных данных, выполнены автором самостоятельно. Основные выводы и результаты, и выносимые на защиту, выполнены соискателем лично.

Апробация работы. Основные результаты, выносимые на защиту в данной диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная конференция СибОптика (г. Новосибирск 2016, 2017), Всероссийский семинар с международным участием «Динамика многофазных сред» (г. Новосибирск 2015, 2019), Российская национальная конференция по теплообмену (г. Москва 2014, 2018), Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики (г. Новосибирск 2014, 2016), Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, (2015, 2017, 2021) Сибирский теплофизический семинар (г. Новосибирск 2014, 2017), Int. Symposium and School for Young Scientists (г. Новосибирск 2016), Минский международный форум по тепло - и массообмену (Беларусь, г. Минск 2016), Int. Heat Transfer Conference (Китай, г. Пекин 2018).

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 17 научных работах, из них опубликованных согласно перечню, российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК) – 2, а также работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 4.

Структура и объем диссертации. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введение** описывается актуальность представляемой работы, ее новизна и практическая значимость полученных результатов. Также сформулированы основные положения, выносимые на защиту и личный вклад автора.

В первой главе приведен обзор и анализ литературы, посвященной теме диссертационной работы. Интенсификация теплообмена представляет собой одно из приоритетных направлений современной теплофизики и энергетики. Среди большого числа методов эффективного теплоотвода при высоких значениях плотности теплового потока особое место занимают системы охлаждения с использованием скрытой теплоты парообразования. Работы в этой области имеют давнюю историю и, благодаря исследованиям С.С. Кутателадзе, Исаченко В.П., Волчкова Э.П., E.N. Ganic, K. Hishida, S.-C. Yao и др., достигнут значительный прогресс. Наиболее высокий эффект охлаждения дают струйные газокапельные потоки (спреи), получившие широкое распространение в большом числе новых энергетических технологий. В этом случае при относительно малых расходах жидкой фазы за счет развития межфазной поверхности удается снимать тепловые потоки порядка 100 Вт/см^2 . Этим объясняется возрастающий интерес к исследованиям газокапельного метода охлаждения, которому посвящены работы ряда научных групп в РФ и за рубежом.

При распылении жидкости из специально подготовленных сопел формируется капельный поток, который попадая на нагретую поверхность, позволяет за счет изменения размера капель, скорости их движения и расхода жидкости управлять интенсивностью тепломассопереноса на импактной поверхности. Так, например, в ряде экспериментальных работ отмечается, что охлаждение спреем обеспечивает те же значения теплоотдачи, что и при струйном охлаждении, но при значительно меньшем массовом расходе охладителя. Проблема охлаждения системы двухфазным потоком на данный момент остается мало освещенной. Эта задача значительно сложнее по сравнению с однофазным течением из-за необходимости обеспечения равномерности капельного орошения охлаждаемой поверхности.

В зависимости от температуры охлаждаемой поверхности, могут существовать режимы, характеризующиеся принципиально разными процессами тепломассопереноса. Среди них можно выделить режимы плёночного течения с кипением, переходные режимы и режимы испарительного охлаждения.

Самостоятельный раздел среди методов газокапельного охлаждения занимают импульсные спреи. В имеющихся работах этого направления (A.L.N. Moreira, M.R. Panao, A.A. Pavlova, K. Otani, A.Ф. Серов, М.А. Пахомов и др.) показаны пределы изменения коэффициентов теплообмена при вариации длительности периодических импульсов и частоты их следования. В этом случае удастся организовать требуемые режимы течения жидкой пленки на теплообменной поверхности, в том числе и с полным испарением жидкой фазы. Однако протекающие при этом сопряженные нестационарные аэрогидродинамические и тепловые процессы являются исключительно сложными и требующими обширных исследований.

Большой объем экспериментальных работ посвящено исследованию формированию потока из различных сопел. Рассматривается геометрия кромок сопел на

формирование и размер капельного потока. Также, в последнее время возросло количество работ, в которых рассматриваются модифицированные поверхности: ребра различной высоты, лунки, шероховатость. Стоит отметить, что в большинстве работ представлены исследования с использованием одиночного сопла, тогда как в практических задачах необходимо охлаждать поверхности с большой площадью.

Проведенный обзор современного состояния вопроса показывает что, несмотря на большое количество работ, посвященных охлаждению систем капельным потоком, данных по изучению влияния системы струй в однофазной или двухфазной среде на интенсификацию теплообмена крайне мало. Еще меньше работ по исследованию охлаждения слабонагретой большой поверхности. Данные выводы позволили определить цель и сформулировать задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлено описание опытного стенда, методик измерения параметров и их обработки, а также проведен анализ неопределенностей измерений.

Экспериментальная установка, показанная на рисунке 1, состоит из теплообменника с цифровой системой регистрации интегральных параметров теплоотдачи и двухфазного импульсного источника охлаждающей смеси с автоматизированной системой управления капельным потоком. Теплообменник оборудован объемом, собирающим не испарившуюся часть охлаждающей жидкости, которая под действием гравитационных сил стекает с рабочей поверхности теплообменника. Дополнительно автоматизированная система установки позволяет регистрировать расходы и температуру газа и охлаждающей жидкости, давление в системе подачи воздуха и жидкости. На поверхности теплообменника установлены миниатюрные датчики локального теплового потока градиентного типа, емкостные сенсоры измерения толщины осажденной пленки жидкости и скорости волн на поверхности теплообменника.

Для исследования влияния параметров нестационарного газочапельного потока на тепломассоперенос было разработано оригинальное устройство многоструйного импульсного источника газочапельного потока. На плоской части инжектора в шахматном порядке расположены 16 жидкостных форсунок и 25 воздушных сопел. Форсунка с электромагнитным клапаном представляет собой пластинчатую диафрагму толщиной $h=0,5$ мм с четырьмя соплами диаметром $d=120$ мкм. На выходе жидкостные форсунки генерировали поток капель размером до 150 мкм. Так как расстояние до теплообменника составляло 230 мм во время движения газочапельного потока наблюдалось сначала дробление, за счет спутного потока, на более мелкие, а на подходе к поверхности формировался цуг капель с «головой» где средний размер капель составлял 120-160 мкм и «хвостом», капли размером 20-40 мкм. Выбранные геометрические характеристики, расстояние от источника до цели, и начальные условия, давление жидкости и газа, позволили сформировать равномерный газочапельный поток площадью 300x300 мм. Измерения однородности распределения ка-

пельного потока у поверхности теплообменника ($h=20$ мм) показали, что отклонение концентрации жидкости от среднего не превышают 5% на площади равной поверхности теплообменника. Расход жидкости через форсунку задается временем открытия электромагнитного клапана $T_{\text{имп}} = 2-50$ мс, частотой повторения $F = 0 - 25$ Гц и избыточным давлением жидкости на входе камеры $P_{\text{ж}} = 0.05- 0.2$ МПа .

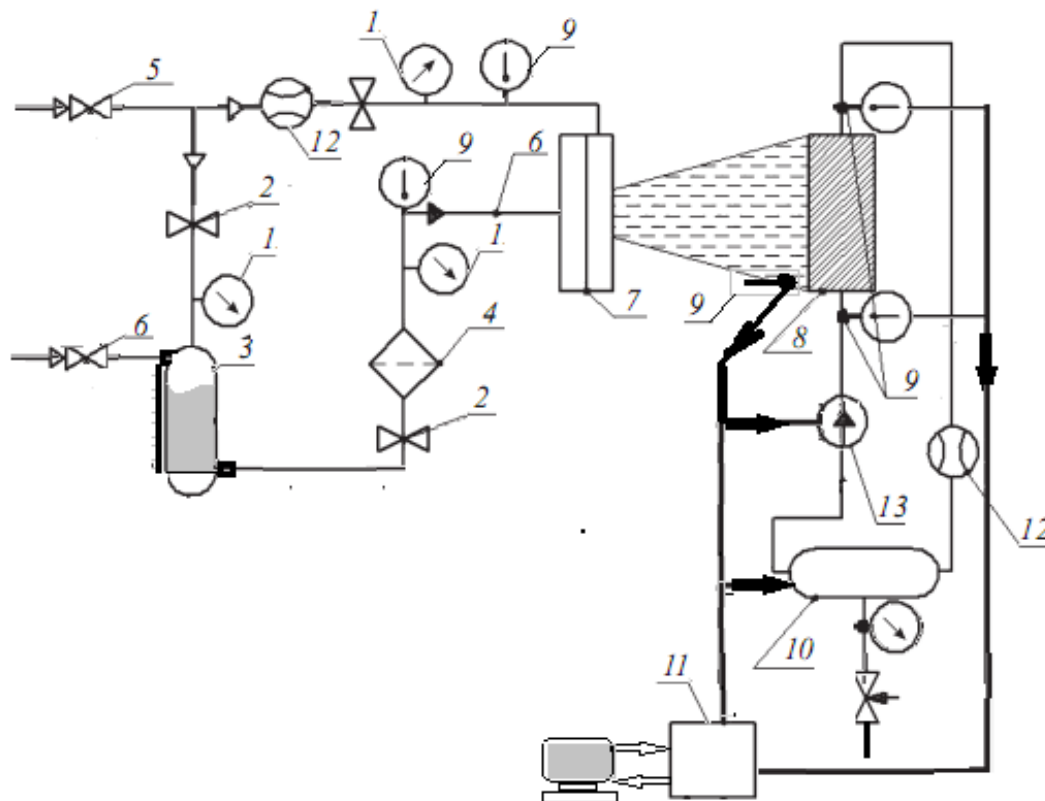


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки. 1 – манометр, 2 – вентиль, 3 – ёмкость объёмного расходомера охлаждающей жидкости, 4 – фильтр, 5 – воздушная магистраль, 6 – жидкостная магистраль, 7 – блок форсунок. 8 – рабочая поверхность теплообменника, 9 – температурный датчик, 10 – бак электробойлера. 11 – микропроцессорный блок термостата цифрового калориметра. 12 – расходомер. 13 – насос системы калориметра

Наличие отдельного управления подачей жидкости и газа в процессе проведения экспериментов позволяет формировать двухфазный поток с заданным в широком диапазоне соотношением масс жидкости и газа в потоке. Программа управления электромагнитными клапанами жидкостного инжектора позволяют изменять расход и порядок включения в работу выбранного сопла.

Основным элементом калориметра является плоский теплообменник с размерами в плане 140x140 мм и толщиной 30 мм. Рабочая поверхность изготовлена из меди марки М1 и имеет девять параллельных зигзагообразных внутренних каналов сечением (7x7мм), так что на поверхности выполнялось условие постоянства температуры $T_w = \text{const}$. Во всех экспериментах эта величина была неизменной и равной $T_w = 70^\circ\text{C}$.

Источником тепловой энергии является электрочувствительный котел с программным регулированием и максимальной мощностью 6 кВт. Калориметр построен по принципу регистрации в динамическом режиме количества теплоты, полученной теплообменным модулем от источника тепловой энергии. Боковые и задняя стенки теплообменника были теплоизолированы. Проведенный анализ неопределенности измерения интегрального теплового потока показал, что максимальная ее величина не превышает 5,7 %.

В центре поверхности теплообменника установлен датчик локального теплового потока с коэффициентом преобразования $k = 13,5$ мВ/Вт, $R = 2,06$ Ом и размерами сенсора $2,2 \times 2,2 \times 0,2$ мм³.

Чувствительность и частотные характеристики датчика теплового потока (до 1 кГц) позволяют определять параметры течения пленки при импульсном орошении поверхности и находить значения интегрального и локального коэффициентов теплоотдачи в широком диапазоне скважности и длительности импульсов.

В третьей главе представлены результаты исследования нестационарного теплообмена при натекании одиночного по времени импульса спрея различной длительности. Тем самым решалась задача о выборе оптимального режима теплообмена путем вариации значений длительности и частоты импульса для исключения возможности воздействия двух последовательных импульсов друг на друга. Измерение производилось градиентным датчиком теплового потока, установленным в центре теплообменной пластины. Результаты измерений представлены на рисунке 2 в виде изменения коэффициента теплоотдачи по времени от момента подачи одиночного импульса различной длительности.

Видно, что изменение величины h в зависимости от длительности импульса носит сложный характер. При подаче коротких импульсов $t_{имп} < 10$ мс кривые имеют единственный максимум, который наблюдается сразу же по достижению передним фронтом импульса теплообменной поверхности. При этом абсолютная величина максимального теплообмена не велика вследствие небольшого количества испарившейся жидкой фазы в коротких импульсах.

По мере возрастания длительности импульса $t_{имп} > 10$ мс изменение коэффициента теплоотдачи носит своеобразный двугорбый характер. Первый максимум имеет место при $t \approx 10$ мс, а второй при $t \approx 30$ мс практически независимо от длительности открытия клапана. Столь сложное поведение коэффициента теплоотдачи во времени обусловлено несколькими факторами, среди которых является интенсификация теплоотдачи за счет турбулизации пристенного слоя крупными каплями, а также их повторным возвращением к нагретой стенке после их отскока от поверхности.

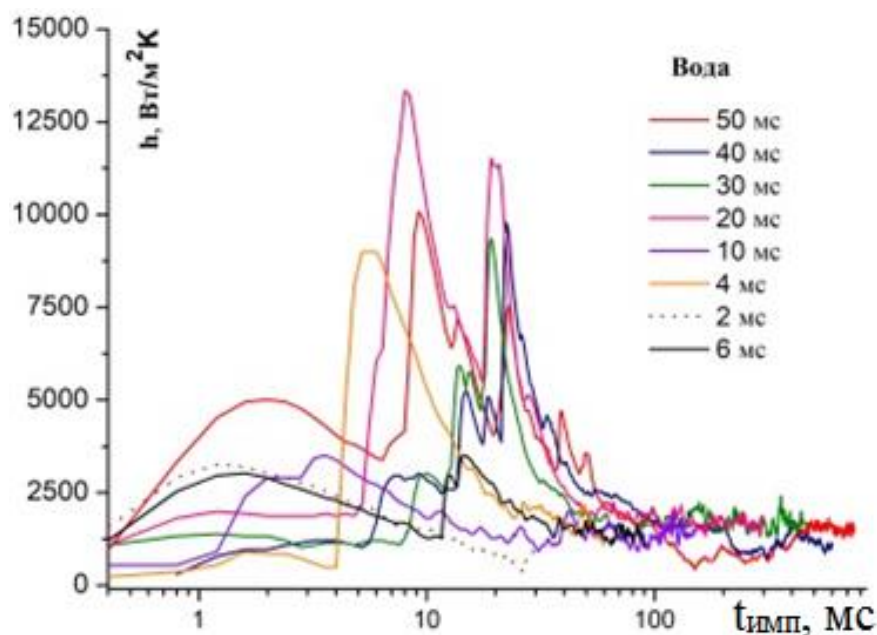


Рисунок 2 – Изменение коэффициента теплоотдачи во времени при натекании одиночного газокапельного импульса различной продолжительности

В пользу этого вывода говорят результаты визуализационных исследований процесса взаимодействия одиночного импульса с теплообменником. Продолжительность фазы повышенного теплообмена, в течение которой завершаются испарительные процессы на стенке, как правило, не превышает 100 мс. После этого теплоотдача стабилизируется по времени и ее величина соответствует примерно значению в лобовой точке импактных однофазных струй. Очевидно, что следующий импульс спрея целесообразно подавать по окончании этого периода, когда теплообменная поверхность освобождается от жидкой фазы.

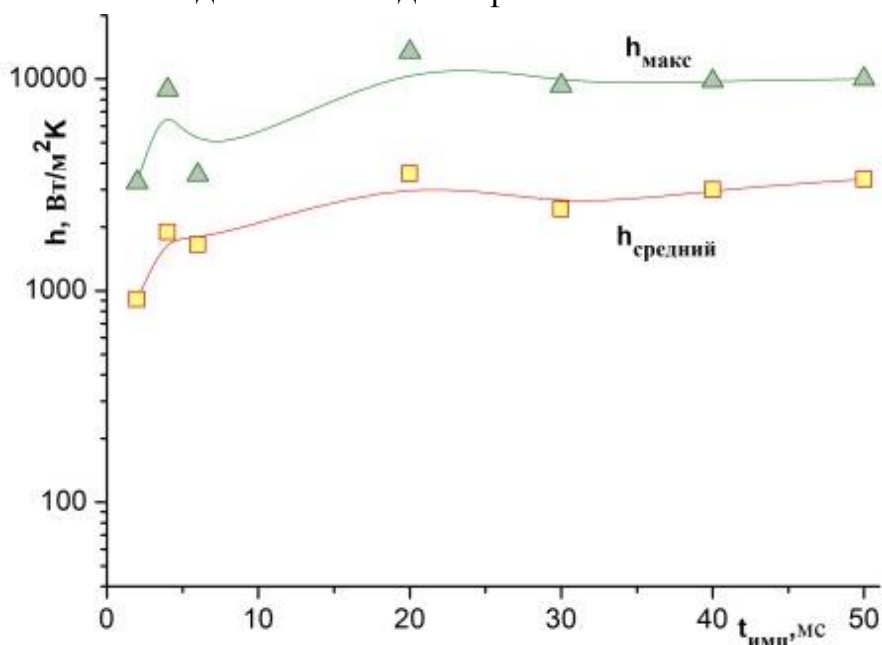


Рисунок 3 – Влияние длительности импульса спрея на максимальный и средний по времени коэффициенты теплоотдачи

Влияние длительности импульса спрея $t_{\text{имп}}$ на максимальный и средний по времени коэффициенты теплоотдачи демонстрируется на рисунке 3. При анализе данных следует иметь в виду, что массовая скорость жидкой фазы в период подачи импульса остается одной и той же независимо от длительности импульса. В то же время, общая масса жидкости, выбрасываемая инжектором за один импульс, прямо пропорциональна его длительности и это соотношение для самого длительного ($t_{\text{имп}} = 50$ мс) и самого короткого ($t_{\text{имп}} = 2$ мс) в опытах импульсов составляет большую величину $g_{50}/g_2 = 25$.

Несмотря на то, что масса инжектируемой жидкой фазы с ростом длительности импульса растет, что должно было, на первый взгляд, привести к большему вкладу в тепломассообмен испарительных процессов, на самом деле максимальная величина коэффициента теплоотдачи достигается при длительности фазы открытия $t_{\text{имп}} \approx 10$ мс, а тепловые потоки здесь приближаются к значению $q_w \sim 1$ МВт/м².

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 коэффициента теплоотдачи в зависимости от удельного расхода и давления в системах подачи воды и воздуха. Исследования показали, что при импульсном орошении спутный воздушный поток приводит к повышению эффективности охлаждения за счет возврата на поверхность теплообменника вторичных мелких капель, образующихся в процессе бомбардировки крупными каплями спрея. Теплоотдача при таком режиме охлаждения определяется суммой процессов: охлаждение воздушным и пленочным потоком и испарительного

$$q_w = q_l + q_g + q_j, \quad (1)$$

где: q_l – тепловой поток, снимаемый пленочным течением;

q_g – тепловой поток, снимаемый воздушным потоком;

$q_j = r \cdot j_w$ – тепловая энергия, расходуемая на испарение;

здесь r – удельная теплота испарения воды, а j_w – массовый поток жидкой фазы, попадающей на теплообменную поверхность.

На рисунке 4 представлены экспериментальные данные зависимости коэффициента теплообмена от интенсивности капельного потока и скорости спутного потока воздуха.

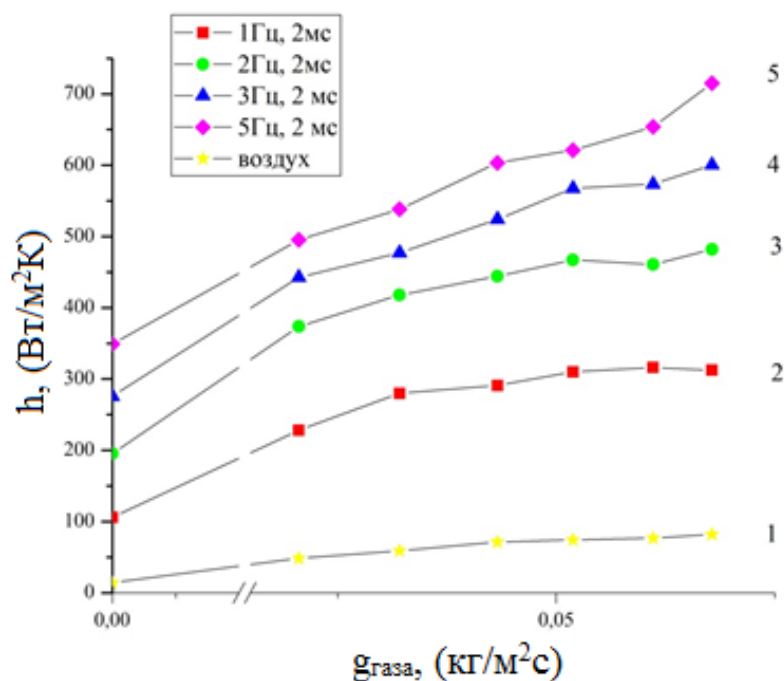


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента теплообмена от скорости спутного воздушного потока для разных расходов капельной фазы

Кривая 1 соответствует здесь интенсивности теплообмена для воздушной струи без капельного потока. Видно, что величина коэффициента теплоотдачи при охлаждении только потоком воздуха не высока. Но для капельного потока влияние спутного течения газа усиливается, и теплоотдача может возрасти в 2 раза. Это достигается за счет воздействия потока газа на сформировавшуюся пленку жидкости на поверхности и за счет возврата на поверхность отраженных вторичных капель.

Система регистрации течения пленки, построенная на видеонаблюдении, скоростной фотографии и данных многоканального емкостного регистратора о локальной толщине пленки, позволила выполнить измерения структуры течения на поверхности теплообменника. Визуализация показала, что для многоструйного спрея наблюдается значительное отличие от режима гравитационного стекания пленки по вертикальной стенке. В данном случае наблюдаются зоны со слабым разнонаправленным течением и область с интенсивным волновым течением, которое направлено от центра к периферии.

На рисунке 5 приведена общая картина течения образовавшейся пленки (Рисунок 5(а)) и карта скоростей (Рисунок 5(б)), полученная по данным измерений. В вытесненных к периферии потоках наблюдаются несколько различных видов трехмерных неустойчивостей, возникающих при малых числах Рейнольдса в различных зонах теплообменника. Оптические наблюдения показали, что вне выделенных областей А, D, C, D существуют устойчивые двух- и трехмерные волны малой амплитуды ($d\delta \sim 0,05 \text{ мм}$) с поперечной модуляцией вдоль потока.

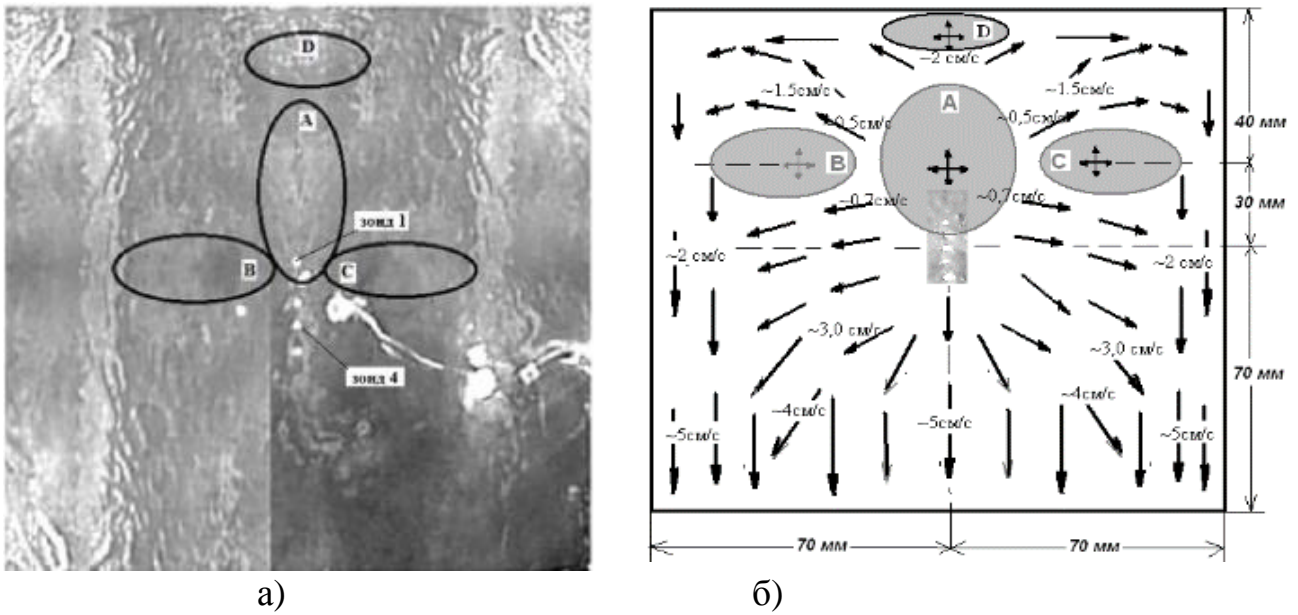


Рисунок 5 – Структура течения охлаждающей пленки жидкости: фото (а), топология и карта скоростей (б)

Особо выделены характерные зоны А,В,С,Д, где измерения показали слабое течение и отсутствие крупных волн. Изменение толщины пленки ($\delta_{\max} = 0,92\text{мм}$) в зоне А в пределах $d\delta = 0,06\text{ мм}$ в зонде №1 и $d\delta = 0,02\text{ мм}$ в области №2. Кроме медленных волн регистратор показал наведенную пульсацию, что можно отнести к движению очень слабых медленных волн амплитудой $d\delta = 0,06\text{ мм}$ от центра к краям теплообменника со скоростью $V = (0 - 0,01)\text{ м/с}$, $Re = (4 - 12)$ и частотой колебаний $F = (0,2 - 1)\text{ Гц}$.

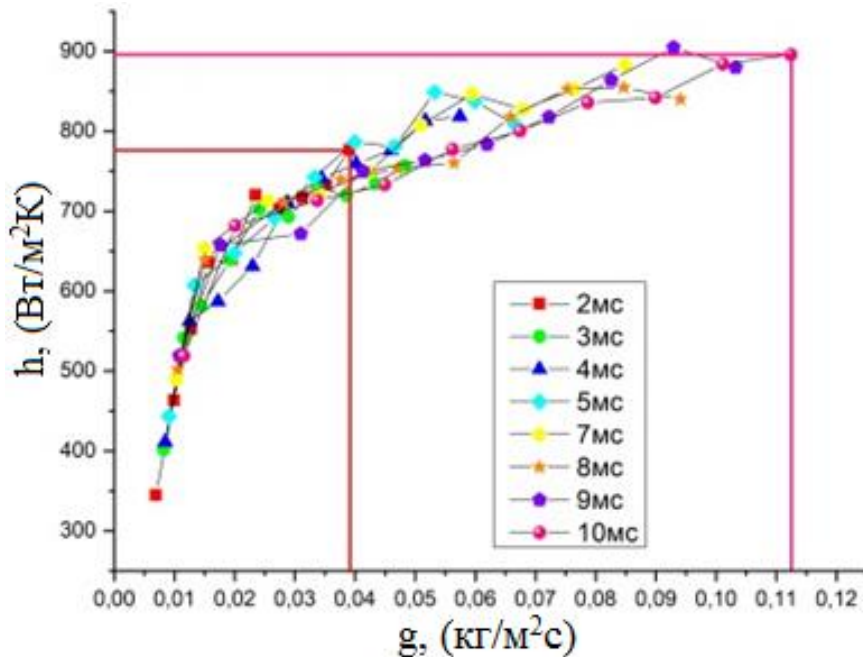


Рисунок 6 – Изменение коэффициента теплоотдачи от удельного расхода охлаждающей жидкости

Среднее по поверхности теплообменника значение коэффициента теплоотдачи определялось в опытах по формуле:

$$h_{cp} = q_w / (T_w - T_s), \tag{2}$$

где q_w - измеряемая плотность теплового потока, T_w и T_s – температуры стенки и насыщения капель спрея.

На рисунке 6 показана зависимость интегрального коэффициента теплоотдачи от удельного расхода охлаждающей жидкости. В экспериментах при постоянном начальном давлении газа и жидкости варьировались длительность импульса от 2 до 10 мс и частота повторений от 1 до 10 Гц. Как видно из рис. 6, максимальное нарастание коэффициента теплоотдачи имеет место при малых плотностях потока массы ($g < 0.04$ кг/м²с), соответствующее малым длительностям импульса и высокой скважности импульсного потока. При дальнейшем увеличении расхода жидкой фазы темп нарастания коэффициента теплоотдачи снижается и выходит на плато. Опытные данные, полученные при различных длительностях импульсов и частоте их следования, имеют тенденцию к обобщению, что говорит о преимущественном влиянии на теплообмен количества осаждаемой на поверхность капельной фазы.

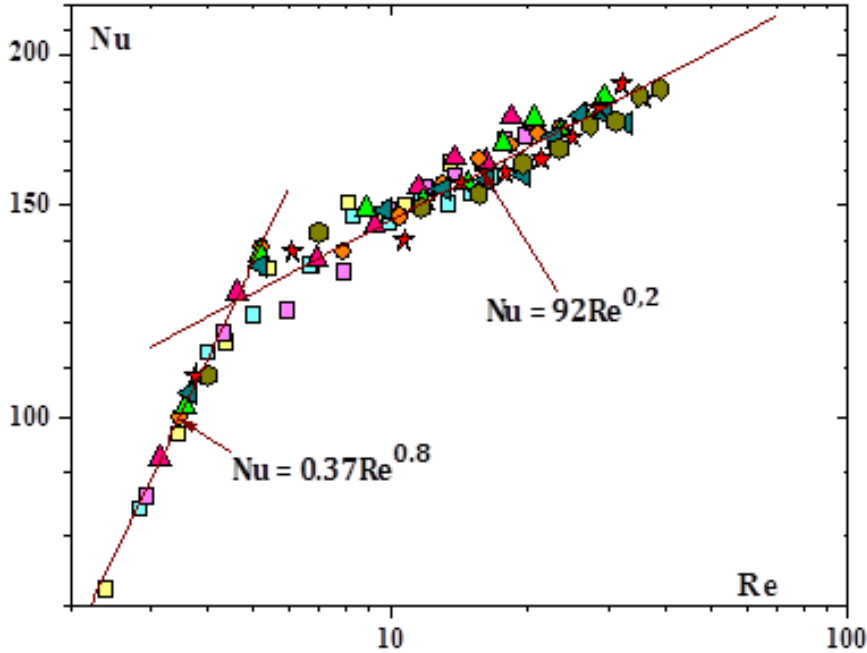


Рисунок 7 – Корреляционные соотношения для теплообмена спрея

Обобщение опытных данных по средней теплоотдаче представить в критериальном виде $Nu = f(Re)$, где число Нуссельта есть $Nu = hL/\lambda$, а число Рейнольдса рассчитывается по массовой скорости жидкой фазы $Re = gL/\mu$, то все они обобщаются. Результаты такой обработки демонстрируются на рис. 7. Здесь хорошо видны две характерные области поведения теплоотдачи: при малых орошениях ($Re < 5$), где показатель степени в законе теплообмена равен $n = 0.8$ и интенсивных потоках капельной фазы ($Re > 5$), где темп нарастания теплоотдачи снижается до $n = 0.2$.

Проведенный анализ опытных данных показал, что при использовании коротких импульсов достигается максимальный эффект с точки зрения использования всей охлаждающей жидкости, подаваемой из источника. Подтверждением тому служит поведение параметра тепловой эффективности η , характеризующего степень утилизации энтальпии спрея в процессе охлаждения. В общем случае, величина η равна отношению интегрального потока тепла через теплообменник к суммарному значению энтальпии спрея на выходе из форсунок:

$$\eta_m = \int_0^{t^*} q_i dt / \left\{ \int_0^{t^*} J_L \cdot [C_{pL}(T_W - T_S) + r] dt + \int_0^{t^*} J_G \cdot C_{pG}(T_W - T_S) dt \right\}, \quad (3)$$

В предельном случае полной утилизации энергии на поверхности теплообменника величина $\eta = 1$. При этом вся жидкая фаза, подаваемая через инжектор, превращается в пар, а температура парогазовой смеси принимает значение на стенке теплообменника.

Как показано на рисунке 8 наиболее полная утилизация осажденной жидкости наблюдается при коротких импульсах т.е. при малых расходах охлаждающей жидкости. Если время импульса увеличивается, то эффективность охлаждения резко снижается, что говорит об образовании толстых пленок на поверхности, в результате чего большая часть жидкости, стекает в виде пленки и ривулетов и в испарительном процессе не принимает участия. По этой причине режимы с продолжительными импульсами с точки зрения охлаждения не являются эффективными.

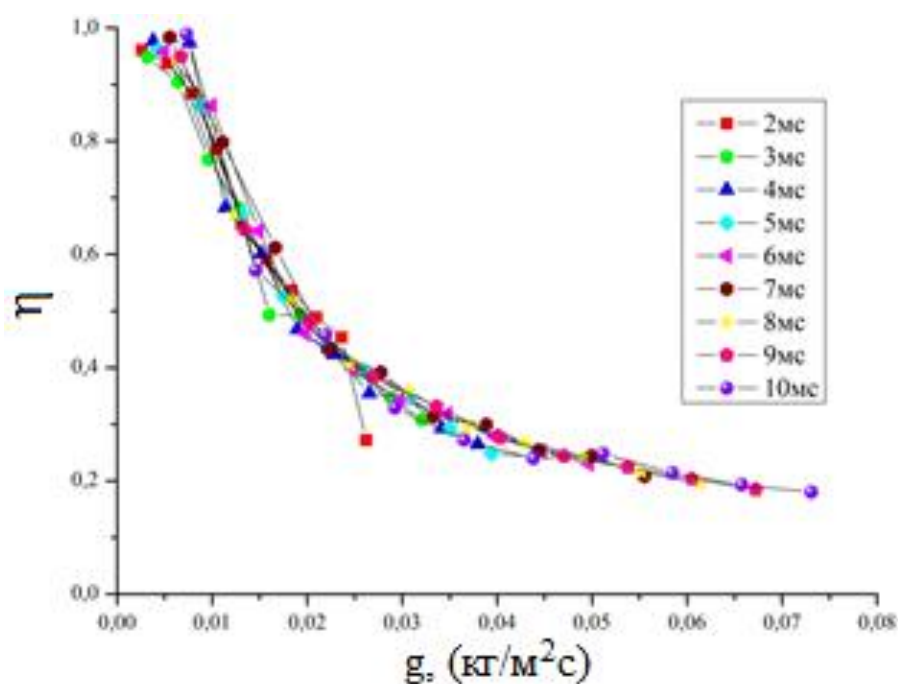


Рисунок 8 – Зависимость тепловой эффективности спрея от удельного расхода охлаждающей жидкости $P_{\text{газа}} - 0,5 \text{ атм}$, $P_{\text{жидкости}} - 0,5 \text{ атм}$

В пятой главе приведены данные о величине коэффициента теплоотдачи при использовании водно-спиртового раствора в качестве охлаждающей жидкости.

Отличие в скорости испарения компонентов раствора, а также теплоте испарения могут быть использованы в оптимизации характеристик охлаждающих спрей- систем. В работе были проведены опытные исследования теплообмена при различных концентрациях этанола в смеси с водой. Результаты измерений среднего коэффициента теплоотдачи для смеси этанол-вода демонстрируется на рисунке 9. Опыты были проведены во всем диапазоне изменения концентраций этанола в воде $K_1 = 0 \dots 96\%$ и длительностях импульсов подачи жидкости 2, 4 и 10 мс при частоте их следования 10 Гц, что соответствовало различным массовым расходам жидкости фазы, что и приводит к расслоению опытных данных в зависимости от длительности импульса.

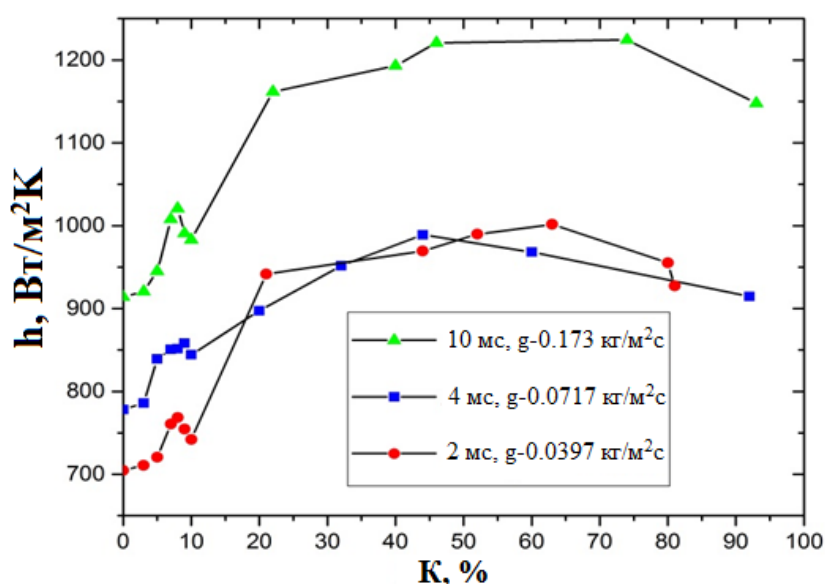


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от концентрации водно-спиртового раствора

Отметим главный вывод, следуемый из рисунка 9. Все опытные кривые независимо от длительности импульсов подачи спрея при величине концентрации этанола в растворе $K_1 \sim 50-60\%$ демонстрируют 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. Такое поведение коэффициента теплоотдачи объясняется как гидродинамическими особенностями взаимодействия капельной фазы с теплообменной поверхностью, так и различием теплофизических свойств компонентов смеси. Действительно, при малых содержаниях спирта из-за низкой фугитивности паров воды скорость испарения невелика. В области малых

концентраций этанола ($K_1 \sim 5-7\%$) также имеется локальный максимум, наблюдаемый ранее и при кипении данных растворов.

Эксперименты показали, что параметр тепловой эффективности спрея этанол-вода ведет себя совершенно иным по сравнению с коэффициентом теплоотдачи. Это наглядно следует из рисунка 10, где представлены данные, соответствующие условиям рисунка 9.

Действительно, зависимость $\eta = f(K_1)$ не имеет экстремума и непрерывно возрастает по мере увеличения содержания этанола в растворе и достигает максимума для чистого спирта. Причем эта тенденция наблюдается при всех исследованных длительностях импульса, что говорит о более высокой степени утилизации энергии охлаждающей жидкости, когда в качестве теплоносителя используется этанол, по сравнению с водой.

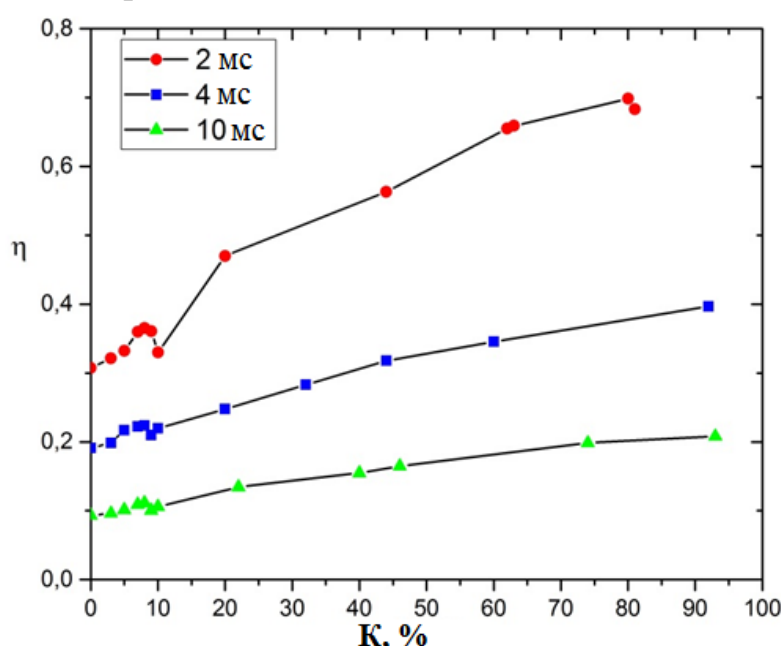


Рисунок 10 – Параметр тепловой эффективности водно-спиртового раствора

Действительно, зависимость $\eta = f(K_1)$ не имеет экстремума и непрерывно возрастает по мере увеличения содержания этанола в растворе и достигает максимума для чистого спирта. Причем эта тенденция наблюдается при всех исследованных длительностях импульса, что говорит о более высокой степени утилизации энергии охлаждающей жидкости, когда в качестве теплоносителя используется этанол, по сравнению с водой. Как видно, параметр η при импульсном способе охлаждения при малых временах импульса и при использовании в качестве охлаждающей жидкости этанола может достигать больших значений

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Впервые проведен комплекс экспериментальных исследований нестационарного теплообмена при взаимодействии импульсного многоструйного спрея с вертикальной поверхностью в режиме испарительного охлаждения. Изучено влия-

ние длительности импульса (2-50 мс), частоты их следования (1-50 Гц), давления газа на входе (0.05-0.2 МПа), его скорости (0 - 20 м/с) и состава капельной фазы на интенсивность теплообмена и параметр тепловой эффективности.

2. Установлено, что основным фактором, определяющим интенсивность теплообмена спрея, является массовая скорость охлаждающей жидкости. Полученные данные имеют тенденцию к обобщению, если в качестве характерной использовать среднюю массовую скорость жидкой фазы. При этом наибольшей эффективностью обладают потоки с малыми временами импульсов ($t_{\text{имп}} < 10$ мс). Параметр тепловой эффективности спрея также максимален при малых длительностях импульсов.

3. Наличие спутного потока газа оказывает интенсифицирующий эффект на теплоперенос (более чем в 2 раза). Это происходит в основном за счет турбулизации пристенного слоя и вторичного возврата капель, отраженных от теплообменной поверхности.

4. Изучена нестационарная теплоотдача от одиночного во времени импульса спрея различной длительности. Показано, что для коротких импульсов ($t_{\text{имп}} < 10$ мс) наблюдается один максимум теплового потока, приходящийся на момент столкновения цуга капель с поверхностью. Для длительных импульсов появляется еще один максимум, вызванный бомбардировкой каплями жидкой пленки. Для всех исследованных режимов продолжительность интенсивной теплоотдачи не превышает ~ 100 мс.

5. Опытные данные о влиянии состава охлаждающей жидкости показали, что при концентрации этанола в смеси $K_1 \sim 50 - 60\%$ коэффициент средней во времени теплоотдачи имеет максимум. При этом, несмотря на более высокий уровень скрытой теплоты парообразования у воды, его величина оказалась ниже, чем при использовании этанола, что объясняется более высокой скоростью его испарения. Параметр тепловой эффективности спрея возрастает по мере сокращения длительности импульсов подачи жидкой фазы и увеличения содержания этанола в бинарной смеси охлаждающей жидкости.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК):

1 **Карпов, П.Н.** Испарительное охлаждение импульсным спреем бинарного раствора этанола и воды / П.Н. Карпов, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов // Письма в ЖТФ, 2015, том 41, выпуск 14, С.8-15.

2 **Карпов, П.Н.** Импактная система охлаждения импульсным воздушно-капельным потоком / А.Ф. Серов, А.Д. Назаров, В.Н. Мамонов, Н.Б. Миськив, П.Н. Карпов // Теплофизика и Аэромеханика, 2021, 28, №5, С.731-738.

Статьи в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы Scopus и/или Web of Science

3 **Карпов, P.N.** Unsteady heat transfer at impinging of a single spray pulse with various durations / V.I. Terekhov, P.N. Karpov, A.D. Nazarov, A.F. Serov // Int. J. Heat and Mass Transfer.- 158.- 2020.- 120057.

4 **Карпов, P.** Hydrodynamics and heat and mass transfer during impact irrigation by a system of jets of a vertical surface of a heat exchanger / P. Karpov, A.Nazarov, A. Serov, V. Terekhov // Proc. 16th Int. Heat Transfer Conference. Beijing, 2018. С. 6837-6843.

5 **Карпов, P.** Heat and mass transfer are in the interaction of multi-pulsed spray with vertical surfaces in the regime of evaporative cooling / P. Karpov, A. Nazarov, A. Serov, V. Terekhov // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. - 2017. - 891. – 012031.

6 **Карпов, P.** Characteristics of the behavior of a liquid film in a pulsed gas-droplet flow / P. Karpov, N. Miskiv, A. Serov // MATEC Web of Conferences (STS-33). - 2017. - 115. – 08012.

Материалы конференций:

7 **Карпов, П.Н.** Экспериментальное исследование охлаждения импульсным воздушно - капельным потоком смеси этанол-вода / В.И. Терехов, А.Ф. Серов, А.Д. Назаров, П.Н. Карпов // Труды РНКТ – 6, 2014 г. Москва, С. 1084-1086.

8 **Карпов, П.Н.** Механизм нестационарного теплообмена при взаимодействии одиночного импульсного спрея с вертикальной поверхностью / П.Н. Карпов // Труды XX Школы-семинара молодых ученых под руководством А.И. Леонтьева, 2015, Звенигород. С. 200-203.

9 **Карпов, P.** Experimental investigation of transient characteristics of a liquid film, formed from an impinging gas-droplet multi-jet pulsed spray / P. Karpov, A. Nazarov, A. Serov, V. Terekhov // Int. Symp. and School for Young Scientists IPHT. - 2016. – Novosibirsk, Russia. – 2016. – P.110.

10 **Карпов, П.Н.** Влияние режима течения пленки на теплообмен импульсного много соплового спрея / П.Н. Карпов, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов // XV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену. – 23-26 мая, 2016. – Минск, Беларусь. – т.1. – С.110.

11 **Карпов, П.Н.** Гидродинамика пленки жидкости, осажденной из импульсного импактного газочапельного потока на вертикальной поверхности теплообменника / А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов, П.Н. Карпов, В.Н. Мамонов // Труды XV Минский междунар. форум по тепло- и массообмену – 23-26 мая, 2016. – Минск, – Том 3. – С.172-175.

12 **Карпов, П.Н.** Экспериментальное исследование охлаждения большой поверхности многоструйным импульсным газочапельным потоком в испарительном режиме / П.Н. Карпов, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов // Труды 7-ой РНКТ. Москва, 2018. С. 360-363.

13 **Карпов, П.Н.** Влияние ориентации в поле силы тяжести нестационарного спрея на его динамические и тепловые характеристики / П.Н. Карпов, А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов // В сборнике: Динамика Многофазных Сред. XIV Всероссийский семинар, приуроченный к 75-летию академика РАН Фомина В.М.. Под редакцией В.М. Фомина, А.В. Федорова. 2015. С. 186-188.

14 **Карпов, П.Н.** Экспериментальное исследование пленки жидкости, осажденной из импульсного импактного газочапельного потока вертикальной поверхности теплообменника / А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, П.Н. Карпов, В.И. Терехов, В.Н. Мамонов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 5. № 1. С. 44-50.

15 **Карпов, П.Н.** Влияние шероховатости вертикальной поверхности теплообменника на теплоотдачу при охлаждении импульсным газочапельным потоком / А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов, П.Н. Карпов, Н.Б. Миськив // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 5. № 1. С. 190-194.

16 **Карпов, П.Н.** Импульсный газочапельный поток / А.Д. Назаров, А.Ф. Серов, В.И. Терехов, П.Н. Карпов, Н.Б. Миськив // Динамика фаз и теплообмен Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 5. № 1. С. 185-189.

17 **Карпов, П.Н.** Экспериментальное исследование теплообмена при натекании одиночного импульсного газочапельного потока различной длительности / П.Н. Карпов, А.Ф. Серов, В.И. Терехов // В книге: Динамика многофазных сред. тезисы XVI Всероссийского семинара с международным участием. 2019. С. 74-76.

Подписано к печати 22.10. 2021 г. Заказ № 46, Формат 60×84/16.
Объем 1,22 усл. печатн. лист, Тираж 100 экз.

Отпечатано в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1