

На правах рукописи



Арзамасцев Алексей Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ДВУХФАЗНЫХ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ С
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ**

Специальность 01.04.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Тюмень – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель

Губарев Василий Яковлевич,
кандидат технических наук, профессор

Официальные оппоненты

Пахаруков Юрий Вавилович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный
нефтегазовый университет»
(г.Тюмень)

Пиралишвили Шота Александрович,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ,
ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева», заведующий кафедрой
общей и технической физики
(г.Рыбинск)

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный
технический университет» (г.Воронеж)

Защита состоится 13 ноября 2013 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.10 при ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15а, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет».

Автореферат разослан 11 октября 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.274.10

д.ф.-м.н.



Удовиченко С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время проблема охлаждения высокотемпературных поверхностей относится к одному из приоритетных направлений в энергетике и металлургии. Выбор в качестве охладителя двухфазного потока, имеющего разность температур на границе раздела фаз и возможность фазового перехода, позволяет существенно увеличить интенсивность процессов теплообмена. Но внедрение охлаждения высокотемпературных поверхностей двухфазными, в частности водовоздушными, потоками сдерживается отсутствием физико-математической модели, описывающей теплообмен при взаимодействии потока с поверхностью. Существующие в данной области исследования не содержат обобщающего анализа зависимости коэффициента теплоотдачи от параметров двухфазного потока. Указанная проблема определила актуальность данной работы, направленной на анализ процессов теплообмена при взаимодействии газочапельных потоков с высокотемпературными поверхностями и получение критериальных зависимостей для нахождения коэффициентов теплоотдачи.

Цель работы. Исследование особенностей теплообмена при взаимодействии двухфазных тонкодисперсных потоков с высокотемпературными поверхностями, получение критериальных зависимостей для нахождения коэффициентов теплоотдачи, анализ влияния параметров потока на значение коэффициента теплоотдачи.

В диссертационной работе **необходимо решить следующие задачи:**

1. Получить на основе теоретического анализа критериальные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи при ламинарном и турбулентном режимах течения двухфазных тонкодисперсных потоков для различных типов высокотемпературных поверхностей.

2. Выявить и проанализировать зависимости коэффициента теплоотдачи от значений параметров потока.

3. Провести сравнительный анализ полученных теоретическим путем результатов с имеющимися экспериментальными данными других авторов для различных типов высокотемпературных поверхностей.

Методологические основы исследований. Теоретической базой диссертационной работы являлись законы тепломассообмена и гидродинамики. Степень адекватности проверялась сравнением с экспериментальными данными других авторов.

Научная новизна работы.

1. Для ламинарного продольного обтекания высокотемпературной поверхности двухфазным газокапельным потоком предложено распределение температур в тепловом пограничном слое, на основании которого получено критериальное уравнение для определения коэффициента теплоотдачи, позволившее провести оценку влияния параметров двухфазного потока на величину коэффициента теплоотдачи.

2. Для ламинарного течения в высокотемпературном цилиндрическом канале двухфазного газокапельного потока при постоянном значении плотности теплового потока предложено распределение температур по радиусу канала, на основании которого получено критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи, позволившее оценить влияние параметров двухфазного потока на величину коэффициента теплоотдачи.

3. Для турбулентного режима при продольном обтекании высокотемпературной поверхности и для течения в высокотемпературных цилиндрических каналах двухфазных газокапельных потоков получены критериальные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи. Проведена оценка влияния параметров потока на величину коэффициента теплоотдачи. Введен коэффициент интенсификации теплообмена, равный отношению коэффициента теплоотдачи для двухфазного потока к коэффициенту теплоотдачи для чисто газового потока. Показана зависимость коэффициента интенсификации теплообмена от геометрической формы поверхности и параметров потока.

4. Показано, что примененный в диссертации подход может быть использован для расчета коэффициента теплоотдачи при взаимодействии двухфазных потоков с высоконагретыми поверхностями любой геометрической формы.

Практическая значимость работы. Полученные в работе критериальные уравнения дают возможность расчета и анализа теплообмена между высоконагретой поверхностью и двухфазным потоком, позволяют вычислить необходимые значения параметров потока, обеспечивающие требуемый коэффициент теплоотдачи, и могут быть использованы при разработке систем охлаждения высокотемпературных поверхностей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Критериальные зависимости по определению коэффициентов теплоотдачи при продольном обтекании высокотемпературных поверхностей тонкодисперсными двухфазными потоками для ламинарного и турбулентного режимов.

2. Критериальные уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи при ламинарном и турбулентном режимах течения тонкодисперсных двухфазных потоков в высоконагретых цилиндрических каналах.

3. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных для турбулентного течения в цилиндрическом канале.

4. Проверка методики расчета коэффициентов теплоотдачи путем проведения сравнительного анализа теоретических и экспериментальных данных для внешнего обтекания высокотемпературной поверхности двухфазным потоком.

Достоверность полученных результатов и выводов основана на использовании фундаментальных уравнений теоретической теплофизики, обусловлена корректной постановкой задачи, достаточной обоснованностью принятых допущений и обеспечена высокой степенью согласования экспериментальных данных других авторов и результатов расчетов.

Личный вклад автора состоит в предложении общего вида распределений температур для ламинарного продольного обтекания и ламинарного течения в цилиндрическом канале двухфазных потоков; получении на основании этих распределений критериальных зависимостей для нахождения коэффици-

ентов теплоотдачи; в нахождении для турбулентного продольного обтекания и течения внутри канала зависимостей для расчета введенного коэффициента интенсификации теплообмена, позволяющего проанализировать эффективность применения двухфазных потоков по сравнению с чисто газовыми. В опубликованных совместно с соавторами научных статьях вклад соавторов равноценен.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались на XVII Школе-семинаре молодых-ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблема газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях»; XVIII Школе-семинаре молодых-ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблема газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях»; XIX Школе-семинаре молодых-ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблема газодинамики и теплообмена в энергетических установках».

Публикации. По теме диссертационной работы опубликованы 7 работ, в том числе 3 работы в изданиях, имеющих аккредитацию ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, библиографического списка из 111 наименований. Работа содержит 120 страниц машинописного текста, 36 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели исследования, раскрыта научная новизна результатов и практическая ценность работы.

В первой главе проводится обзор и анализ работ, посвященных теплообмену для различных вариантов течения двухфазных потоков. Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных теплообмену в газожидкостной среде, отсутствуют аналитические зависимости, учитывающие влияние параметров потока на величину коэффициента теплоотдачи. Теоретическое исследование процессов теплообмена с последующим по-

лучением критериальных уравнений дает возможность расчета и анализа влияния параметров потока на процесс передачи тепла.

В главе рассмотрены особенности теплообмена при безотрывном обтекании высокотемпературной поверхности тонкодисперсным газожидкостным потоком. Поток характеризуется влажностью d (масса жидкости, отнесенная к массе содержащего ее газа), средним диаметром капель d_k , давлением P , скоростью потока w_0 . Температура поверхности превышает температуру Лейденфроста, то есть полностью исключен непосредственный контакт охлаждаемой поверхности с жидкокапельной компонентой потока.

Для тонкодисперсного газожидкостного потока аэродинамические силы, действующие на капли со стороны газовой фазы, значительно больше сил инерции, и скорость скольжения фаз при любом внезапном изменении скорости одной из них очень быстро стремится к нулю. В работе Нигматулина [1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.] показано, что если время межфазной релаксации (выравнивания скоростей фаз) значительно меньше характерного времени процесса, то можно применять односкоростную схему течения.

Используя методику расчета, предложенную в работе Губарева [2. Губарев В.Я. Условия применимости гомогенной модели течения двухфазных газожидкостных потоков: Механика и процессы управления / В.Я. Губарев // Труды XXXIII Уральского семинара, 2003. – С. 80 – 87.], получено, что максимальный диаметр капель, при котором турбулентный газожидкостный поток с заданными параметрами можно считать тонкодисперсным, равен:

$$d_{k,\max} = \frac{\rho_g \cdot (1+d) \cdot v_g \cdot 36000}{w_g \cdot \rho_k}. \text{ Минимальное значение } d_{k,\max} \text{ достигается при температуре поверхности } 350^\circ\text{C}, \text{ атмосферном давлении, влажности } 0,1 \text{ кг/кг},$$

скорости 50 м/с, и составляет 80 мкм. С увеличением значений температуры стенки, влажности, давления и уменьшением скорости $d_{k,\max}$ может быть заметно больше и составлять порядка нескольких сотен микрометров.

Для ламинарного режима течения в отсутствии пульсаций скорости можно считать поток тонкодисперсным при диаметре капель до 1 мм.

Согласно работе Терехова [З.Терехов В.И., Пахомов М.А. Теплоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках / В.И.Терехов, М.А. Пахомов. – Новосибирск. – 2009. – 284 с.], минимальное значение диаметра капель, при котором двухфазный поток можно считать тонкодисперсным, составляет 1 мкм.

Для описания теплообмена при тении тонкодисперсного потока использована гомогенная модель течения, суть которой состоит в замене реальной двухфазной среды гидродинамически гомогенной сплошной средой (смесью), имеющей средние эквивалентные параметры, и обоснована возможность использования этой модели. Все расчеты проводились только для конвективного теплообмена, без учета влияния излучения.

Капли рассматривались как внутренние отрицательные источники тепла. Интенсивность единичного стока (Вт) для капли сферической формы с температурой поверхности t_k определялась на основе решения для задачи теплопроводности через шаровую стенку при бесконечном внешнем радиусе: $Q_k = 2 \cdot \pi \cdot \lambda_r \cdot d_k \cdot (t_k - t_r)$, где λ_r – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); t_r – температура газа, °С.

Распределение температур для неподвижной газожидкостной среды без учета влияния диффузии будет находиться из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{a_r} \cdot \frac{\partial t_r}{\partial \tau} &= \nabla^2 t_r - b^2 \cdot (t_r - t_k) \\ \frac{\partial t_k}{\partial \tau} &= \frac{12 \cdot \lambda_r \cdot (t_r - t_k)}{c_k \cdot \rho_k \cdot d_k^2}, & t_k \leq t_{\text{нас}}, & d_k = d_{k0} \\ \frac{\partial d_k}{\partial \tau} &= \frac{4 \cdot \lambda_r}{r \cdot \rho_k \cdot d_k} \cdot (t_r - t_k), & t_k = t_{\text{нас}}, & d_k > 0 \\ \frac{\partial d}{\partial \tau} &= \frac{\lambda_r \cdot b^2}{r \cdot \rho_r} \cdot (t_r - t_k), & t_k = t_{\text{нас}}, & d_k > 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $b = \frac{3,46}{d_k} \cdot \left(\frac{\rho_r \cdot d}{\rho_k} \right)^{0,5} \text{ м}^{-1}$ – параметр, характеризующий внутренние стоки тепла; ρ_r, ρ_k – плотность газа и капли соответственно, кг/м³; c_k – теплоемкость

капельной фазы, Дж/(кг·К); r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; $t_{\text{нас}}$ – температура насыщения, °С; τ – время, с.

Система уравнений (1) решалась методом конечных разностей с шагом по толщине $h = 2 \cdot d_k$ (так как это минимальный шаг, при котором можно рассматривать каплю как целый элемент) и по времени $\Delta\tau = 10^{-4}$ с (выбран с учетом обеспечения сходимости решения).

Показано, что практически мгновенно устанавливается стабильное распределение температур, практически не изменяющееся до $0,8 \cdot \tau_0$ (τ_0 – время прогрева и полного испарения капель в пристеночном слое толщиной 2 диаметра капли). Затем на распределение температур будет оказывать влияние формирующийся у поверхности паровой подслоя.

Сделано предположение, что до начала формирования парового подслоя реализуется квазистационарный режим теплопроводности, при котором диаметр и температура капель приняты постоянными. Постоянство температуры капель основано на том, что у поверхности при высоких температурах газа изменением температурного напора $\vartheta = t_r - t_k$ можно пренебречь и принять температуру капель постоянной.

Принятые допущения позволили свести систему уравнений (1) к решению дифференциального уравнения теплопроводности с внутренними отрицательными источниками тепла:

$$\nabla^2 \vartheta - b^2 \cdot \vartheta = 0 . \quad (2)$$

Расчет распределения температуры газовой фазы в пограничном тепловом слое показывает хорошее совпадение результатов, полученных при численном решении системы уравнений (1) и аналитическом решении уравнения (2) для квазистационарного периода.

В главе также была проведена интервальная оценка времени полного диффузионного испарения капель. Показано, что время полного диффузионного испарения капель намного превышает время существования квазистационарного режима, что позволяет подтвердить правильность предположения о незначительном влиянии процессов диффузии на тепломассообмен до начала ин-

тенсивного испарения капель. Так, для влагосодержания 10 кг/кг и диаметра капель 100 мкм время существования квазистационарного режима составляет 0,12 с, время полного диффузионного испарения капель лежит в пределах от 4,1 до 23,4 с, а изменение диаметра капли за время существования квазистационарного режима составляет не более 3% от начального значения.

Принятые допущения позволили свести задачу теплообмена к решению дифференциального уравнения теплопроводности с внутренними отрицательными источниками тепла. Используя значение коэффициента теплоотдачи к газовой компоненте для однофазного течения и решение дифференциального уравнения (2), позволяющее оценить вклад капельной компоненты двухфазного потока, можно найти значение общего коэффициента теплоотдачи.

Полученные выводы относятся к монодисперсным потокам. Реальные газожидкостные потоки представляют собой полидисперсные системы с возможными вариантами различных комбинаций как гомогенного, так и раздельного течения. Газожидкостный поток в этом случае можно представить как гомогенное течение мелкодисперсной фазы, в котором выделяется раздельное движение крупных капель.

Во второй главе рассмотрен теплообмен при продольном обтекании двухфазным потоком высокотемпературной поверхности.

При ламинарном продольном обтекании толщина гидродинамического погранслоя находится по той же формуле, что и для чисто газового потока. Температурной погранслоем принят равным гидродинамическому. Температура капель равна температуре потока за пределами теплового погранслоя: $t_k = t_0$.

При нахождении распределения температуры в тепловом погранслое двухфазного потока использовались те же принципы, что и для чисто газового потока, дополненные учетом влияния капельной фазы.

Предложено распределение температуры для газочапельного потока в виде: $\theta = C_1 \cdot e^{-b \cdot y} + C_2 \cdot y^3 + C_3 \cdot y + C_4$, где $C_1, C_2, C_3, C_4 = const$.

Распределение температуры должно удовлетворять следующим граничным условиям: $\vartheta(y=0) = \vartheta_0$, $\vartheta(y=\delta) = 0$, $\frac{d\vartheta}{dy}(y=\delta) = 0$, $\frac{d^2\vartheta}{dy^2}(y=0) = b^2 \cdot \vartheta_0$, где δ – толщина теплового погранслоя, м.

В этом случае распределение температуры для газожидкостного потока в пределах теплового погранслоя будет иметь вид:

$$\vartheta = \vartheta_0 \cdot e^{-b \cdot y} + y^3 \cdot \vartheta_0 \cdot \left(\frac{(b \cdot \delta + 1) \cdot e^{-b \cdot \delta}}{2 \cdot \delta^3} \right) + y \cdot \vartheta_0 \cdot \left(-0,5 \cdot b \cdot e^{-b \cdot \delta} - \frac{1,5}{\delta} \cdot e^{-b \cdot \delta} \right).$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки к двухфазному потоку находится по формуле: $\alpha_{\text{двухф}} = \alpha_{\text{к}} + C \cdot \alpha_{\text{г}} + 0,5 \cdot C \cdot \alpha_{\text{к}} = \alpha_{\text{к}} \cdot (1 + 0,5 \cdot C) + C \cdot \alpha_{\text{г}}$, (3)

где $\alpha_{\text{к}} = \lambda_{\text{г}} \cdot b$ – коэффициент теплоотдачи к капельной компоненте потока, находится из решения уравнения (1), Вт/(м²·К); $\alpha_{\text{г}}$ – коэффициент теплоотдачи к газовой фазе, находится по известной формуле для чисто газового потока, Вт/(м²·К); $C = e^{-b \cdot \delta}$.

Будем считать влияние одной из фаз доминирующим, если коэффициент теплоотдачи к этой фазе составляет не менее 90% от общего коэффициента теплоотдачи. Тогда можно сделать следующие выводы: при $x \leq x_{\text{г}}$ коэффициент теплоотдачи не зависит от капельной фазы; при $x \geq x_{\text{к}}$ коэффициент теплоотдачи определяется только капельной компонентой потока; при $x_{\text{г}} \leq x \leq x_{\text{к}}$ коэффициент теплоотдачи зависит как от капельной фазы, так и от газовой фазы. Значения характерных координат будут находиться по формулам: $x_{\text{г}} = \frac{0,03}{b^2} \cdot \frac{w_0}{\nu_{\text{г}}}$,

$x_{\text{к}} = \frac{0,25}{b^2} \cdot \frac{w_0}{\nu_{\text{г}}}$, где $\nu_{\text{г}}$ – кинематическая вязкость газа, м²/с.

Для $x \leq x_{\text{г}}$: $Nu_x = 0,33 \cdot Re_x^{0,5}$, определяющим размером является продольная координата x . Для $x \geq x_{\text{к}}$: $Nu_d = 3,46 \cdot \bar{d}^{0,5}$ определяющим размером является диаметр каплей, где $\bar{d} = \frac{d \cdot \rho_{\text{а}}}{\rho_{\text{г}}}$ – относительное влагосодержание.

Приняв: $\varepsilon = \frac{\alpha_{\text{к}}}{\alpha_{\text{г}}}$, для $x_{\text{г}} \leq x \leq x_{\text{к}}$ уравнение (3) может быть преобразовано в следующие критериальные уравнения:

$$Nu_d = 3,46 \cdot \bar{d}^{0,5} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} \cdot e^{-1,5 \cdot \varepsilon} + 1 + 0,5 \cdot e^{-1,5 \cdot \varepsilon} \right),$$

$$Nu_x = 0,33 \cdot Re_x^{0,5} \cdot \left(e^{-1,5 \cdot \varepsilon} + \varepsilon + 0,5 \cdot \varepsilon \cdot e^{-1,5 \cdot \varepsilon} \right).$$

Оба эти уравнения идентичны и при расчете коэффициента теплоотдачи дают одинаковые значения.

После начала испарения капля у стенки образуется однофазный газопаровой слой, отделяющий двухфазный поток от охлаждаемой поверхности. При расчетах предполагалось, что все подведенное тепло пошло на испарение капель и увеличение толщины парового слоя.

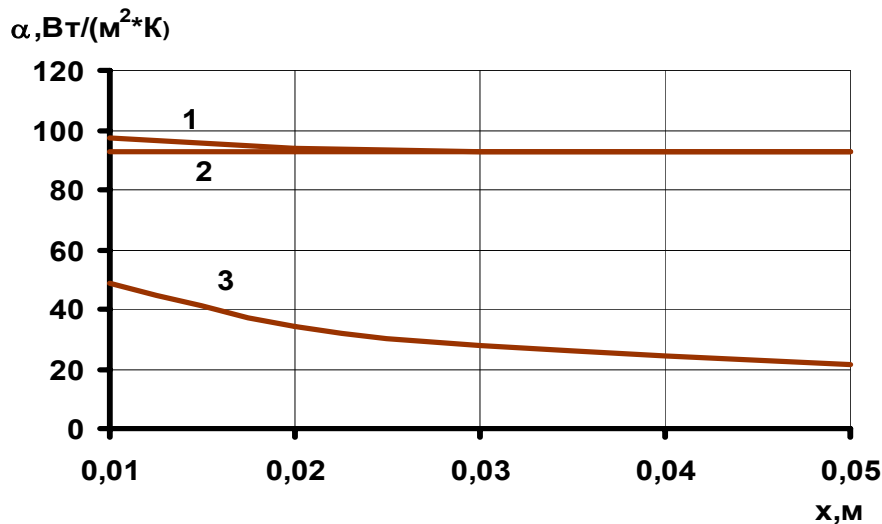


Рис.1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от продольной координаты x при диаметре каплей $d_k=75$ мкм, влагосодержании $d=5$ кг/кг, скорости $w=5$ м/с:
1- $\alpha_{\text{двухф}}$; 2- $\alpha_{\text{к}}$; 3- $\alpha_{\text{г}}$.

Толщина газопарового подслоя будет находиться по формуле:

$$\delta_{\text{п}} = \frac{1}{b} \cdot \left[\left(\frac{2 \cdot \lambda_{\text{п}} \cdot g_0 \cdot b^2}{r \cdot \rho_{\text{п}} \cdot d} \cdot \tau + 1 \right)^{0,5} - 1 \right], \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{п}}$ — теплопроводность пара, Вт/(м·К); $\rho_{\text{п}}$ — плотность пара, кг/м³; r — скрытая теплота парообразования, Дж/кг; τ — время, прошедшее с начала испарения, с.

Коэффициент теплоотдачи к капельной фазе равен:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{\lambda_{\text{г}} \cdot b}{b \cdot \delta_{\text{п}} + 1}. \quad (5)$$

Общий коэффициент теплоотдачи в этом случае будет находиться по формуле (3), коэффициент теплоотдачи к капельной фазе по формуле (5), а толщина газопарового слоя по формуле (4).

При турбулентном продольном обтекании высокотемпературной поверхности двухфазным потоком непосредственно у стенки образуется вязкий ламинарный чисто газовый подслой, через который происходит передача тепла от высоконагретой поверхности к ядру потока. В дальнейших расчетах тепловой подслоя принимался равным гидродинамическому. Теплообмен при продольном турбулентном обтекании характеризуется квазистационарным режимом теплопроводности. Принималось, что тепловой поток через тепловой подслоя q_n на его внешней границе отводится как турбулентным переносом газовой фазы q_T , так и тепловым потоком к жидкой фазе q_K , возникающим за счет разрыва температур газовой и жидкой компонент потока: $q_n = q_T + q_K$.

Тогда критериальное уравнение для нахождения коэффициента теплоотдачи при течении двухфазного потока будет иметь вид:

$$Nu_{\text{двухф}} = Nu_{\Gamma} \cdot \beta = 0,0296 \cdot Re^{0,8} \cdot \beta,$$

где β – отношение между коэффициентами теплоотдачи при течении газожидкостного и чисто газового потоков: $\beta = \frac{1 + \varepsilon}{1 + 2,06 \cdot Re^{-0,1} \cdot \varepsilon}$;

$\varepsilon = \frac{q_K}{q_T} = 33,78 \cdot b \cdot x \cdot \frac{Re_x^{0,2} - 2,06 \cdot Re_x^{0,1}}{Re_x}$ – отношение теплового потока к жидкой фазе к тепловому потоку при турбулентном переносе.

Минимальное значение $\beta = 1$ будет достигаться при течении чисто газового потока, когда $\varepsilon = 0$; при $\varepsilon \rightarrow \infty$ максимальное значение $\beta_{\text{max}} = 0,48 \cdot Re^{0,1}$.

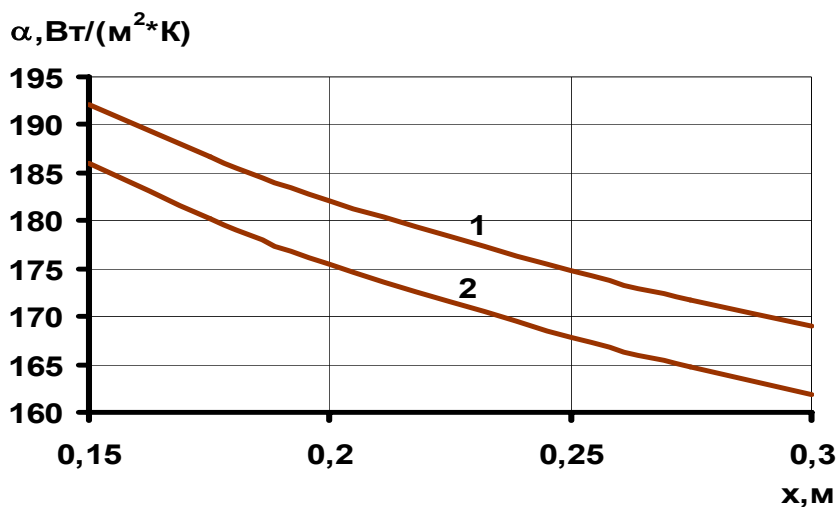


Рис.2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от продольной координаты x при $w=50$ м/с, $d=1$ кг/кг, $d_k=100$ мкм: 1- $\alpha_{\text{двухф}}$; 2- α_{Γ}

В третьей главе рассмотрен теплообмен при течении двухфазных потоков в высокотемпературных цилиндрических каналах.

При ламинарном стабилизированном течении тонкодисперсного двухфазного потока в высокотемпературном цилиндрическом канале задана температура поверхности в начале участка стабилизации, плотность теплового потока полагается постоянной $q_c = const$, при этом само значение q_c неизвестно.

При расчете коэффициента теплоотдачи и распределения температур использованы те же принципы расчета, что и для чисто газового потока, дополненные учетом влияния капельной фазы. Температура в центре трубы в начале участка тепловой стабилизации равна температуре капель. Предложено распределение температур по радиусу канала для течения двухфазного потока:

$\theta_{\text{двухф}} = \theta_r \cdot \frac{J_0(i \cdot b \cdot R)}{J_0(i \cdot b \cdot R_{\text{тр}})}$, где $\theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0}$ – относительный перепад температур, θ_r – относительный перепад температур для чисто газового потока; $R, R_{\text{тр}}$ – текущее значение полярного радиуса и радиус трубы соответственно, м.

Значение коэффициента теплоотдачи для двухфазного потока:

$$\alpha_{\text{двухф}} = \alpha_k + \alpha_r, \quad (6)$$

где $\alpha_k = \lambda_r \cdot b \cdot \frac{-i \cdot J_1(i \cdot b \cdot R_{\text{тр}})}{J_0(i \cdot b \cdot R_{\text{тр}})}$ – коэффициент теплоотдачи к капельной компоненте потока, Вт/(м²·К);

$\alpha_r = \frac{\lambda}{R_{\text{тр}}} \cdot \frac{1,33 + 5,33 \cdot Fo}{1 + 5,33 \cdot Fo}$ – коэффициент теплоотдачи к

газовой фазе, Вт/(м²·К); $Fo = \frac{a \cdot \tau}{R_{\text{тр}}^2}$ – критерий Фурье; $\tau = \frac{x}{w_0}$, с – время, за кото-

рое поток пройдет расстояние x от начала участка стабилизации, м.

Выражение (6) можно преобразовать в критериальное уравнение, где в качестве характерного размера принят диаметр трубы:

$$Nu = \frac{2,66 + 10,66 \cdot Fo}{1 + 5,33 \cdot Fo} \cdot (1 + \varepsilon),$$

где $\varepsilon = b \cdot R_{\text{тр}} \cdot \frac{-i \cdot J_1(i \cdot b \cdot R_{\text{тр}})}{J_0(i \cdot b \cdot R_{\text{тр}})} \cdot \frac{1 + 5,33 \cdot Fo}{1,33 + 5,33 \cdot Fo}$ – коэффициент, равный отноше-

нию теплового потока к капельной фазе к тепловому потоку для газовой фазы.

Плотность теплового потока при заданной температуре стенки в начале квазистационарного участка и коэффициенте теплоотдачи для $Fo = 0$ определяется по формуле:

$$q_c = \lambda \cdot \left[b \cdot \frac{-i \cdot J_1(i \cdot b \cdot R_{тр})}{J_0(i \cdot b \cdot R_{тр})} + \frac{1,33}{R_{тр}} \right] \cdot \vartheta_0(x=0).$$

При турбулентном течении двухфазного потока в высокотемпературном цилиндрическом канале тепло от стенки к ядру потока передается через находящийся у поверхности вязкий ламинарный чисто газовый подслой. В дальнейших расчетах тепловой подслои принимался равным гидродинамическому. Тепловой поток теплопроводностью через тепловой подслои $q_{п}$ на его внешней границе будет отводиться турбулентным переносом газовой фазы $q_{т}$ и тепловым потоком к капельной компоненте $q_{к}$, то есть: $q_{п} = q_{т} + q_{к}$.

Критериальное уравнение для нахождения коэффициента теплоотдачи при течении двухфазного потока будет иметь вид:

$$Nu_{\text{ааооо}} = Nu_{\text{а}} \cdot \beta = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot \beta, \quad (7)$$

где β – коэффициент интенсификации теплообмена: $\beta = \frac{1 + \varepsilon}{1 + 0,76 \cdot Re^{-0,1} \cdot \varepsilon}$;

$\varepsilon = \frac{q_{к}}{q_{т}} = 43,47 \cdot b \cdot d_{тр} \cdot \frac{Re_d^{0,2} - 0,76 \cdot Re_d^{0,1}}{Re_d}$ – отношение теплового потока к жидкой фазе к тепловому потоку при турбулентном переносе.

Минимальное значение $\beta = 1$ будет достигаться для чисто газового потока, когда $\varepsilon = 0$; при $\varepsilon \rightarrow \infty$ максимальное значение: $\beta_{\text{max}} = 1,31 \cdot Re^{0,1}$.

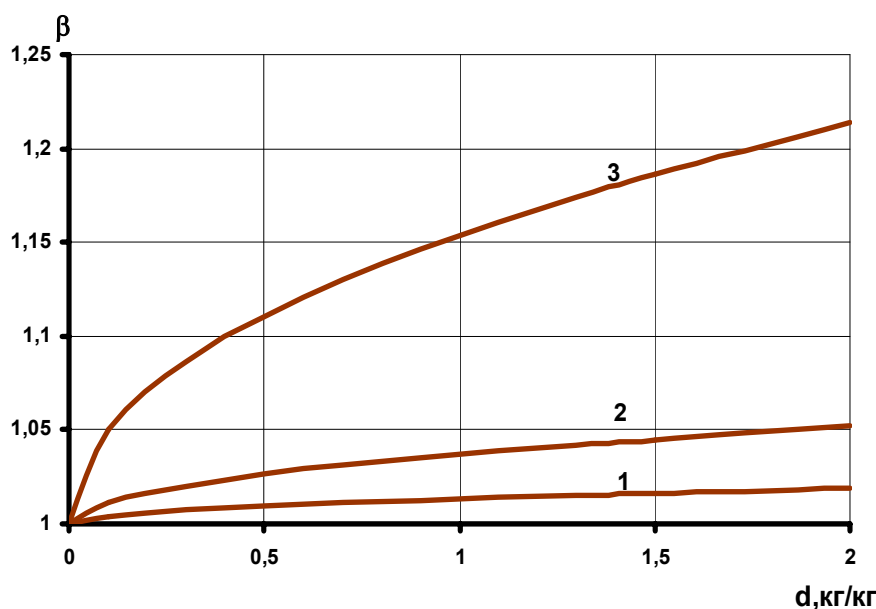


Рис.3. Зависимость коэффициента β от влагосодержания:
 1- $d_{к}=100$ мкм, $P=5$ атм;
 2- $d_{к}=50$ мкм, $P=10$ атм;
 3- $d_{к}=20$ мкм, $P=30$ атм

При турбулентном течении двухфазного тонкодисперсного газочапельного потока в высокотемпературном канале после нагрева до температуры насыщения капли начинают испаряться. В ходе испарения происходит уменьшение диаметра капель и влагосодержания, что приводит к снижению теплового потока к капельной фазе. Критериальное уравнение (7) можно использовать и для расчетов при испарении капель. При этом предполагается, что все подведенное тепло пошло на испарение капель, а весь образовавшийся пар остается в ядре потока, что приводит к увеличению критерия Рейнольдса за счет возрастания скорости потока и уменьшению коэффициента интенсификации теплообмена β за счет снижения влагосодержания.

В четвертой главе проведено сравнение полученных в диссертации критериальных зависимостей для нахождения коэффициента теплоотдачи с результатами известных экспериментальных исследований.

В подавляющем большинстве экспериментальных работ, посвященных теплообмену в двухфазной среде, отсутствуют полные данные о значениях параметров потока, определяющих интенсивность теплообмена (влагосодержание, температура поверхности, средний диаметр капель), что приводит к серьезным затруднениям при проведении сравнительного анализа.

Этих недостатков лишено экспериментальное исследование [4.Хутская Н.В. Связь между коэффициентами теплоотдачи и трения при турбулентном режиме двухфазного потока / Дейч М.Е., Н.В. Хутская // Теплоэнергетика. – 1988.– №2. – С. 22–25.], посвященное получению связи между коэффициентами теплоотдачи и трения при турбулентном течении двухфазного потока в трубе. В данной работе получены графики критериальных зависимостей $Nu = f(Re)$ для двухфазных потоков при влагосодержании 0,01 – 0,12 кг/кг, атмосферном давлении и среднем диаметре капель 100 мкм. Погрешность определения коэффициента теплоотдачи в экспериментах составляет около 5 % .

В результате экспериментов [4] показано, что для двухфазного потока коэффициент теплоотдачи пропорционален $Re^{0,9}$, как и в расчетных данных. Относительно небольшие значения погрешностей (не более 12%), а также совпа-

дение в общем виде критериальной зависимости для коэффициента теплоотдачи позволяют сделать вывод о высокой степени согласования между данными расчета и результатами экспериментов.

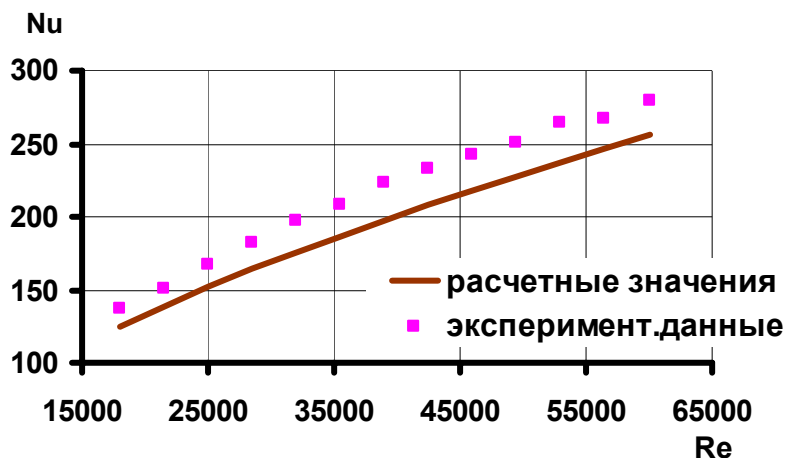


Рис.4. Зависимость Nu от Re для влагосодержания 0,12 кг/кг

При турбулентном обтекании различных типов геометрической

поверхности двухфазным потоком и наличии непосредственно у обтекаемой поверхности вязкого ламинарного чисто газового подслоя, через который происходит перенос тепла от высоконагретой стенки к ядру потока, зависимости для нахождения коэффициента интенсификации теплообмена β для разных поверхностей являются подобными, отличаясь лишь выбранным характерным размером и значением констант. Поэтому сделано предположение, что для соответственных характерных размеров отношение коэффициентов интенсификации теплообмена для поперечного и продольного обтекания будет оставаться

приблизительно постоянным: $\chi = \frac{\beta_{\text{поп}}}{\beta_{\text{прод}}} \approx const.$

При выборе экспериментальной работы для проведения сравнительного анализа необходимо руководствоваться наличием данных обо всех значениях параметров двухфазного потока. Этому условию удовлетворяет работа [5. Ермаков О.Н. Комплексное определение гидравлических и теплотехнических параметров водовоздушного охлаждения непрерывнолитых слитков / О.Н. Ермаков [и др.] // Сталь. – 1987. – №6. – С. 24 – 27.], в которой приведены зависимости параметров потока от конструктивных параметров установки для поперечного обтекания двухфазным потоком высоконагретой пластины. Погрешность определения коэффициента теплоотдачи в экспериментах составляет около 8 %. Сравнение полученных расчетным путем результатов для продольного обтека-

ния с экспериментальными данными работы [5] для поперечного обтекания показывает, что значение коэффициента $\chi \approx 1,2$ остается приблизительно постоянным и колеблется в небольших пределах. Это позволяет сделать вывод о применимости использованного подхода к расчету процесса теплообмена для безотрывного обтекания двухфазным потоком высокотемпературной поверхности любой геометрической формы.

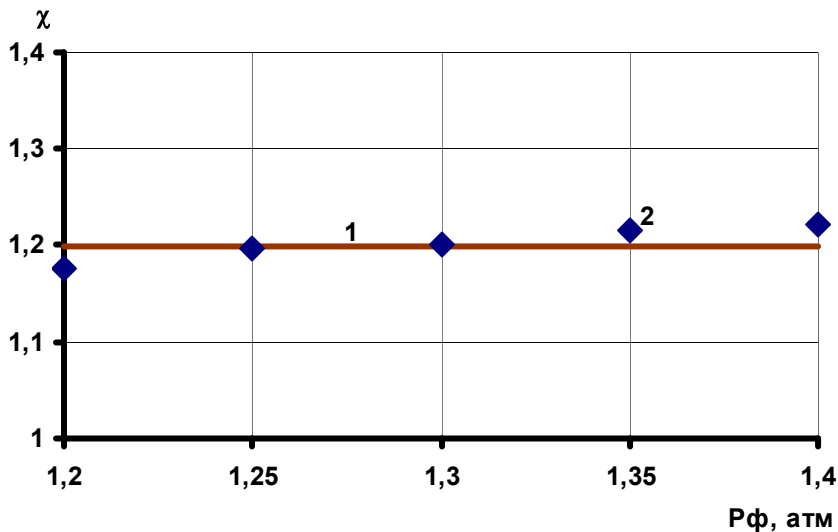


Рис.5. Зависимость коэффициента χ от давления в форсунке при давлении воздуха в подводящем трубопроводе 1,6 атм:
1- линия среднего значения χ ; 2- значения χ

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для продольного ламинарного обтекания получено критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи. Показано, что область значений коэффициента теплоотдачи в этом случае можно условно разбить на 3 участка: общий коэффициент теплоотдачи определяется только значением коэффициента теплоотдачи к газовой фазе; общий коэффициент теплоотдачи зависит как от газовой, так и от капельной фазы; общий коэффициент теплоотдачи определяется только параметрами капельной компоненты потока.

2. Для ламинарного течения в цилиндрических каналах при $q_c = \text{const}$ получена критериальная зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи. Показано, что общий коэффициент теплоотдачи равен сумме коэффициентов теплоотдачи к капельной и газовой фазам.

3. Для турбулентного режима течения введен коэффициент интенсификации теплообмена β , равный отношению коэффициента теплоотдачи для газожидкостного к коэффициенту теплоотдачи для чисто газового потоков и получена зависимость коэффициента β от параметров потока. Показано, что максимальное значение β пропорционально $Re^{0.1}$ с точностью до константы, значение которой зависит только от геометрической формы поверхности.

4. Проведено сравнение полученных в диссертации результатов с экспериментальными данными других авторов, показавшее высокую степень согласования экспериментальных данных и результатов расчета. Сделан вывод о применимости использованного подхода к расчету процесса теплообмена для безотрывного обтекания двухфазным потоком высокотемпературной поверхности любой геометрической формы.

Публикации по диссертационной работе. Основное содержание диссертационной работы полностью отражено в 7 научных и научно-технических работах автора. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в конце автореферата, лично соискателю принадлежит: [1] – получение распределения температуры по поверхности капли при ее испарении на высокотемпературной горизонтальной поверхности; [2] – получение и анализ критериальных зависимостей для расчета коэффициента теплоотдачи при ламинарном продольном обтекании двухфазным потоком высокотемпературной поверхности; [3] – получение и анализ критериального уравнения для нахождения коэффициента теплоотдачи при течении двухфазного потока в высокотемпературном цилиндрическом канале.

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г. Испарение капли на высокотемпературной поверхности / В.Я. Губарев, А.Г.Арзамасцев // Тепловые процессы в технике. – 2010. – №2. – С.63 – 67.

2. Губарев В. Я., Арзамасцев А.Г. Теплообмен при ламинарном течении газожидкостного аэрозоля вдоль высокотемпературной поверхности / В.Я. Гу-

барев, А.Г.Арзамасцев // Вестник Рыбинского Государственного Авиационно-Технического Университета, г. Рыбинск. – 2012. – №1(22). – С.152 – 156.

3. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г. Теплообмен при турбулентном течении газожидкостного потока в высокотемпературном цилиндрическом канале / В.Я. Губарев, А.Г.Арзамасцев // Вестник ТГТУ. – 2012.– Т 18, №3. – С.609 – 614.

Публикации в других изданиях

4. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г.. Испарение капли на высокотемпературной поверхности / В.Я. Губарев, А.Г.Арзамасцев // Тезисы докладов XVII Школы-семинара молодых-ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблема газодинамики и тепломассобмена в аэрокосмических технологиях». – М.: МЭИ, 2009. – С.379 – 381.

5. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г. Испарение капли на высокотемпературной поверхности / В.Я. Губарев, А.Г.Арзамасцев // Труды XVII Школы-семинара молодых-ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблема газодинамики и тепломассобмена в аэрокосмических технологиях». – М.: МЭИ, 2009. – Т.2. – С.315 – 318.

6. Губарев В. Я., Арзамасцев А.Г. Теплообмен при турбулентном течении газожидкостных аэрозолей в цилиндрических каналах / В.Я. Губарев, А.Г.Арзамасцев // Тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых-ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблема газодинамики и тепломассобмена в новых энергетических технологиях». – М.: МЭИ, 2011. – С.255 – 259.

7. Губарев В.Я., Арзамасцев А.Г. Теплообмен при продольном обтекании тонкодисперсным двухфазным потоком высокотемпературной поверхности / В.Я. Губарев, А.Г.Арзамасцев // Тезисы докладов XIX Школы-семинара молодых-ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблема газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках». – М.: МЭИ, 2013.– С.47 – 49.