

ОТЗЫВ
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Макарова Сергея Сергеевича
«Численное моделирование сопряженного теплообмена при охлаждении металлических заготовок потоком газожидкостной среды», представленную на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность диссертационной работы

Проблеме теоретического и экспериментального описания процессов взаимодействия высокотемпературных металлических тел и потока газожидкостной среды уделяется большое внимание. Решению этой проблемы требуются разработки новых современных эффективных методов решения задач, основанных на моделях сопряженного теплообмена. В работе Макарова С.С. рассмотрен процесс сопряженного теплообмена между высокотемпературной металлической заготовкой и охлаждающим потоком газожидкостной среды. Создана математическая модель, описывающая параметры переноса массы, импульса и энергии в сопрягаемых средах. На основе математической модели сопряженного теплообмена получены научно обоснованные закономерности нерегулярного режима охлаждения высокотемпературной металлической заготовки потоком газожидкостной среды.

Структура, объем и основное содержание работы

Диссертация состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, шести глав и заключения, списка используемой литературы, шестнадцати приложений. Объем диссертации составляет 275 страниц. Работа содержит 133 рисунка и 8 таблиц. Список используемой литературы состоит из 246 источников.

Во **Введении** сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, обоснована актуальность проблемы, приведены научная новизна и практическая значимость работы, отмечены основные положения, выносимые на защиту. Приведены структура диссертации и апробация результатов работы, личный вклад автора. Подчеркивается актуальность и новизна исследования. Сформулированы основные цели диссертации и методы их достижения.

Первая глава содержит обзор работ, посвященных современному состоянию исследований методами численного моделирования задач сопряженного теплообмена. Рассмотрены конструктивные схемы устройств охлаждения высокотемпературных металлических заготовок потоками газожидкостной среды.

Численное моделирование сопряженного теплообмена при охлаждении нагретых металлических заготовок прямоугольной и цилиндрической форм при нерегулярном режиме охлаждения для случая граничного условия III рода выполнено во **Второй главе**. Показано хорошая согласованность полученных результатов с известными решениями, полученными экспериментально и численно.

В **Третьей главе** приводится методика расчета тепломассопереноса в гетерогенной среде на основе решения сопряженной задачи в цилиндрической постановке с учетом распределения температуры внутри заготовки. Записаны уравнения математической модели процесса сопряженного теплообмена с соответствующими граничными условиями и описывается метод решения расчетных задач. Проведена верификация модели. Получено



хорошее согласование результатов модельных решений с известными аналитическими решениями задач теплообмена, при охлаждении нагретых металлических тел потоком однофазной жидкости.

Задача о моделировании сопряженного теплообмена при охлаждении высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды с учетом эффекта парообразования решена в **Четвертой главе**. Рассмотрено охлаждение сплошного металлического цилиндра ламинарным и турбулентным потоком охлаждающей среды.

В **Пятой главе** изложены результаты численного исследования сопряженного теплообмена при охлаждении высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды в кольцевом канале. Приведены результаты параметрического анализа, позволяющие установить закономерности изменения температуры металлического цилиндра в зависимости от скорости потока охлаждающей среды, геометрии цилиндра, начальной температуры сред, времени процесса охлаждения.

Численная реализация практических задач сопряженного теплообмена при термообработке металлических заготовок выполнено в **Шестой главе**. Получены значения скорости охлаждения в объеме металлической заготовки потоком охлаждающей среды для различных марок стали.

В **Заключении** приведены основные выводы по проделанной работе.

Научная новизна положений диссертации

Положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются новыми, они научно обоснованы и не противоречат известным теоретическим представлениям исследуемых процессов.

Создана новая математическая модель сопряженного теплообмена, позволяющая получать новые результаты по теплообмену при нерегулярном режиме охлаждения высокотемпературной металлической заготовки потоком газожидкостной среды с парообразованием в жидкости.

Исследованы нерегулярные режимы охлаждения высокотемпературной металлической заготовки потоком воды. Показано, что образующийся в потоке жидкости пар снижает интенсивность отвода тепла от высокотемпературной металлической заготовки, что приводит к увеличению времени охлаждения.

Установлено, что существенное влияние на изменение температуры охлаждаемой заготовки оказывает скорость потока газожидкостной среды, с увеличением которой сокращается доля образующегося пара в жидкости и толщина парового слоя у сопряженной границы сред, при этом основной теплообмен в жидкости происходит на расстоянии порядка 0,001 м от охлаждаемой поверхности.

Численные значения локальной скорости охлаждения высокотемпературной металлической заготовки из конструкционной стали, полученные в интервале характерных скоростей течения газожидкостной среды, геометрии охлаждаемой заготовки, температуры сред и времени процесса охлаждения, позволили произвести прогноз образования структуры и физико-механических свойств материала при нерегулярных режимах охлаждения заготовки.

Разработаны и внедрены новая конструкция охлаждающего устройства и способ охлаждения, позволяющие создавать условия охлаждения, требуемые для формирования заданных физико-механических свойств высокотемпературной металлической заготовки.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость, полученных в работе результатов очевидна. Для практики будут полезны не только разработанные автором численные алгоритмы решения задач охлаждения высокотемпературных металлических тел, а также запатентованные устройства и способы охлаждения, позволяющие создавать заданные режимы охлаждения газожидкостной средой.

Достоверность полученных результатов диссертации обусловлена корректным использованием при разработке математических моделей классических положений механики сплошной среды, представленными законами сохранения и преобразования энергии. Использованием, хорошо зарекомендовавших методов решения систем дифференциальных уравнений, позволяющих получать решения, согласующиеся с теоретическими положениями, расчетными значениями, полученными при практических, нерегулярных режимах охлаждения металлических заготовок.

По работе имеются замечания

1. Автор не принимает во внимание влияние диффузионного переноса теплоты в уравнении энергии.
2. В математической модели в Третьей главе не принимается во внимание процесс нуклеации при образовании и отрыве пузырьков. Вероятно, в математическом понимании паровые пузырьки являются только стоками теплоты в уравнении энергии. Также вызывает вопрос то, что наличие пузырьков никак не влияет на профиль скорости жидкой фазы в окрестности охлаждаемых заготовок. Тогда как локальная концентрация в тонком пристенном слое может быть довольно заметной величиной. Не учитывается влияние образованной массы пара на локальную структуру течения.
3. Не дано обоснования применения в расчетах турбулентного режима в Главе 4 именно $k-\omega$ модели турбулентности Уилкокса.
4. Диссертант не приводит сравнения с данными классических работ по теории кипения в виде плотность теплового потока от степени перегрева $q_w = f(\Delta T)$. Это усложняет понимание полученных данных численного эксперимента.
5. Автор диссертации не приводит в ее тексте критериальных обобщений. В результате, практическая ценность работы несколько снижается, так нет возможности использовать полученные результаты для других условий.
6. Диссертационная работа только бы выиграла, если бы в ней были представлены больше сравнений с данными других авторов.
7. Какие произойдут изменения в выводах по диссертации при существенных изменениях геометрических размеров (например, на порядок) и свойств исследованных объектов?
8. Погрешность измерения температуры стенки тепловизором приведены в крайне лаконичной форме.

Приведенные замечания не влияют на положительную оценку работы. Диссертация написана на высоком научном уровне и представляет собой законченное научное исследование. Основные положения и результаты диссертации получены лично автором работы и достаточно широко представлены в опубликованных научных статьях. В целом, диссертационная работа по объему и оформлению соответствует требованиям ВАК РФ.

Автореферат содержит основные положения диссертации и в достаточной мере раскрывает её содержание.

Диссертация соответствует паспорту специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника по следующим областям исследования: п. 2 «Аналитические и численные исследования теплофизических свойств веществ в различных агрегатных состояниях»; п. 4 «Экспериментальные и теоретические исследования процессов взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом»; п. 5. «Экспериментальные и теоретические исследования однофазной, свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей, режимных и геометрических параметров теплопередающих поверхностей»; п. 6. «Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульсы и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях».

Таким образом, диссертация Макарова Сергея Сергеевича, представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является законченным исследованием, в котором, на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842.

Считаю, что Макаров Сергей Сергеевич, автор диссертации «Численное моделирование сопряженного теплообмена при охлаждении металлических заготовок потоком газожидкостной среды», достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент, доктор физико – математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории термогазодинамики ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН»



Пахомов Максим Александрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук», 630090, Российская федерация, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1.

Тел.: +7 (383) 316-53-36.

e-mail: pakhomov@itp.nsc.ru,

адрес официального сайта в сети «Интернет»: <http://www.itp.nsc.ru/>

Подпись д.ф.-м.н., профессора РАН Пахомова М.А.

Удостоверяю
Ученый секретарь ИТ СО РАН,
к.ф.-м.н., с.н.с.

« 01 » марта 2019 г.



/Макаров М.С./

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе Макарова Сергея Сергеевича на тему: «Численное моделирование сопряженного теплообмена при охлаждении металлических заготовок потоком газожидкостной среды» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

№	Фамилия, Имя, Отчество	Учёная степень, ученое звание	Сведения о работе		Список основных публикаций по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (но не более 15 публикаций)
			Полное наименование организации, почтовый адрес (индекс, город, улица, дом), телефон, адрес электронной почты	Должность с указанием структурного подразделения	
1	2	3	4	5	6
1	Пахомов Максим Александрович	Доктор физико-математических наук 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, профессор РАН	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Российская федерация, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1 Тел.: +7 (383) 316-53-36; E-mail: pakhomov@itp.nsc.ru адрес официального сайта в сети	Ведущий научный сотрудник к лаборатории термодинамики	<p>1. Pakhomov M.A. Hydrodynamics and heat transfer in an inclined bubbly flow / A.V. Chinak, A.E. Gorelikova, O.N. Kashinsky, V.V. Randin, M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov //International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. Vol. 118. P. 785-801.</p> <p>2. Pakhomov M.A. Modeling of the flow patterns heat transfer in turbulent bubbly polydispersed flow downstream of a sudden pipe expansion / M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov //International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016. Vol. 101. P. 1251 - 1262.</p> <p>3. Pakhomov M.A. Numerical study of fluid flow and heat transfer characteristics in an intermittent turbulent impinging round jet / M.A.Pakhomov, V.I. Terekhov // Int. J. Thermal Sci, 2015. Vol. 87. P. 85–93.</p> <p>4. Пахомов М.А. Влияние капель на турбулентность газа и теплообмен при течении двухфазного потока за внезапным</p>

			<p>«Интернет»: http://www.itp.nsc.ru/</p>	<p>расширением трубы /М.А. Пахомов, В.И. Терехов // Теплофизика высоких температур, 2016. Т.54. № 3. С. 352 -359.</p> <p>5. Пахомов М.А. Моделирование турбулентной структуры течения и теплопереноса в восходящем полидисперсном пузырьковом потоке /М.А.Пахомов, В.И. Терехов //Журнал технической физики, 2015. Т. 85. № 9. С. 8 – 16.</p> <p>6. Пахомов М.А. Влияние испарения капель на турбулентность газа и теплообмен при течении двухфазного потока за внезапным расширением трубы /М.А. Пахомов, В.И. Терехов // Теплофизика высоких температур, 2016. Т. 54. № 3. С. 352 – 359.</p> <p>7. Пахомов М.А. Моделирование турбулентной структуры течения в восходящем полидисперсном газожидкостном потоке /М.А. Пахомов, В.И. Терехов // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа, 2015. № 2. С. 57 - 69.</p> <p>8. Пахомов М.А. Численное моделирование турбулентного закрученного газодисперсного потока за внезапным расширением трубы /М.А. Пахомов, В.И. Терехов // Теплофизика и аэромеханика, 2015. Т. 22. № 5. С. 621 - 632.</p> <p>9. Pakhomov M.A. Numerical modelling of film cooling from cylindrical holes embedded in a transverse trench /M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov // The 13 Asian symposium on visualization: abstr., Novosibirsk, 22–26 June 2015. Novosibirsk: Parallel, 2015. P. 182-183.</p> <p>10. Pakhomov M.A. The effect of</p>
--	--	--	---	---

				<p>droplets evaporation on turbulence modification and heat transfer enhancement in a two-phase mist flow downstream of a pipe sudden expansion /M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov //Flow, Turbulence and Combustion, 2017. Vol. 98. - № 1. P. 341-354.</p> <p>11. Пахомов М.А. Влияние закрутки на теплоперенос в газокапельном потоке за внезапным расширением трубы /М.А. Пахомов, В.И. Терехов // Теплофизика высоких температур, 2018. Т. 56. № 3. С. 431-438.</p> <p>12. Пахомов М.А. Моделирование влияния пузырьков на структуру течения и теплоперенос в турбулентном полидисперсном восходящем потоке за внезапным расширением трубы / М.А. Пахомов, В.И. Терехов // Теплофизика высоких температур, 2018. Т. 56. № 1. С. 50 – 60.</p> <p>13. Пахомов М.А. Структура турбулентного течения и распределение пузырьков в осесимметричной неизотермической импактной газожидкостной струе / М.А.Пахомов, В.И. Терехов // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа, 2017. № 2. С. 129 - 140.</p> <p>14. Пахомов М.А. Моделирование турбулентного неизотермического полидисперсного пузырькового течения за внезапным расширением трубы / М.А.Пахомов, В.И. Терехов // Теплофизика и аэромеханика, 2016. Т. 23. № 5. С. 721-728.</p> <p>15. Пахомов М.А. Численное исследование турбулентной</p>
--	--	--	--	---

					<p>структуры полидисперсной двухфазной струи с испаряющимися каплями / М.А.Пахомов, В.И. Терехов //Математическое моделирование, 2016. Т.28. № 11. С. 64 – 78.</p>
--	--	--	--	--	--

Сведения подтверждаю:
Ученый секретарь ИТ СО РАН,
к.ф.-м.н., с.н.с.

/Макаров М.С./

(подпись) МП

« 01 » марта 2019 г.

