

В диссертационный совет Д 212.079.02 при
ФГБОУ ВО «Казанский национальный
исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ»

420111, г. Казань, ул.К.Маркса, д.10

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 работы.

В современных машиностроении, металлургии и смежных отраслях промышленности большое внимание уделяется повышению качества изделий, формированию заданных физико-механических свойств материалов, что достигается путем совершенствования технологий термической обработки металлических заготовок. Это невозможно без обеспечения заданных условий теплообмена при охлаждении заготовок. В настоящее время широко используется охлаждение высокотемпературных металлических заготовок потоками газожидкостных сред.

Несмотря на большое количество имеющихся в литературе работ, посвященных исследованиям сложного теплообмена, количество исследований сопряженного теплообмена при нерегулярном режиме охлаждения высокотемпературных металлических заготовок недогретой до температуры насыщения жидкостью весьма ограничено. В связи с этим считаю, что выбранная тема исследований, безусловно, является актуальной.

Целью диссертационной работы Макарова С.С. является создание научных основ, получение обоснованных закономерностей и разработка математических моделей сопряженного теплообмена, алгоритмов и программ расчета процессов охлаждения высокотемпературных металлических заготовок газожидкостным потоком при нерегулярном режиме.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых литературных источников,

включающего 246 наименования и 16 приложений. Текст диссертации напечатан на 275 страницах и содержит 133 рисунка и 8 таблиц.

Во введении сформулированы цель и задачи исследования, показаны актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, описаны методы исследования и отмечена достоверность и обоснованность научных результатов.

В первой главе приведен литературный обзор, посвященный постановке и решению задач сопряженного теплообмена численными методами, рассмотрены технологические аспекты охлаждения металлических заготовок при термической обработке, а также конструкции устройств для реализации процесса охлаждения. Описаны теплофизические особенности переноса тепла при охлаждении высокотемпературных заготовок и при возникновении на их поверхности пленочного и пузырькового кипения жидкости. Отмечено влияние недогрева охлаждающей жидкости на величину критической плотности теплового потока.

Рассмотрены основные подходы к моделированию тепловых и гидродинамических процессов при охлаждении металлических заготовок газожидкостными средами для случаев теплообмена с заданными граничными условиями и сопряженного теплообмена. Указано, что математическое описание сопряженного теплообмена при охлаждении металлических заготовок основывается на численном решении двух- и трехмерных систем дифференциальных уравнений с учетом фазовых переходов и температурной зависимости теплофизических параметров. Решение проводится итерационными методами с использованием сеток, сгущенных около межфазной границы, а наиболее рациональным методом является метод контрольного объема.

Отмечено, что количество имеющихся в литературе работ по расчету и исследованию закономерностей теплообмена при нерегулярном режиме охлаждения высокотемпературных металлических изделий недогретыми до температуры насыщения жидкостными потоками весьма ограничено.

Вторая глава посвящена вопросам моделирования теплообмена при охлаждении металлических заготовок прямоугольной и цилиндрической форм. Описана неявная разностная схема решения дифференциального уравнения Фурье для одно-, двух- и трехмерных нестационарных задач с переменными теплофизическими параметрами. Рассмотрены конечно-разностные схемы для задач сопряженного теплообмена с заданными внешними граничными условиями, а также обосновано сопряжение двух материалов и твердого материала с жидкостью. Все схемы решения

преобразованы к виду, удобному для использования метода прогонки. Сопоставление численных результатов по температурным полям в заготовках, полученных с использованием модели, с результатами, полученными посредством использования программного комплекса ANSYS CFX, и аналитическим решением показало их хорошее совпадение.

Представлены математические модели теплообмена при охлаждении цилиндра потоками воздуха и воды. Получены временные и пространственные зависимости температуры заготовки и охлаждающей среды, а также значения приведенных скорости и давления потока среды, коэффициента теплоотдачи.

В третьей главе представлена методика численного расчета процессов тепло- и массопереноса в гетерогенной системе «твердое тело – газожидкостная среда» на основе сопряженной модели. Система дифференциальных уравнений включает уравнения Навье - Стокса и неразрывности для потока несжимаемой жидкости в цилиндрической системе координат, уравнение энергии для потока среды с учетом теплоты фазового перехода, уравнение переноса массы для паровой фазы и уравнение энергии для металлического тела. Описан применяемый для решения задач метод контрольного объема, где в качестве расчетного алгоритма используется полуневявный метод SIMPLE.

Решена задача охлаждения нагретого металлического цилиндра продольным потоком жидкости без кипения. Описаны начальные и граничные условия. Получены профили изменения температуры по длине и радиусу цилиндра и с течением времени при различных скоростях охлаждающего потока. Кроме того, решена задача охлаждения цилиндра потоком жидкости, протекающим в кольцевом канале. Получены поля скорости и температуры жидкости и определены длины гидродинамического и теплового начальных участков стабилизации потока. Последние хорошо согласуются с опытными данными Петухова Б.С.

В четвертой главе представлены результаты численных исследований сопряженного теплообмена между высокотемпературным металлическим цилиндром и потоком парожидкостной среды с учетом парообразования на поверхности тела. Рассмотрены случаи ламинарного и турбулентного течения охлаждающей среды. Рассчитаны значения объемной концентрации пара на границе контакта среды и металла и по радиусу слоя воды, временные температурные зависимости в расчетных точках поверхности цилиндра.

Для расчета движения среды в случае турбулентного течения записаны уравнения Рейнольдса и принята $k - \omega$ модель турбулентности. Численные исследу-

дования показали, что учет парообразования в потоке воды приводит к менее интенсивному охлаждению цилиндра, а учет турбулентности приводит к интенсификации теплообмена.

Пятая глава посвящена численному исследованию сопряженного теплообмена при охлаждении высокотемпературного металлического цилиндра потоком охладителя в кольцевом канале. Рассмотрены случаи горизонтального и вертикального расположений кольцевого канала. Получены поля скорости и температуры потока, объемной концентрации пара и удельной массовой скорости парообразования в пространстве кольцевого канала. Определено распределение температуры цилиндра по его длине и радиусу при различных скоростях потока охлаждающей среды. Обсуждается вклад силы тяжести при течении среды в вертикальном кольцевом канале. Для верификации численного алгоритма расчета теплообмена в вертикальном канале проведен натурный эксперимент, результаты которого находятся в удовлетворительном согласии с расчетными данными автора.

Автором предложена модель пузырькового парообразования. Исследования показали, что парообразование в форме пузырьков в потоке сильно недогретой воды слабо влияет на распределение теплового потока на границе контакта цилиндра с охлаждающей средой. Исследования процесса охлаждения цилиндра с переменным поперечным сечением выявили неравномерность охлаждения цилиндра, что автор объясняет формированием зон с пониженной скоростью потока около вертикальной поверхности.

В шестой главе приведено решение практических задач сопряженного теплообмена. Проведено численное исследование теплового состояния образца из стали Н18Л9М5Т при термической обработке, тепловой стабилизации образца из стали 08Х15Н5Д2Т, теплового состояния заготовок полых пальцев траков и цилиндрических металлических заготовок при закалке. Исследована скорость охлаждения заготовки из стали 12Х18Н9Т.

Для проведения натурального эксперимента по охлаждению высокотемпературной цилиндрической заготовки из стали 40Х создана экспериментальная установка и проведены опыты по определению характерной температуры заготовки с использованием тепловизора. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами численных исследований. В плане практических рекомендаций предложена новая оригинальная конструкция щелевого спрейера для термообработки симметричных заготовок.

Выводы диссертации являются обоснованными и отражают основные результаты, полученные соискателем.

Автореферат и список публикаций по работе полностью соответствуют диссертации.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что созданы новые математические модели и численные алгоритмы решения задачи сопряженного теплообмена при нерегулярном режиме охлаждения высокотемпературной металлической заготовки потоком газожидкостной и парожидкостной среды. Разработанные модели рассматривают случаи различной формы трехмерных заготовок, охлаждение воздухом, газожидкостным потоком в ламинарном и турбулентном режиме течения, а также жидкостью при наличии пузырькового или пленочного кипения, течение охлаждающей среды в горизонтальном и вертикальном кольцевом канале. Модели учитывают нестационарность процесса, изменение теплофизических свойств металла и среды во времени и пространстве.

Впервые проведено численное исследование процесса охлаждения в нерегулярных режимах и получены закономерности влияния гидродинамических и теплофизических параметров на скорость охлаждения высокотемпературных металлических заготовок, в том числе при кипении охлаждающей жидкости, поля температуры, скорости среды и концентрации пара в жидкости. Выявлено влияние недогрева жидкости до температуры насыщения на скорость охлаждения заготовок. Определены значения скорости охлаждения, позволяющие прогнозировать образующуюся структуру стали и сократить время на обработку заготовок.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных законов сохранения импульса, энергии и массы, классических положений механики сплошной среды и теплообмена, фазовых превращений, применением в численных исследованиях общеизвестных и хорошо апробированных численных методов, а также хорошим соответствием отдельных результатов расчетов известным из литературных источников теоретическим и опытным данным.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты использованы в проектно-конструкторской деятельности ИМ УрО РАН для модернизации систем охлаждения и расчете режимов охлаждения заготовок, а также для формирования рекомендаций по модернизации конструкций охлаждающих устройств и методик расчета скорости охлаждения заготовок. Результаты диссертационной работы в виде расчетных методик и программ использованы также «Центром научно-технических исследований и разработок» (г. Ижевск) и в ООО

«Нано-Т» (г. Ижевск). Для охлаждения высокотемпературных металлических заготовок предложена конструкция спрейерного устройства и способ охлаждения высокотемпературной металлической заготовки.

Автором получено 10 свидетельств о государственной регистрации различных программ для решения на ЭВМ задач сопряженного теплообмена. По результатам работы автором диссертации получено 2 патента на изобретения: №2353669 «Способ закалки металлических изделий» и №2354712 «Способ создания охлаждающей среды с регулируемыми теплофизическими свойствами».

Созданные в процессе выполнения исследований математические модели, численные алгоритмы и прикладные программы используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова» на кафедре «Тепловые двигатели и установки».

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Представляет большой интерес дальнейшее проведение исследований и систематизации результатов в области расчета сопряженного теплообмена при контакте высокотемпературных металлических тел с потоком охлаждающей среды при наличии парообразования, поиск эффективных способов интенсификации процесса охлаждения металлических заготовок. Наиболее интересной задачей в дальнейшем представляется выявление критериев, определяющих эффективность процесса охлаждения, и поиск оптимальных режимов проведения процесса. Представляется целесообразным создание на основе разработанных программ для ЭВМ единого программно-методического расчетного комплекса, позволяющего проводить вычисления параметров процесса охлаждения металлических заготовок для широкого диапазона технологических режимов.

Полученные в диссертации результаты могут оказаться полезными для инженеров и научных работников, занимающихся разработкой и проектированием теплообменного оборудования для охлаждения высокотемпературных металлических заготовок. Материалы диссертации могут быть переданы в следующие организации: Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана; Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов (МИСиС)»; АО «НИИ стали» (г. Москва); Санкт-Петербургский горный университет; Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого и другие организации и университеты машиностроительного и металлургического профиля.

По теме диссертации опубликовано 62 печатные работы, в том числе 24 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 12 патентах и свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, 7 статьях, индексируемых международными базами Web of Science и Scopus, 19 статьях в журналах и сборниках, докладах в сборниках конференций.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Бернштейновских чтениях по термической обработке металлических материалов (Москва, 2001 г.), XXVIII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2005 г.), XXXVII Уральский семинар (Екатеринбург, 2007 г.), IV Международной научно-технической конференции (Томск, 2008 г.), XI Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2010 г.), VII Российской конференции «Механика микро-неоднородных материалов и разрушение» (Екатеринбург, 2012 г.), Российской школе-конференции «Актуальные проблемы математики, механики, информатики» (Ижевск, 2010, 2014 гг.; Пермь, 2011 г.; Екатеринбург, 2012, 2013 гг.), Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные науки сегодня» (Москва, 2013 г.), VI Всероссийской научно-практической конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии» (Самара, 2014 г.), VIII Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, технологии и производства» (Санкт-Петербург, 2015 г.), Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, 2016 г.; Санкт-Петербург, 2017 г.), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (Севастополь, 2017, 2018 гг.), Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017 г.), X Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2018 г.), многочисленных научно-технических семинарах профильных кафедр российских вузов и институтов.

Замечания по работе:

- 1) При описании турбулентного течения охлаждающей среды принята $k - \omega$ модель турбулентности (стр.134). Выбор модели турбулентности существенно влияет на результаты расчета характеристик течения жидкости. Считаю, что в настоящей работе модель турбулентности выбрана без должного обоснования.
- 2) При сопряжении двух металлов (стр.65-67) автор не учитывает контактное сопротивление, которое в ряде случаев может принимать существенные значения.

- 3) Ряд полученных в работе результатов численного исследования сравнивались с результатами расчета, полученными с помощью программного пакета ANSYS CFX. При этом не поясняется, чем отличаются численные алгоритмы, заложенные в ANSYS, от предлагаемых автором. Кроме того, совпадение результатов расчета по модели с результатами другого расчета не гарантирует адекватности модели.
- 4) В разделах 4.1, 4.2 и 5.1 диссертации для полученных численных результатов по теплообмену при охлаждении цилиндра ламинарным и турбулентным потоками среды и средой, протекающей в горизонтальном канале, не приводится сравнение полученных значений параметров с какими-либо экспериментальными или другими расчетными данными. В этом случае невозможно сделать вывод об адекватности предложенных математических моделей.
- 5) В настоящее время существует большое количество программных пакетов, позволяющих численно решать задачи гидродинамики и тепло- и массопереноса в одно- и многофазных системах, такие как Fluent, Phoenix, ANSYS, Flow 3D, SolidWorks и многие другие. В диссертации остался без внимания вопрос, могут ли такие пакеты быть использованы для решения всех или части поставленных соискателем задач в области сопряженного теплообмена и какова необходимость в создании новых вычислительных программ. Мне кажется было бы полезно обсудить эти вопросы в отдельном разделе первой главы и, тогда, актуальность создания новых программ могла бы выглядеть более обоснованной.
- 6) В диссертационной работе встречаются неточные термины. Так, сечение, равноудаленное от торцов цилиндра, называется центром цилиндра (стр.118), тогда как центр – это точка, но никак не сечение, и не может быть «температуры поверхности в центре цилиндра», равно как и «температуры в середине поверхности цилиндра по радиусу» (стр.131). В главах диссертации 4 и 5, где рассматривается кипящая жидкость, поток называется «газожидкостным», а не «парожидкостным».

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение.

В диссертационной работе созданы научные основы, математические модели, численные алгоритмы и программы расчета процесса сопряженного теплообмена, которые позволили провести численное исследование и получить научно обоснованные закономерности нерегулярного режима при охлаждении высокотемпературных металлических заготовок потоком охлаждающей среды.

В целом, по объему и научному уровню, актуальности и научной новизне полученных результатов, их практической ценности диссертационная работа

Макарова Сергея Сергеевича «Численное моделирование сопряженного теплообмена при охлаждении металлических заготовок потоком газожидкостной среды» полностью соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842 Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, предъявляемым к докторским диссертациям, являясь научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки в области расчета сопряженной задачи теплообмена при охлаждении высокотемпературных металлических изделий газожидкостными потоками, в том числе при наличии фазовых превращений охлаждающей среды, имеющие существенное значение для усовершенствования широкого спектра процессов металлургических и машиностроительных производств с целью улучшения качества изделий.

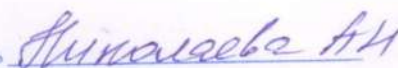
Автор диссертации Макаров Сергей Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой
«Оборудование пищевых
производств» ФГБОУ ВО
«Казанский национальный
исследовательский
технологический университет»,
доктор технических наук,
профессор



Николаев Андрей Николаевич

Подпись



удостоверяется.

О.А. Перельгина

О.А. Перельгина

20 19г.

420015, РФ, Республика Татарстан,
г. Казань, ул. К.Маркса, 68
тел.сл. : (843)231-43-61,
e-mail: andr_nik_nik@rambler.ru

12.03.2019 г.

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	Николаев Андрей Николаевич	Доктор технических наук (11.00.11 – Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов), профессор	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, Российская федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К.Маркса, дом 68 Тел.: +7(843) 238-56-94; Email: andr_nik_nik@rambler.ru адрес официального сайта в сети «Интернет» http://www.kstu.ru	Заведующей кафедрой «Оборудование пищевых производств»	<p>1. Николаев А.Н. Охлаждение высокотемпературных промышленных газовых выбросов в полых вихревых аппаратах / А.Р. Галимуллина, В.В. Харьков, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета, 2017. Т. 20. № 7. С. 128 - 130.</p> <p>2. Николаев А.Н. Исследование массоотдачи в закрученной пленке жидкости в цилиндрическом канале / Г.М. Мингалева, А.Н. Николаев, В.В. Харьков // Вестник Казанского технологического университета, 2016. Т. 19. № 17. С. 54 - 56.</p> <p>3. Nikolaev A.N. Efficiency of the contact stage of a jet-film device during rectification of ethylbenzene-styrene mixture / A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, I.N. Madyshev, A.N. Nikolaev // Chemical and petroleum engineering, 2017. Vol.52. Issue.7-8. С. 501 - 507.</p> <p>4. Николаев А.Н. Распределение оборотной воды в рабочей зоне вихревой камеры с дисковым распылителем для увеличения процесса охлаждения / О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2014. Вып.3. С. 21 – 24.</p> <p>5. Nicolaev A.N. Study of fluid</p>

				<p>dynamics of mass-transfer apparatuses having stream-bubble contact devices / I.N. Madychev, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, A.N. Nicolaev // Chemical and Petroleum Engineering, 2016. Vol.52. Issue 5–6. - p. 299–304.</p> <p>6. Николаев А.Н. Теплообмен в каплях жидкости в многоступенчатых вихревых экономайзерах / А.С. Карпов, М.Р. Вахитов, Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета, 2017. Т. 20. № 13. С. 56 - 57.</p> <p>7. Николаев А.Н. Расчетное исследование движение капель жидкости в контактных элементах вихревых аппаратов / А.И. Хузаханова, М.Р. Вахитов, Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета, 2017. Т. 20. № 11. С. 48 - 50.</p> <p>8. Николаев А.Н. Исследования диспергирования жидкости и газа в контактных устройствах с увеличенным диапазоном устойчивой работы / А.В. Дмитриев, И.Н. Мадьше, О.С. Дмитриева, // Экология и промышленность России, 2017. № 3. С. 12-15.</p> <p>9. Nikolaev A.N. Flow dynamics of mass exchangers with jet-bubbling contact devices / O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, I.N. Madyshchev, A.N. Nikolaev // Chemical and petroleum engineering, 2017. Vol.53. Issue.1-2. С. 130 - 134.</p> <p>10. Николаев А.Н. Расчет конвекционного аппарата с закрученным потоком теплоносителя для концентрирования соков / В.В. Харьков, А.Н. Николаев // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология, 2015. Вып. 1. С. 94 – 97.</p> <p>11. Николаев А.Н. Влияние вакуума на эффективность массопередачи в аппаратах со струйнопленочными контактными устрой-</p>
--	--	--	--	--

				<p>ствами / О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев, А.В. Дмитриев, А.Н. Николаев // Технология нефти и газа, 2016. № 5.(106). С. 53 – 57.</p> <p>12. Николаев А.Н. Численное исследование траектории движения капель в вихревом аппарате для концентрирования фруктовых соков / В.В. Харьков, А.Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета, 2014. Т. 17. № 16. С. 191 - 193.</p> <p>13. Николаев А.Н. Инженерная методика расчета вихревой камеры со взвешенным капельным слоем / В.В. Харьков, А.Н. Николаев // Химическая промышленность сегодня, 2017. №.1. С. 16 – 21.</p> <p>14. Николаев А.Н. Исследование процесса хемсорбции при прямом течении газа и пленки жидкости в цилиндрических каналах / И.А. Дубков, А.И. Дубкова, А.Н. Николаев // Вестник казанского технологического университета, 2014. Т. 17. № 19. С. 263 – 266.</p> <p>15. Николаев А.Н. Исследование диспергирования жидкости и газа в контактных устройствах с увеличенным диапазоном устойчивой работы / А.В. Дмитриев, И.Н. Мадышев, О.С. Дмитриева, А.Н. Николаев // Экология и промышленность России, 2017. Т.21. №3, С. 12-15.</p>
--	--	--	--	---

Официальный оппонент
д. т. н., профессор



А.Н Николаев



Николаева АН

подтверждается.

д.т.н. О.А. Перельгина

О.А. Перельгина

05 2019г.