

**Заключение диссертационного совета Д 01.016.03 на базе
Государственного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Донецкий национальный университет»
по диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета Д 01.016.03 от «19» декабря 2018 г. № 25**

О ПРИСУЖДЕНИИ

**Ивановой Анне Александровне
ученой степени доктора технических наук.**

Диссертация «Прогнозное моделирование тепловых процессов при непрерывной разливке металлов» по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика принята к защите «14» сентября 2018 г., протокол № 15 диссертационным советом Д 01.016.03 на базе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет», 283001, г. Донецк, ул. Университетская 24 (приказ МОН ДНР о создании диссертационного совета № 117 от 8.02.2016 г., приказ МОН ДНР об изменениях в составе диссертационного совета № 442 от 25.04.2017 г.).

Соискатель – Иванова Анна Александровна, 1973 года рождения, в 1995 году окончила Донецкий государственный университет по специальности «Математика». Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Система автоматического управления режимами охлаждения металла машины непрерывного литья заготовок» по специальности 05.13.07 - Автоматизация процессов управления защитила в 2010 году в диссертационном совете Д11.052.03, созданном на базе государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет».

Иванова А.А. работает в должности старшего научного сотрудника в отделе теории управляющих систем Государственного учреждения «Институт прикладной математики и механики», г. Донецк.

Диссертация выполнена в отделе теории управляющих систем Государственного учреждения «Институт прикладной математики и механики», г. Донецк.

Научный консультант – Бирюков Алексей Борисович, доктор технических наук, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, заведующий кафедрой технической теплофизики.

Официальные оппоненты:

1. Недопекин Фёдор Викторович, доктор технических наук, профессор, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет», г. Донецк, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии;

2. Лукин Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет», г. Череповец, заведующий кафедрой теплоэнергетики и теплотехники;

3. Бабанин Анатолий Яковлевич, доктор технических наук, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, доцент кафедры технической эксплуатации и сервиса автомобилей, технологических машин и оборудования;

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, РФ, в своем положительном заключении,

подписанном на основании обсуждения и одобрения на заседании кафедры энергетики тепло-технологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» (25 октября 2018 г., протокол № 3, подписан заведующим кафедрой энергетики тепло-технологии, к.т.н., доцентом **Кожевниковым Владимиром Павловичем** и профессором кафедры энергетики тепло-технологии, д.т.н., доцентом **Трубаевым Павлом Алексеевичем** и утверждён проректором по научной работе БГТУ им. В.Г. Шухова, д.т.н., проф. Евтушенко Е.И. 25.10.2018 г.) указала, что представленные в диссертационной работе направления развития теории и методов моделирования механизмов и закономерностей процессов теплопереноса для оперативного наблюдения и оценки тепловых процессов кристаллизации слитков являются существенным вкладом в разработку научных и практических основ совершенствования технологии непрерывной разливки. Новые разработки позволяют исследовать закономерности формирования непрерывнолитой заготовки как на этапе разработки технологии и проектирования машин непрерывного литья, так и непосредственно во время производственного процесса разливки. Полученные теоретические выводы дают основание для совершенствования методики прогнозного моделирования тепловых процессов с наличием фазовых переходов. Практическое значение результатов работы определяется тем, что разработка прогнозных моделей делает возможным использование их в системе автоматического управления производственным процессом непрерывной разливки. Системный анализ различных подходов в моделировании позволяет выбирать структуру математической модели, наиболее соответствующую требованиям конкретной практической задачи, в частности быстродействие для прогнозных моделей, вычисление производных при расчётах скоростей и температурных градиентов или имитационное моделирование.

Работа отвечает требованиям п. 2.1 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает

присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.

Основные результаты диссертационных исследований изложены в 48 научных работах, в том числе в 16 статьях в рецензируемых научных изданиях, в которых могут публиковаться результаты диссертационных исследований по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика (из них 13 представлены в международной наукометрической базе SCOPUS); 28 публикаций включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Обобщения результатов исследований по прогнозному моделированию тепловых процессов при непрерывной разливке изложены в монографии «Параметрическая идентификация, анализ и синтез систем управления технологическими процессами», главы 6, 7, 8.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК ДНР

1. **Иванова, А. А.** Моделирование процесса кристаллизации, идентификация параметров внешнего теплообмена и управление расходами воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / А. А. Иванова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, №1(18), 2010. – С. 127-131.

2. **Иванова, А. А.** 3-D математическая модель температурного поля непрерывного слитка / А. А. Иванова // Труды ИПММ НАН Украины. – 2011. – Т. 23. – С. 100-109.

3. Бирюков, А. Б. Рациональные параметры тепловой работы зоны вторичного охлаждения слябовых МНЛЗ / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // Сталь. – № 2. – 2015. – С. 18-21.

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК ДНР, включенных в Международные наукометрические базы

4. **Иванова, А. А.** Критерии качества температурного поля непрерывного слитка / А. А. Иванова // Metallurg – 2011. – № 10. – С. 47-53.
переведена на английский: А. А. Ivanova. Criteria of the quality of the temperature

field of a continuous-cast ingot. Metallurgist, Vol. 55, Nos. 9–10, January, 2012. p. 710-719. (**Scopus**)

5. **Иванова, А. А.** Методика расчета оптимальных параметров форсуночного охлаждения непрерывнолитого сляба / А. А. Иванова, В. А. Капитанов, А. В. Куклев // *Металлург* – 2012. – № 3. – С. 45-49. *переведена на английский*: А. А. Ivanova, V. A. Kapitanov and A. V. Kuklev. Method of calculating the optimum parameters for the air-mist cooling of a continuous-cast slab. Metallurgist, Vol.56, Nos. 3 – 4, July, 2012, p.173–179. (**Scopus**)

6. **Anna Ivanova.** Model predictive control of secondary cooling modes in continuous casting. The proceedings of Metal 2013: 22st International Conference on Metallurgy and Materials, May 15th - 17th 2013, Brno, Czech Republic, EU, p. 11-16. (**Scopus**)

7. **Иванова, А.А.** Прогнозное управление расходом воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / А. А. Иванова // *Металлург* – 2013. – № 7. – С. 34-39. *переведена на английский*: А.А. Ivanova. Predictive Control of Water Discharge in the Secondary Cooling Zone of a Continuous Caster. Metallurgist, Vol. 57, Nos. 7–8, November, 2013, p. 592–599. (**Scopus**)

8. **А.А. Ivanova.** Calculation of Phase-Change Boundary Position in Continuous Casting. Archives of Foundry Engineering, Volume 13, Issue 4/2013, p. 57-62. (**Scopus**)

9. **Ivanova, A.** Model predictive control of continuous ingot solidification. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline) Volume 15, Issue PART 1, 2013, p. 444-448. (**Scopus**)

10. Бородин, А. И. Моделирование температурного поля непрерывнолитого слитка с определением положения границы фазового перехода / А. И. Бородин, **А. А. Иванова** // *Инженерно-физический журнал*. 2014, Т. 87, № 2. С. 492-497. *переведена на английский*: А. I. Borodin, А. А. Ivanova. Modeling of the Temperature Field of a Continuously Cast Ingot with Determination of the Position of the Phase-Transition Boundary. Journal of

Engineering Physics and Thermophysics. Vol. 87, No 2, March, 2014, p. 507-512.
(Scopus)

11. Бирюков, А. Б. Метод определения рациональной интенсивности вторичного охлаждения непрерывнолитой слябовой заготовки / А. Б. Бирюков, **А. А. Иванова** // *Металлург*. 2014. № 11. С. 47-51. *переведена на английский*: A.B. Biryukov, A. A. Ivanova. Method of Determining an Efficient Rate for the Secondary Cooling of a Continuous-Cast Slab. *Metallurgist*, Vol. 58, Nos. 11–12, March, 2015, p. 967-972. (Scopus)

12. **Иванова, А. А.** Изменение формы жидкой лунки при варьировании параметров непрерывной разливки стали / А. А. Иванова // *Металлург*. 2015. № 4. С. 36-40. *переведена на английский*: A. A. Ivanova. Changes in the Form of the Liquid Crater with Variation of the Process Parameters in the Continuous Casting of Steel. *Metallurgist*, Vol. 59, Nos. 3–4, July, 2015, p. 308-314. (Scopus)

13. Wołczyński, W., Lipnicki, Z., Bydałek, A.W., **Ivanova A.A.** Structural Zones in Large Static Ingot. Forecasts for Continuously Cast Brass Ingot. *Archives of Foundry Engineering*, Vol.16, Issue 3/2016, p. 141 – 146. (Scopus)

14. Kwapisiński, P., **Ivanova, A.A.**, Kania, B., Wołczyński, W. Some Similarities / Differences between Steel Static and Virtual Brass Static Casting. *Archives of Foundry Engineering*. Issue 17(1), 2017. p. 109 – 114. (Scopus)

15. Kwapisiński, P., Lipnicki, Z., **Ivanova, A.A.**, Wołczyński, W. Role of the Structural and Thermal Peclet Numbers in the Brass Continuous Casting. *Archives of Foundry Engineering*. Vol.17 Issue 2/2017. p. 49 – 54. (Scopus)

16. Wołczyński W., **Ivanova A.A.**, Kwapisiński P., Olejnik E. Structural transformations versus hard particles motion in the brass ingots. *Arch. Metall. Mater.* 62 (2017), 4, p. 2455-2461. (Scopus)

На автореферат поступило 10 отзывов. Все отзывы положительные.

Обзор поступивших отзывов:

1. **Пильгаев Владимир Михайлович**, главный специалист ОИДИС ГКНТ ДНР.

Отзыв положительный, с замечаниями:

- В автореферате не указано, для какой марки стали проводились эксперименты и при какой скорости разливки были получены изучаемые темплеты.

- В автореферате не представлены результаты определения максимально допустимой скорости разливки МНЛЗ в зависимости от разливаемой марки стали и размера поперечного сечения заготовки;

2. Сотников Алексей Леонидович, доктор технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской части ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет».

Отзыв положительный, с замечаниями:

- В тексте автореферата недостаточно подробно рассмотрены конструктивные параметры МНЛЗ, в частности неясно, каким образом учитывается конусность кристаллизатора, степень износа внутренних стенок которого оказывает большое влияние на условия формирования непрерывнолитого слитка;

- Поскольку имеется достаточно подробный расчёт двухфазной зоны и точки окончательного затвердевания, желательно было бы рассмотреть задачу мягкого обжатия слитка.

3. Сборщиков Глеб Семёнович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, **Прибытков Иван Алексеевич**, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов».

Отзыв положительный, с замечаниями:

- Автор использует термин «тепловое поле». Обычно под словом «поле» понимается совокупность значений какой-либо величины, характерной для рассматриваемого физического явления. Если «температурное поле», то это

совокупность значений температуры. Термин «тепловое поле» в данном случае не совсем ясен;

- В автореферате отмечается, что «впервые предложена методика определения оптимального с точки зрения минимизации температурных градиентов размещения форсунок вдоль технологической линии вторичного охлаждения...». Нам представляется, что нет необходимости минимизации температурных градиентов, необходимо не доводить величину возникающих термических напряжений до значений, превышающих допустимые величины. При этом важно учитывать степень неоднородности граничных условий не только по длине заготовки, но и по периметру заготовки круглого и прямоугольного сечения. К этому следует добавить, что «наименьшие термические напряжения» не являются «оптимальными параметрами форсуночного охлаждения в ЗВО». Как было отмечено выше, термические напряжения не должны превышать лишь допустимых величин;

- Качество непрерывнолитой заготовки определяется и теми тепловыми процессами, которые протекают при охлаждении уже полностью затвердевшей заготовки, особенно если последняя представляет собой массивное в тепловом отношении тело. Как следует из автореферата, этот вопрос, по-видимому, не рассматривался.

4. Коцур Сергей Дмитриевич, И.о. директора по технологии и качеству Филиала №2 «Енакиевский металлургический завод» ЗАО «Внешторгсервис».

Отзыв положительный, с замечаниями: желательно было бы

- представить более подробные данные по конструктивным и рабочим параметрам сортовой и слябовой (МНЛЗ), для которых выполнялось моделирование температурного поля слитка;

- показать оценку улучшения степени поддержания теплового режима при прогнозном управлении по сравнению с другими существующими на данный момент системами.

5. Поперечный Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оборудования пищевых производств ГО ВПО

«Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского».

Отзыв положительный, с замечаниями:

- При задании граничных условий в зоне вторичного охлаждения коэффициент теплоотдачи зависит от большого числа параметров, но нет достаточного объяснения, из каких источников могут быть получены все эти данные для выполнения практических расчётов;

- Следовало бы указать, каким образом задаются коэффициенты теплопередачи между охлаждающей водой и стенками кристаллизатора в балансовом уравнении, описывающем распределение температуры воды в каналах кристаллизатора (глава 3).

6. Федосов Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «ТФиХОМ» (Технологии формообразования и художественная обработка материалов) ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет».

Отзыв положительный, с замечаниями:

- В главе 2, при задании граничных условий в п. 3, указано «Если разливка производится под шлаком, то тепловой поток от верхней границы металла в кристаллизаторе считается равным нулю». Данное утверждение не учитывает тепловые потери на мениске, связанные с нагревом и плавлением непрерывно или периодически поступающей в кристаллизатор ШОС;

- В главе 4 не рассматривается вопрос о асимметричных условиях охлаждения слитка по внутреннему и внешнему радиусам, что часто является причиной смещения оси жидкой лунки относительно геометрической оси слитка, как это показано на рис. 19. Данный эффект вносит свои коррективы в вопрос определения положения жидкой лунки.

7. Шерemet Михаил Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией моделирования процессов конвективного теплопереноса ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Отзыв положительный, с замечаниями:

- Из автореферата неясно, оценивалось ли в процентном соотношении влияние динамики жидкого металла на параметры процесса разливки;
- Стоило подробно описать используемый численный метод и разностные схемы, применяемые для решения рассматриваемых задач;
- Стоило включить в текст автореферата графическую информацию, отражающую сравнение полученных численных данных с экспериментальными результатами.

8. Картавец Сергей Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологических и энергетических систем ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Отзыв положительный, с замечаниями:

- Следовало бы полнее раскрыть связь объекта исследования с энергетикой металлургического предприятия;
- Недостаточно ясно, с какой точностью осуществляется работа предлагаемой системы диагностики кристаллизатора;
- Следовало бы подробнее изложить возможности повышения ресурсосбережения при применении предлагаемого динамического способа прогнозного управления вторичным охлаждением в переходных режимах разливки.

9. Конопля Сергей Викторович, технический директор ООО «НПО» Ясиноватский машиностроительный завод»

Отзыв положительный, с замечанием:

- Хотелось бы отметить отсутствие в автореферате достаточных данных о конструктивных параметрах, изучаемых МНЛЗ.

10. Вархалёв Юрий Петрович, кандидат физико-математических наук, директор Донецкого государственного научно-исследовательского и проектного института цветных металлов.

Отзыв положительный, с замечаниями:

- В автореферате не дано обоснование выбора явной схемы для численных расчётов, поэтому не ясно, как повлияет на скорость вычислений выбор других схем;

- В автореферате недостаточно освещён вопрос определения границ структурных зон и переходов по результатам моделирования.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области научно-практических исследований тепломассопереноса в процессах непрерывной разливки металлов и наличием публикаций в соответствующей сфере исследования.

Диссертационный совет отмечает, что по своей направленности диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика, а именно в части следующих направлений исследований:

3. Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих теплоту.

5. Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих теплоту, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах.

9. Исследование процессов теплообмена при плавлении и кристаллизации с учётом фазовых превращений.

11. Разработка численных методов расчёта, методов математического и компьютерного моделирования тепломассообменных процессов в различных отраслях промышленного производства.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработан системный подход к проблеме прогнозного моделирования тепловых процессов с фазовыми переходами при кристаллизации непрерывных слитков;

- предложена оригинальная модель расчёта положения двухфазной зоны с

использованием условий Стефана для обеих границ двухфазной зоны непрерывного слитка;

- предложен способ вычисления положения неизвестной границы фазового перехода в задаче Стефана, позволяющий производить расчёты быстрее, чем в режиме реального времени;

- разработана прогнозная модель, основанная на данных системы диагностики о текущих значениях плотности теплового потока, коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, коэффициента теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора и эффективной толщины газового зазора в зависимости от текущих значений перепада температуры охлаждающей воды и её расхода и геометрических параметров гильзы кристаллизатора;

- разработана методика, позволяющая определять оптимальные режимы расхода воды в ЗВО при переходных процессах в разливке;

- доказана перспективность использования анализа поведения кривых скорости продвижения изотермы ликвидус и температурных градиентов на границе фазового перехода разработана методика при выработке режимов функционирования МНЛЗ необходимых для формирования заданной кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- применительно к проблематике прогнозного моделирования тепловых процессов кристаллизации металлов эффективно использован комплекс существующих базовых методов теплофизических исследований, численных методов и экспериментальных методик;

- выполнено системное сопоставление моделей температурного поля с расчётом границ фазового перехода по условиям Стефана, по квазиравновесной модели, по методу введения функции состава гетерогенной смеси, а также по разработанному новому методу нахождения положения двухфазной зоны внутри непрерывного слитка;

- проведена модернизация существующих математических моделей

температурного поля непрерывнолитой заготовки, которая позволяет рассчитывать геометрию двухфазной области, а также скорости продвижения изотерм и границ фазового перехода и градиенты температур вблизи фазового перехода;

- разработана методика расчёта положения границы раздела фаз, заданного условием Стефана, и температуры в узлах вблизи фазового перехода по специальному равномерному шаблону, который позволяет устанавливать для расчёта положения границы тот же шаг по времени, что и для основной явной конечно-разностной схемы расчёта поля температур;

- изложены идеи, аргументы и доказательства рациональности использования средних температур поверхности на участках влияния секций ЗВО как числовых характеристик температурного поля с точки зрения чувствительности к изменениям управляющих параметров процесса разлива и на их базе разработана методика оценки температурного состояния слитка, как на этапе проектирования, так и в процессе функционирования системы автоматического управления МНЛЗ.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- создана система практических рекомендаций, позволяющая выбирать структуру математической модели, наиболее соответствующую требованиям конкретной практической задачи, в частности быстрое действие для прогнозных моделей, вычисление производных при расчётах скоростей и температурных градиентов или имитационное моделирование, замещающее натурные эксперименты;

- разработана математическая модель расчёта положения двухфазной зоны с использованием условий Стефана позволяющая непосредственно во время производственного процесса наблюдать температурное поле непрерывного слитка в любых точках и положение двухфазной зоны в любом сечении;

- разработанная прогнозная модель, основанная на данных системы

диагностики о текущих значениях плотности теплового потока, коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, коэффициента теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора и эффективной толщины газового зазора в зависимости от текущих значений перепада температуры охлаждающей воды и её расхода и геометрических параметров гильзы кристаллизатора, позволяет в режиме реального времени определять тепловое состояние слитка в кристаллизаторе и стенок кристаллизатора;

- разработана и внедрена методика расчета поведения формы двухфазной зоны и глубины жидкой лунки в зависимости от динамики процесса разливки, позволяющая вырабатывать рекомендации по подбору конструктивных и технологических параметров при разработке новых, а также модернизации существующих МНЛЗ, с целью повышения производительности при наиболее строгом соблюдении требований к температурному режиму разливки (Акт внедрения, 2018г.);

- разработана и внедрена методика расчета рациональных параметров форсуночного охлаждения соответствующих наименьшим термическим напряжениям, а, следовательно, обеспечивающих наилучшее возможное качество металла, производимого машиной непрерывного литья заготовок (Акт внедрения, 2012г.);

- определены пригодные для использования при управлении процессом разливки характеристики температурного поля непрерывного слитка, наиболее чувствительные к изменениям управляющих параметров (расходов охлаждающей воды) и соответствующие технологическим требованиям обеспечения качественной продукции;

- разработана методика, позволяющая определять оптимальные режимы расхода воды в ЗВО при переходных процессах в разливке;

- разработанная прогнозная математическая модель теплового поля и температурных градиентов, позволяет определять режимы функционирования МНЛЗ для получения необходимой структуры непрерывнолитой заготовки.

Достоверность результатов исследования обосновывается тем, что:

- результаты экспериментальных исследований выполнены с применением современных методов в промышленных и лабораторных условиях;

- теоретические положения работы основываются на апробированных классических подходах к изучению явлений тепломассопереноса в непрерывнолитых заготовках и оборудовании МНЛЗ;

- основные результаты работы согласуются с результатами собственных экспериментов и опубликованными экспериментальными данными известных исследований температурных полей непрерывных слитков;

- в работе корректно использованы современные методы теории эксперимента и статистические методики сбора и обработки исходной информации с обоснованием подбора объектов исследований и измерений.

Основные результаты диссертации докладывались на более, чем 30 научных конференциях, в том числе на: Научно-технической конференции «Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали» посвященной 140-летию ДМЗ (Донецк, 2011); XIII International Scientific Conference "New Technologies and Achievements in Metallurgy and Material Engineering" (Częstochowa, Polska, 2012); 20th Conference on applied and industrial mathematics CAIM 2012, (Chisinau, Republic of Moldova, 2012); 22nd International conference on metallurgy and materials (Brno, Czech Republic, 2013); 15th IFAC symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Minerals and Metals Processing (MMM2013), (San Diego, California, 2013); V Международной научно-технической конференции "Металлургические процессы и оборудование" (Донецк, 2013); ICIPE2014 8th International Conference on Inverse Problems in Engineering, (Krakow, Poland, 2014); 8th European Continuous Casting Conference (Graz, Austria, 2014); METEC & 2nd ESTAD 2015 European Steel Technology and Application Days (Dusseldorf, Germany, 2015); Международной научно-практической конференции "Математика в производственных процессах", (Санкт-Петербург, Россия, 2015); XIX и XX Международных научно-практических конференциях «Металлургия: технологии, инновации, качество»

(Новокузнецк, Россия, 2015 и 2017); XVI International Scientific Conference „Quality Assurance In Foundry “ (Arłamów, Poland, 2016); XV Минском международном форуме по теплообмену (Минск, 2016); 18th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy ICCGE-18 (Nagoya, Japan, 2016); 57 th International Scientific Conference "Solidification and Crystallization of Metals 2016" (Kielce - Cedzyna, Poland, 2016); XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa "Zapewnienie jakości w odlewnictwie i spawalnictwie" (Grand Hotel Permon, Słowacja, 2017), XVII международной научной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали» (Старый Оскол, РФ, 2017), International Scientific Conference on "Achievements in Mechanical and Materials Engineering" AMME`2017 (Gliwice - Wisła, Poland, 2017), XI International Conference on Computational Heat, Mass and Momentum Transfer ICCHMT`2018 (Cracow, Poland, 2018), VII Krajowa Konferencja “Nowe Materiały – Nowe Technologie w Przemysle Okretowym”, Akademia Morska, Szczecin, Poland, 11-14 June, 2018

Личный вклад соискателя состоит в том, что:

- разработаны методика и алгоритмы расчёта положения границы раздела фаз, заданного условием Стефана, и температуры в узлах вблизи фазового перехода, позволяющие устанавливать для расчёта положения границы тот же шаг по времени, что и для основной явной конечно-разностной схемы расчёта поля температур;

- разработана математическая модель температурного поля непрерывнолитой заготовки с определением положения границ двухфазной зоны по условиям Стефана, сформулированным отдельно для ликвидуса и солидуса, которая позволяет рассчитывать геометрию двухфазной области, а также скорости продвижения изотерм и границ фазового перехода и градиенты температур вблизи фазового перехода;

- выполнено системное сопоставление моделей температурного поля с расчётом границ фазового перехода по условиям Стефана, по квазиравновесной модели, по методу введения функции состава гетерогенной смеси, а также по разработанному новому методу нахождения положения двухфазной зоны

внутри непрерывного слитка;

- разработаны методы диагностики теплового состояния кристаллизатора и части слитка, находящейся в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ, основанные на прогнозной модели, включающей решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с условиями Стефана и граничными условиями третьего рода, в которых введена специальная величина коэффициента теплопередачи от наружной поверхности корки к охлаждающей воде, определяемая в режиме реального времени из плотности теплового потока, итогового коэффициента теплопередачи в кристаллизаторе, коэффициента теплоотдачи от корочки заготовки к внутренней поверхности кристаллизатора и эффективной толщины газового зазора в зависимости от текущих значений перепада температуры охлаждающей воды и её расхода и геометрических параметров гильзы кристаллизатора;

- исследована чувствительность глубины жидкой лунки и формы двухфазной зоны к изменениям технологических, конструктивных и теплофизических параметров процесса непрерывной разливки, позволяющая вырабатывать стратегию усовершенствования технологии разливки, направленную на повышение производительности и качества непрерывнолитой заготовки;

- разработаны критерии качества температурного поля непрерывнолитой заготовки;

- разработана методика определения оптимальных расходов воды в ЗВО путём замены алгоритмов разомкнутого управления и/или регулирования прогнозными расчётами, дающая возможность максимально строгого соблюдения температурного режима непрерывного слитка при управлении вторичным охлаждением в переходных процессах разливки, а также имитационного моделирования на этапе проектирования конструкции и системы автоматического управления МНЛЗ;

- разработана новая методика, основанная на математическом моделировании температурного поля и анализе качественного поведения

