

На правах рукописи

**Колдин Александр Викторович**

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ СТРУЙНОМ ОХЛАЖДЕНИИ  
ДВИЖУЩЕГОСЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛИСТА**

Специальность: 01.04.14 –Теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2012

Работа выполнена на кафедре физики физико-математического факультета ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент  
Платонов Николай Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Толмачев Евгений Михайлович

доктор технических наук, профессор  
Конахина Ирина Александровна

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
металлургической теплотехники ОАО  
«ВНИИМТ», г. Екатеринбург

Защита состоится «29» мая 2012 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.07 при ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5 (8-й учебный корпус УрФУ), ауд. Т -703.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО УрФУ.

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ФГАОУ ВПО УрФУ, ученому секретарю совета. Телефон (343) 375-45-74, факс (343) 375-94-62, e-mail: [lta\\_ugtu@mail.ru](mailto:lta_ugtu@mail.ru), [tot@ustu.ru](mailto:tot@ustu.ru).

Автореферат разослан «27» апреля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



К.Э. Аронсон

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Огромные объемы металлического листа в прокатном производстве выпускаются с обязательной термической обработкой струями жидкости. Термообработка металла существенно влияет на характеристики изделия. Анализ существующих технологий и научных сведений указывает на отсутствие достаточно надежных физико-математических моделей теплообмена при струйном охлаждении движущегося металлического листа, что на практике приводит к снижению темпов производства и качества выпускаемой продукции. Отсутствие надежных моделей и методик расчета обусловлено сложностью аналитического и экспериментального решения задачи теплообмена, наличием нескольких зон теплообмена с резко различающимися тепловыми потоками. Для совершенствования технологии термообработки возникает необходимость в разработке модели теплообмена при охлаждении металлического листа струями жидкости.

**Цель работы.** Численное исследование теплообмена в подвижном металлическом листе, охлаждаемого системой струй плоского и круглого сечений с учетом нескольких основных зон теплообмена.

### **Задачи исследования:**

1. Определить границы зон теплообмена при струйном охлаждении горячей поверхности, а также выявить наиболее значимые зависимости для расчета теплообмена в этих зонах.
2. Сформировать физико-математическую модель струйного охлаждения движущегося металлического листа с учетом основных зон теплообмена.
3. Разработать на основе модели теплообмена программу численного расчета температурного поля в движущемся листе при ее охлаждении произвольным числом струй плоского или круглого сечений.

4. Исследовать процесс охлаждения движущегося металлического листа одиночной плоской струей, а также системой плоских струй;
5. Исследовать поле температуры при охлаждении листа системой струй круглого сечения при различных сочетаниях взаимного расположения верхних и нижних струй.
6. Определить влияние геометрических и гидродинамических параметров систем струйного охлаждения на распределение температуры в листе в процессе охлаждения.
7. Проверить адекватность физико-математической модели на действующей линии ускоренного охлаждения движущегося металлического листа.
8. Выработать рекомендации по совершенствованию процесса ускоренного охлаждения в прокатном производстве.

**Достоверность и обоснованность результатов** обеспечивается использованием физико-математических моделей, основанных на общих закономерностях, не противоречащих классическим законам физики, современных признанных методов численного расчета. Корректность расчета была проверена на классических задачах теплообмена. Данные расчетов по предложенной модели согласуются с данными охлаждения горячекатаного листа стана 2000 ОАО «ММК».

**Научная новизна:**

1. Сформирована физико-математическая модель теплообмена при охлаждении движущегося металлического листа системой плоских струй с учетом всех основных зон теплообмена на ее поверхностях.
2. Сформирована физико-математическая модель теплообмена при охлаждении движущегося листа системой струй круглого сечения.
3. Получены новые данные о влиянии гидродинамических и геометрических параметров системы плоских и круглых струй на распределение температуры в подвижном металлическом листе.

4. Впервые исследовано влияние взаимного расположения верхних и нижних струй круглого сечения на характер температурного поля в движущемся листе.

**Практическая значимость:**

1. Данные о распределении температуры в движущемся листе и скорости отвода теплоты, основанные на предложенной модели теплообмена, позволяют выбрать необходимую систему струйного охлаждения, обеспечивающую наилучшее сочетание качества, экономичности и темпов производства выпускаемой продукции.
2. Выбор параметров струйной системы на основе результатов расчета по предлагаемой модели позволит избежать существенных отклонений от необходимого режима термообработки, приводящих к снижению качества изделия.
3. Результаты исследования использованы при проектировании реконструкции системы охлаждения стана 2000 горячей прокатки. Получен акт внедрения результатов работы на ОАО «ММК».

**Автор защищает:**

1. Физико-математическую модель охлаждения движущегося металлического листа струями жидкости с учетом зон переходного кипения, пленочного кипения и воздушного охлаждения.
2. Результаты численного исследования теплообмена при охлаждении движущегося металлического листа одиночной плоской струей.
3. Результаты численного исследования теплообмена при охлаждении движущегося металлического листа системой плоских струй.
4. Результаты численного исследования теплообмена при охлаждении движущегося металлического листа системой струй круглого сечения.
5. Результаты исследования влияния геометрических параметров струйной системы и параметров листа на теплообмен.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции «80 лет Уральской теплоэнергетике. Образование. Наука» (Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003); XLIII внутривузовской научной конференции преподавателей МаГУ «Современные проблемы науки и образования» (Магнитогорск, 2005); XXXX зональной конференции преподавателей физики, методики преподавания физики, астрономии, общетехнических дисциплин (Орск: ОГТИ, 2007); Всероссийской школе-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании» (Уфа: БашГУ, 2007), IV-ой Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань: КГЭУ, 2009), конкурсе программы «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» («УМНИК») (Челябинск: ЮУрГУ, 2009), IV-ом Международном промышленном форуме (Челябинск: Всемирный торговый центр, 2011).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, из них 4 относятся к изданиям, рекомендованных ВАК для опубликования результатов кандидатской диссертации.

**Личный вклад автора** заключается в самостоятельном анализе литературных данных, составлении физико-математической модели теплообмена, разработке программы численного исследования процесса теплообмена, обработке и обобщении результатов исследования.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 81 наименований, и приложений; содержит 129 страниц, 53 рисунка и 3 таблиц по тексту, а также 6 страниц приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель, определен круг основных задач исследования, отражены научная новизна и

практическая значимость полученных результатов, представлены главные положения, выносимые на защиту.

*В первой главе* проведен анализ литературных данных, посвященных описанию различных систем охлаждения металлического листа (рис.1), методам расчета средней и локальной температуры листа в процессе охлаждения, механизмам теплообмена при струйном охлаждении. На основании проведенного анализа литературных данных сделаны следующие выводы:

1. Системы со струями круглого и плоского сечения являются наиболее используемыми, так как они более эффективны по сравнению с распылительными системами. При этом отсутствуют надежные физико-математические модели теплообмена именно для систем струйного охлаждения из-за сильной неравномерности тепловых потоков на обеих поверхностях горячего листа.
2. В процессе охлаждения возникают особые условия теплообмена при натекании струи на горячую металлическую поверхность имеющей температуру выше температуры кипения жидкости. Особенность процесса состоит в том, что на поверхности горячего листа находится тонкий слой охлаждающей жидкости и ее температура значительно ниже температуры насыщения. В таком случае достаточно хорошо известные уравнения теплообмена, применяемые для расчета кипения большого объема, становятся неприемлемыми.
3. Тепловые потоки с поверхности полосы при струйном охлаждении заметно превышают характерные тепловые потоки пленочного режима кипения жидкости, несмотря на высокую температуру охлаждаемой поверхности (от 1000 до 500°C).
4. При струйном охлаждении на поверхности металла существуют зоны с резко различающимися механизмами теплообмена, причем в научной печати нет единого мнения о границах этих зон (рис. 2).

5. Экспериментальные данные свидетельствуют о наличии тонкого и очень нестабильного слоя пара между натекающей струей воды и металлической поверхностью с температурой от 300 до 1000 °С, при этом теплообмен происходит в режиме, характерном для режима переходного кипения жидкости.
6. На тепловой поток в зоне натекания струи на горячую поверхность оказывают значительное влияние такие параметры как: температурный напор, скорость натекания струи, диаметр струи, начальная температура жидкости. В научной литературе недостаточно сведений о влиянии указанных параметров на процесс струйного охлаждения металлического листа.

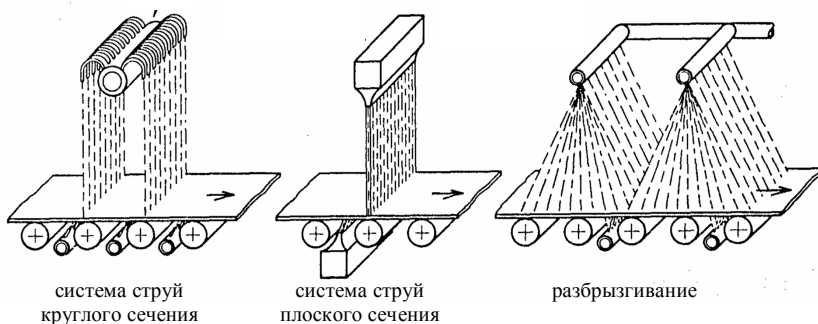


Рис. 1. Способы ускоренного охлаждения металлической полосы

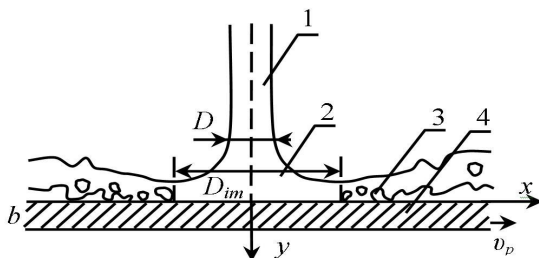


Рис. 2. Схема взаимодействия струи с горизонтальным листом: 1 – струя жидкости, 2 – зона столкновения, 3 – зона пленочного кипения, 4 – металлический лист

На основании анализа литературных данных сформулированы задачи исследования.



**Во второй главе** сформирована комплексная физико-математическая модель теплообмена при охлаждении подвижного металлического листа системой плоских и круглых струй, с учетом различных механизмов теплообмена в зонах охлаждения, а также описан метод численного решения полученной системы уравнений.

При большой скорости движения полосы, характерной для типичных условий ускоренного охлаждения, распространением теплоты за счет теплопроводности в направлении движения полосы можно пренебречь. Тогда, уравнение энергии движущейся полосы вместе с граничными условиями на поверхностях можно записать в виде:

$$\frac{\partial(\rho v_p c T)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0,b} = q(x, z). \quad (1)$$

Для системы плоских струй при условии, что ширина листа намного больше его толщины, распределением температуры в направлении  $z$  можно пренебречь. Тогда уравнение (1) можно записать в виде одномерного дифференциального уравнения теплопроводности.

Принято, что при условиях характерных для ускоренного охлаждения (сильный недогрев воды и высокая температура поверхности) в зоне столкновения теплообмен происходит в режиме переходного кипения недогретой жидкости. Вне зоны столкновения на верхней поверхности полосы осуществляется теплообмен при пленочном кипении. Таким образом, для системы струйного охлаждения металлического листа выделены следующие основные зоны и механизмы теплообмена в них:

- а) в зоне столкновения струи с листом - теплообмен в условиях переходного кипения жидкости;
- б) за пределами зоны столкновения - теплообмен в режиме пленочного кипения жидкости;
- в) в зоне воздушного охлаждения конвективный и радиационный теплообмен.

Указанные зоны и механизмы теплопередачи существуют одновременно на поверхности металлического листа.

Очевидно, что избыточное давление на поверхности в области натекания струи и возмущения в жидкости вследствие удара препятствуют образованию стабильной паровой пленки, характерной для режима пленочного кипения. Таким образом, за границу зоны столкновения решено принять линию, на которой избыточное давление в струе падает до нуля. Экспериментальные данные, полученные Т. Ochi и др. в работе «Cooling of a hot plate with an impinging circular water jet» (Amsterdam, 1984), позволяют получить уравнение для давления в области натекания круглой струи в виде:

$$P^*(r) = \frac{P - P_0}{P_s - P_0} = 1 - 0,61 \left( \frac{r}{D} \right)^2, \quad (2)$$

где  $P_s$  – давление в критической точке;  $P_0$  – атмосферное давление;  $r$  – расстояние от оси струи;  $D$  – диаметр натекающей струи. Распределение давления на поверхности плиты для случая натекания плоской струи определено из условий, полученных D. A. Zumbrenen и др. (1992) в виде уравнения:

$$P^*(r) = \left( \frac{r}{1,75D} \right)^2 \left( \frac{2r}{1,75D} - 3 \right) + 1, \quad (3)$$

где  $D$  – ширина плоской струи;  $r$  – расстояние от центральной плоскости струи.

Распределение давления в области натекания струи (уравнения (2) и (3)) позволяют найти вертикальную составляющую скорости в произвольной точке зоны столкновения, а также ее размеры. Необходимо учесть, что по мере приближения струи к поверхности листа ее диаметр или ширина (для плоской струи) изменяются.

На основе модели предложенной Y. Miyasaka в работе «Critical heat flux and subcooled nucleate boiling in transient region between a two-dimensional water jet and a heated surface» (1980), а также ряда экспериментальных работ

других авторов по теплообмену в критической точке, получено следующее соотношение для локальной плотности теплового потока в зоне столкновения:

$$q_{im}(r) = A \cdot 8,67 \times 10^7 \Delta T_{sat}^{-0,385} \left[ 1 + 0,4 \left( \frac{v_{im}(r)}{100D} \right)^{0,4} \right], \quad (4)$$

$$A = \frac{q_c(\Delta T_{sub})}{q_c(80^\circ C)}, \quad q_c = 0,16\gamma\rho_v \left[ \frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{\frac{1}{4}} \times \left[ 1 + 0,112 \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,8} \left( \frac{c_{pl}\Delta T_{sub}}{\gamma} \right)^{1,13} \right],$$

где  $\Delta T_{sat} = T_p - T_s$ ,  $T_p$  – температура поверхности листа;  $T_s$  – температура насыщения воды;  $v_{im}(r)$  – вертикальная составляющая скорости струи в зоне столкновения;  $q_c$  – критическая плотность теплового потока при кипении недогретой жидкости в свободном объеме;  $\Delta T_{sub}$  – недогрев воды до температуры насыщения;  $\gamma$  – теплота парообразования;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_l$ ,  $\rho_v$  – плотность жидкости (воды) и пара соответственно;  $c_{pl}$  – удельная теплоемкость жидкости.

Расчет теплоотдачи между струями проведен с использованием аналитической модели пленочного кипения жидкости на движущейся горизонтальной поверхности, описанной J. Filipovic и др. в работе «An analysis of subcooled turbulent film boiling on a moving isothermal surface» (1994):

$$Nu_x = 0,0197 \frac{\mu_l}{\mu_v} \beta \left( \bar{u}_\infty - \bar{u}_s \right)^{0,6} \left( 2\bar{u}_s + 7\bar{u}_\infty \right)^{0,2} Re_x^{0,8} Pr_l^{2/3}, \quad (5)$$

$$Nu_x = \frac{q_f x}{\lambda_v (T_p - T_s)}, \quad Re_x = \frac{u_i x}{\nu_l}, \quad \beta = \frac{Pr_v c_{pl} (T_s - T_\infty)}{Pr_l c_{pv} (T_p - T_s)},$$

$$\bar{u}_s = \frac{\bar{u}_\infty + \beta Pr_l^{2/3} \bar{v}_p}{1 + \beta Pr_l^{2/3}}, \quad \bar{u}_s = \frac{u_s}{u_i}, \quad \bar{u}_\infty = \frac{u_\infty}{u_i}, \quad \bar{v}_p = \frac{v_p}{u_i},$$

где  $\mu_l$ ,  $\mu_v$  – динамическая вязкость жидкости и пара;  $Pr_l$ ,  $Pr_v$  – критерии Прандтля для жидкости и пара;  $\lambda_v$  – теплопроводность пара;  $\nu_l$  – кинематическая вязкость жидкости;  $c_{pl}$ ,  $c_{pv}$  – удельная теплоемкость жидкости

и пара;  $u_s$  – скорость границы раздела фаз жидкость-пар;  $u_i$  – максимальная скорость в системе;  $q_f$  – плотность теплового потока в зоне пленочного кипения жидкости. В зоне пленочного кипения также учитывалось влияние теплообмена излучением и изменение температуры воды в основном потоке  $T_\infty$ . Скорость движения воды в основном потоке  $u_\infty$ , была принята равной скорости натекания струи.

На нижней стороне листа зона пленочного кипения отсутствует, так как жидкость из нижнего сопла, сталкиваясь с полосой за пределами зоны столкновения распадается на капли и падает вниз. Таким образом, с нижней стороны листа вне зоны столкновения имеет место зона взаимодействия металлической поверхности с воздушной средой, в которой происходит конвективный и радиационный теплообмен.

На промежутке между двумя соседними зонами столкновения на нижней поверхности плотность теплового потока, обусловленная излучением, определяется как:

$$q_r = S\varepsilon(T_p)((T_p + 273)^4 - (T_a + 273)^4), \quad (6)$$

где  $S$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T_a$  – температура окружающего воздуха; коэффициент  $\varepsilon(T_p)$  для стали (С. Devadas, I. V. Samarasekera, 1986):

$$\varepsilon(T_p) = 1,1 + \frac{T_p}{1000} \left( 0,125 \frac{T_p}{1000} - 0,38 \right). \quad (7)$$

Конвективная составляющая теплового потока при охлаждении в воздушной среде находилась из следующего критериального уравнения:

$$\text{Nu} = 0,036 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{1/3}. \quad (8)$$

Модель и уравнения, представленные во второй главе работы, послужили основой для составления программы численного исследования.

**В третьей главе** представлены результаты расчета распределения температуры в движущемся листе при охлаждении одиночной плоской струей, а также системой плоских струй. На основе полученных данных проведен анализ влияния условий натекания струи, скорости движения

полосы и расстояния между плоскими струями на локальную и среднюю температуру металлического листа.

Для решения уравнения (1) использовалась неявная конечно-разностная схема, обеспечивающая безусловную сходимость результатов расчета. Полученные разностные уравнения решались классическим методом прогонки.

При проведении ряда численных экспериментов по охлаждению подвижного металлического листа системой плоских струй были выбраны параметры, характерные для линии ускоренного охлаждения в прокатном производстве.

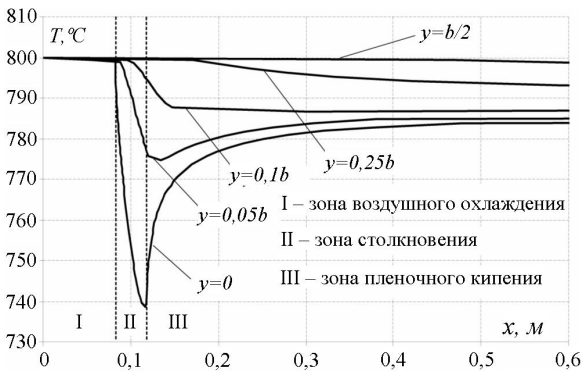


Рис. 3. Распределение температуры в направлении движения полосы при охлаждении ее одиночной верхней струей: толщина полосы 4 мм, скорость движения 8 м/с

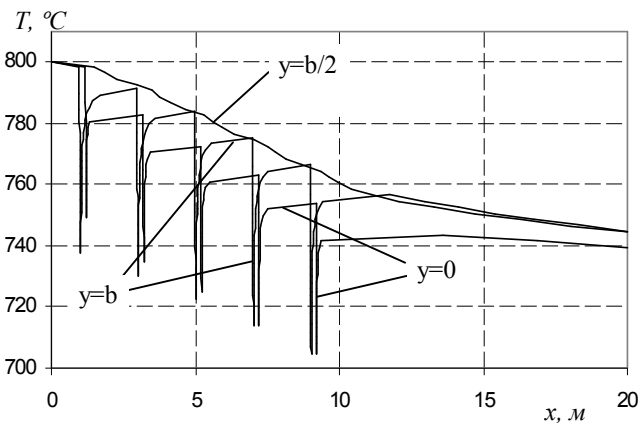


Рис. 4. Распределение температуры в направлении движения полосы толщиной 4 мм и скоростью движения 10 м/с при охлаждении системой плоских струй

Данные исследования позволили установить, что в зоне столкновения струи происходит резкое падение температуры на поверхности полосы (рис. 3, 4). При высоких скоростях движения полосы значительный градиент температуры в зоне столкновения наблюдается в очень тонком температурном слое (рис. 3). В точке поверхности, прошедшей зону столкновения, температура быстро релаксирует и далее изменяется незначительно. Локальный тепловой поток в зоне столкновения на нижней поверхности меньше, чем на верхней. Тем не менее, температурные всплески на нижней поверхности заметно выше. Это объясняется наличием на нижней поверхности листа более широкой зоны столкновения из-за действия на струю гравитационной силы, вследствие чего ширина нижней струи увеличивается, а верхней – уменьшается. За пределами зоны столкновения температура на нижней поверхности листа выше, чем на верхней, и на некоторых участках превышает температуру середины полосы. Увеличение скорости движения полосы приводит к уменьшению температурных всплесков в зоне столкновения, а также обеспечивает более равномерное охлаждение средней части полосы.

**В четвертой главе** исследован теплообмен между подвижным металлическим листом и системой круглых струй. При этом рассмотрены две схемы струйного охлаждения, отличающиеся взаимным расположением верхних и нижних струй. На рис. 5а показана схема, в которой центры нижних струй расположены на одной линии с центрами верхних струй в направлении движения листа. Такая схема условно названа линейной. В другом случае центры нижних и верхних струй расположены в шахматном порядке относительно друг друга (рис. 5б). В данной работе предлагается использовать в нижней части листа в два раза больше форсунок, чем в верхней части и таким образом значительно снизить неравномерность охлаждения верхней и нижней сторон листа. При этом верхние струи между собой выгодно располагать в шахматном порядке, для уменьшения

неравномерности охлаждения верхней стороны листа в направлении движения. Такое взаимное расположение верхних и нижних струй позволяет выделить линии симметрии, которые могут служить границами области расчета температуры (рис. 5).

Для численного решения описанной выше математической модели теплообмена составлена программа, основанная на методе независимых потоков (С. В. Гейн и др. Метод независимых потоков для численного решения многомерного уравнения теплопроводности, Москва, 2003).

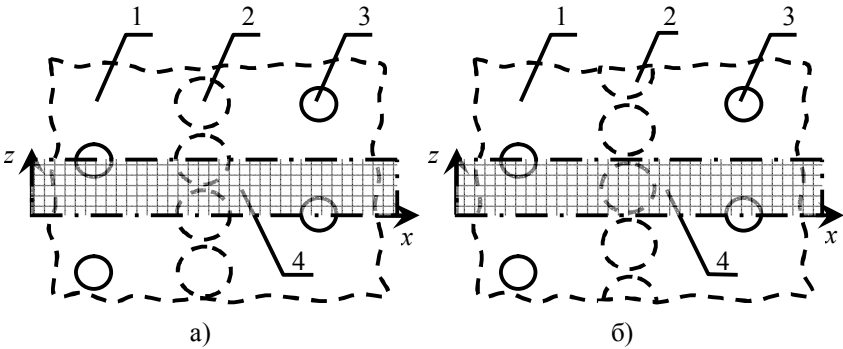


Рис. 5. Схема взаимного расположения струй круглого сечения (а) – линейная схема, б) – шахматная схема): 1 – металлический лист, 2 – зона столкновения нижней струи, 3 – зона столкновения верхней струи, 4 – расчетная область

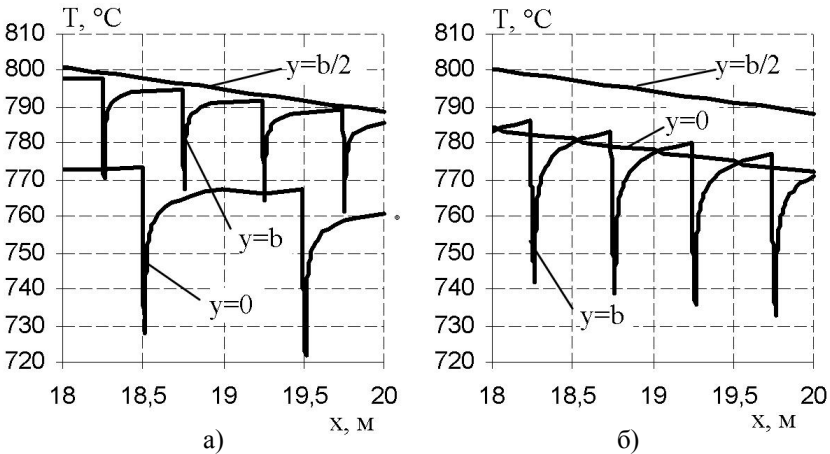


Рис. 6. Распределения температуры в направлении движения листа при линейной схеме охлаждения: а) – на линии верхних струй; б) – на линии нижних струй

Численное исследование теплообмена проведено в широком диапазоне параметров системы охлаждения с различным набором значений скорости движения и толщины листа.

На рис. 6 представлено распределение температуры в направлении движения листа (скорость – 10 м/с, толщина – 4 мм) по линии, соединяющей центры струй соседних рядов. В данном направлении распределение температуры подобно аналогичным распределениям для плоско-струйной системы. Распределение температуры в поперечном направлении может принимать достаточно сложную форму, особенно в системе с шахматной схемой расположения струй (рис. 7).

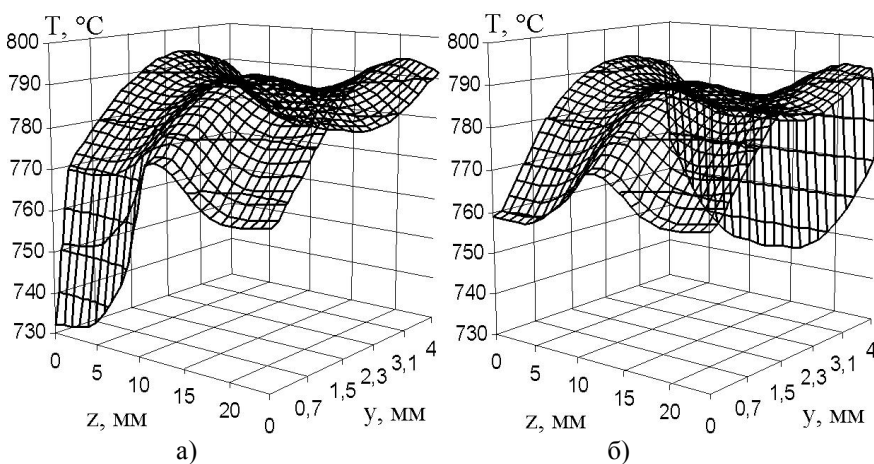


Рис. 7. Поле температур на срезе 39-го ряда при шахматной схеме охлаждения: а) – верхних струй; б) – нижних струй

Исследование влияния схемы расположения струй на температурное поле в листе проведено при идентичном наборе гидродинамических, геометрических и теплофизических параметров, характерных для линии ускоренного охлаждения, а именно: (температура воды - 20°C; для верхних струй: начальный диаметр – 15 мм, высота – 2 м, начальная скорость – 2 м/с; для нижних струй: начальный диаметр – 10 мм, высота – 0,1 м, начальная скорость – 3 м/с; теплофизические свойства металла (сталь):  $\lambda$  – 35 Вт/(м·К),



$c - 700$  Дж/(кг·К),  $\rho - 7800$  кг/м<sup>3</sup>). Скорость листа при этом составляла 10 м/с, начальная температура - 900°C. На рис. 8 и рис. 9 показаны поперечные распределения температуры листа охлаждаемого системой с двумя различными схемами расположения струй при следующих геометрических параметрах: расстояние между центрами верхних струй в ряду ( $z$ ) - 70 мм, расстояние между рядами струй ( $x$ ) - 0,5 м, толщина листа ( $y$ ) - 4 мм.

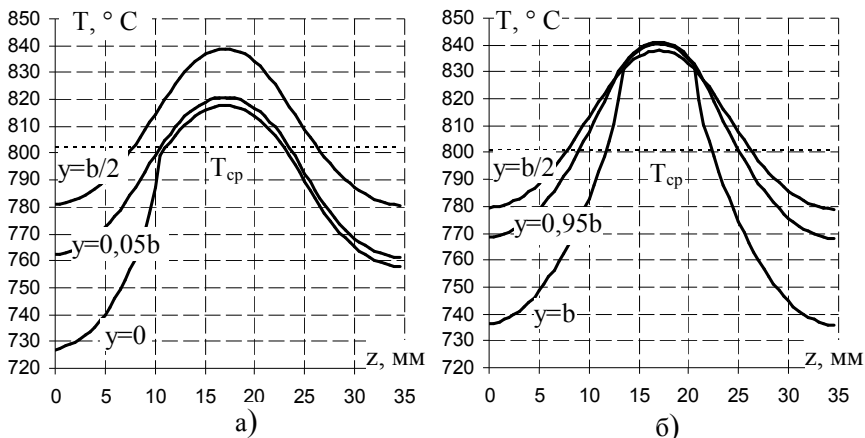


Рис. 8. Поле температур при линейной схеме охлаждения на срезе 39-го ряда:  
а) – верхних струй; б) – нижних струй

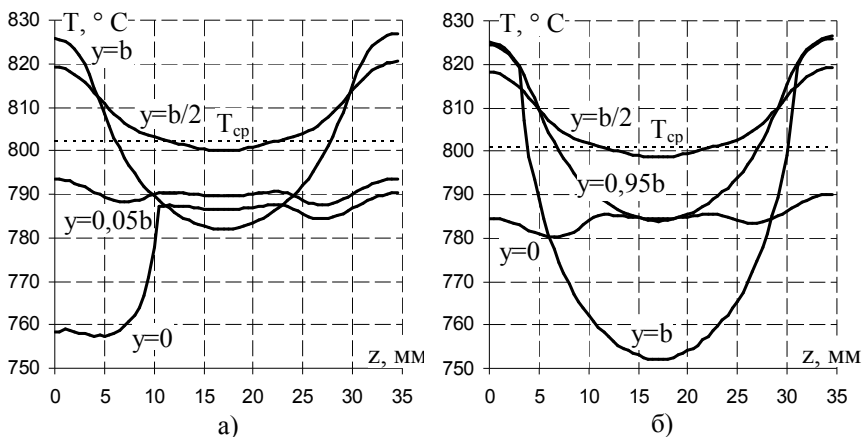


Рис. 9. Поле температур при шахматной схеме охлаждения на срезе 39-го ряда:  
а) – верхних струй; б) – нижних струй

Также в данной серии опытов были проведены численные эксперименты при изменении каждого из трех пространственного параметра  $x, y, z$ .

**В пятой главе** проведена опытная проверка модели охлаждения подвижного металлического листа системой струй круглого сечения. На основе полученных данных выработаны рекомендации по совершенствованию технологии струйного охлаждения.

Для анализа достоверности получаемых результатов проведен ряд расчетов с начальными параметрами выбранного температурного режима действующего стана 2000. Расчеты были проведены для листа толщиной 3 мм и 3,99 мм марки 08кп, теплофизические свойства которой можно найти в открытых источниках. Рассчитанные температуры смотки для обеих полос не выходят за пределы допустимых значений температур смотки согласно таблице температурных режимов стана 2000 ОАО «ММК», при этом темпы охлаждения этих полос совпадают с точностью до  $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 10). Такие данные сравнения позволяют считать достоверной предлагаемую физико-математическую модель теплообмена при охлаждении подвижного металлического листа струйной системой, а расчетную программу – корректной.

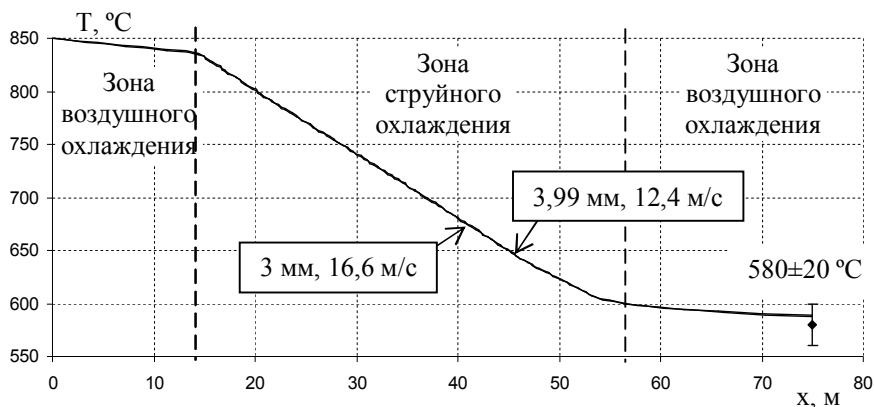


Рис. 10. Расчетное падение среднemasовой температуры листа в исследуемой системе охлаждения

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены зоны теплообмена при струйном охлаждении металлического листа, их границы, механизмы теплопередачи в этих зонах. В частности принято, что теплообмен в зоне столкновения при условиях, характерных для процесса ускоренного охлаждения металлического листа происходит в режиме переходного кипения жидкости.

2. Получено соотношение для локальной плотности теплового потока в зоне столкновения, учитывающее влияние скорости натекания струи, диаметра струи, недогрева жидкости, температурного напора поверхности. Сформирована физико-математическая модель процесса струйного охлаждения с учетом всех зон теплообмена, позволяющая рассчитать температурное поле в движущемся листе.

3. Разработана программа численного решения модели теплообмена при охлаждении движущейся полосы системой плоских струй. На основе полученных данных проведен анализ влияния условий натекания струи на распределение температуры при охлаждении движущейся полосы одиночной плоской струей, а также влияние расстояния между струями, скорости движения и толщины полосы при ее охлаждении системой плоских струй.

4. Разработана программа численного решения многомерного уравнения теплопроводности для расчета теплообмена при охлаждении подвижного листа системой круглых струй. Произведен расчет температурного поля при различных сочетаниях расстояний между струями системы охлаждения и толщины листа. Показано влияние этих параметров на локальную и среднюю температуру листа.

5. Выделены и численно исследованы две принципиальные схемы взаимного расположения верхних и нижних струй круглого сечения. Исследования показали, что при одинаковых режимах охлаждения схема расположения круглых струй существенно влияет на локальную температуру в листе, но при этом средняя по сечению температура практически не

изменяется. Более равномерное распределение температуры по толщине листа наблюдается в схеме линейного расположения струй, а по ширине листа – в схеме шахматного расположения струй.

6. Результаты исследования реализованы при выполнении научно-исследовательской работы в связи с реконструкцией системы охлаждения стана 2000 ОАО «ММК». Получен акт внедрения.

7. Выработаны рекомендации по совершенствованию процесса ускоренного охлаждения полосы в прокатном производстве.

#### **Основные публикации по теме диссертации**

1. Колдин, А.В. Исследование теплообмена в поверхностном слое металла при натекании жидкой струи / А. В. Колдин, Н. И. Платонов // Теплоэнергетика. – 2008. – № 3. 2008. – С. 37-40.
2. Колдин, А.В. Исследование теплообмена в подвижном металлическом листе при струйном охлаждении / А.В. Колдин, Н.И. Платонов, В.П. Семенов // Вестник Челябинского государственного университета. – 2008. – № 25. Физика. – Вып. 3. – С. 60-67.
3. Колдин, А.В. Некоторые технико-экономические показатели контактного теплообменника с пленочными форсунками / В.П. Семенов, Н.И. Платонов, А.В. Колдин, А.А. Хорев // Вестник УГТУ-УПИ. Теплоэнергетика. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. – С. 76-79.
4. Колдин, А.В. Исследование процесса теплообмена между металлическим листом и кипящей жидкостью / А.В. Колдин, Н.И. Платонов, В.П. Семенов // Вестник ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. 80 лет Уральской теплоэнергетики. Образование. Наука: Сб. тр. Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – С. 155-159.
5. Колдин, А.В. Исследование тепловых процессов на участке ламинарного охлаждения полосы стана 2000 г.п. ОАО «ММК» с использованием методов математического моделирования / Р.Р. Дема, Д.А. Кувшинов, Д.Н. Мазин, А.В. Колдин // Четвертый международный промышленный форум «Реконструкция промышленных предприятий – прорывные технологии в металлургии и машиностроении»: сб. докл. конф. «Инновационные технологии в обеспечении качества, энергоэффективности и экологической безопасности. Повышение конкурентоспособности металлургических и машиностроительных предприятий в современных условиях». – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им Носова, 2011. – С.137-140.

6. Колдин, А.В. Особенности теплообмена на подвижной высокотемпературной металлической поверхности при струйном охлаждении / А.В. Колдин, Н.И. Платонов // Теплофизика и теплоэнергетика: сб. науч. ст. – Магнитогорск: МаГУ, 2010. – С. 173-179.
7. Колдин, А.В. Расчет поля температур в подвижном металлическом листе при струйном охлаждении / А.В. Колдин // Материалы докладов IV-й Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю.Я. Петрушенко. В 4 т. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – Т. 2. – С. 212-214.
8. Колдин, А.В. Исследование теплообмена при охлаждении подвижного металлического листа системой круглых струй / А.В. Колдин, Н.И. Платонов // Всероссийская школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: Материалы докладов. Физика. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2008.
9. Колдин, А.В. Влияние геометрических параметров системы струйного охлаждения на теплообмен в подвижном металлическом листе / А.В. Колдин, Н.И. Платонов // Фундаментальные науки и образование: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции (Бийск, 30 января – 1 февраля 2008 г.) – Бийск: БПГУ им. В. М. Шукшина, 2008. – С. 74-78.
10. Колдин, А.В. Исследование теплообмена при охлаждении движущейся полосы плоскоструйной системой / А.В. Колдин // Современные проблемы науки и образования: Тезисы докладов внутривузовской научной конференции преподавателей МаГУ. – Магнитогорск: МаГУ, 2007.
11. Колдин, А.В. Исследование теплообмена при струйном охлаждении горизонтально-движущейся металлической полосы / А.В. Колдин, Н.И. Платонов // НАУКА–ВУЗ–ШКОЛА: Сб. науч. тр. молодых исследователей. – Магнитогорск: МаГУ, 2007.
12. Колдин, А.В. Исследование теплообмена при охлаждении движущейся полосы системой круглых струй / А.В. Колдин, Н.И. Платонов // Всероссийская школа-конференция для студентов, аспирантов и молодых ученых «Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании»: Тезисы докладов. Физика. – Уфа: БашГУ, 2007. – с. 77.
13. Колдин, А.В. Исследование теплообмена при струйном охлаждении горизонтальной полосы / А.В. Колдин, Н.И. Платонов // Совершенствование профессионально-методической подготовки учителя физики, астрономии, общетехнических дисциплин в условиях модернизации российского образования: материалы XXXX зональной конференции преподавателей физики, методики преподавания физики, астрономии, общетехнических дисциплин / отв. ред. В. В. Никитин. – Орск: Издательство ОГТИ, 2007. – С. 145-148.

14. Колдин, А.В. Охлаждение металлической горизонтальной полосы системой круглых струй / А.В. Колдин // Современные проблемы науки и образования: Тезисы докладов XLIII внутривузовской научной конференции преподавателей МаГУ. – Магнитогорск: МаГУ, 2005. – с. 288.
15. Колдин, А.В. Охлаждение металлической горизонтальной полосы с помощью струйной системы / А.В. Колдин // Материалы 59-ой научной конференции студентов и молодых ученых, посвященной Международному году физики. – Алматы: КазНУ, 2005. – с. 60.
16. Колдин, А.В. Численное исследование процесса охлаждения металлического листа системой круглых струй / А.В. Колдин, Н.И. Платонов, О.Н. Скуратова // Вестник ГОУ УГТУ-УПИ. Теоретические и экспериментальные исследования в энерготехнологии: межвуз. сб. тр. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – С. 85-89.
17. Колдин, А.В. Моделирование охлаждения металлического листа струями жидкости / А.В. Колдин, Н.И. Платонов // Вестник МаГУ: Периодический научный журнал. Вып. 5. Естественные науки. – Магнитогорск: МаГУ, 2004. – С. 257-259.
18. Колдин, А.В. Исследование процесса теплообмена между металлическим листом и кипящей жидкостью / А.В. Колдин // НАУКА–ВУЗ–ШКОЛА: Сб. науч. тр. молодых исследователей. – Магнитогорск: МаГУ, 2003. – Вып. 8. – С. 325-329.



