

моделирования подтвердил адекватность полученных данных и целесообразность использования программной среды DEFORM-3D для дальнейших исследований. К примеру, для заготовки из К3 стали марки 20, калиброванной по маршруту 12,0 – 9,65 мм, полученное расчетное значение предела прочности находится в интервале значений, полученных в результате эксперимента, где расхождения относительно максимального и минимального 11 и 8 % соответственно. Сопоставление результатов расчета твердости по Бринеллю для того же маршрута также показывает удовлетворительную сходимость – отклонение не превышает 7 %.

Представленный алгоритм является универсальным и может подходить для определения и прогнозирования показателей качества металлопродукции, полученной в результате различных процессов обработки металлов давлением. Применение предлагаемого алгоритма

обеспечивает возможность контроля, прогнозирования и гарантированного достижения регламентированных качественных показателей металлопродукции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кроха В.А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.
2. Чукин М.В., Гусева Е.Н., Емалеева Д.Г. и др. Инновационный потенциал применения УМЗ сталей для производства крепежа повышенного класса прочности. / Тр. междунар. конф. «Форсированное индустриально-инновационное развитие в металлургии». – Алматы. 2010. С. 30–33
3. ГОСТ Р 52627-2006. Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 24 с.

© 2012 г. М.В. Чукин, А.С. Кузнецова  
Поступила 06.02.2012

УДК 681.518:621.74.047

*Газимов Р.Т., Демин А.В., Салихов К.З., Салихов З.Г.*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХЛАЖДАЮЩИХ РОЛИКОВ В ЗВО МНЛЗ

Использование охлаждающих роликов для контроля и управления тепловым состоянием слябов, листов, полос при непрерывной разливке и прокатке металла является на сегодняшний день наиболее прогрессивным технологическим решением. Традиционно применяемые в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и прокатных станах системы форсуночного охлаждения базируются на моделях и алгоритмах управления, исходные параметры которых имеют нестационарный и вероятностный характер. Например, площади факелов форсунок, через которые подается хладагент на металлическую поверхность, существенно зависят от давления или расхода хладагента, засоленности подводящих трубок и самих форсунок, а параметры кристаллизации или рекристаллизации внутри сляба или листа вообще не контролируются. Принятые коэффициенты теплопередачи изменяются в широких диапазонах из-за контакта хладагента с растворенными солями, взвесями, пылью, нефтепродуктами и окалиной, что в свою очередь существенно снижает управляемость процессом охлаждения слитка и может привести к авариям и снижению производительности. Немаловажным также является то, что в системе форсуночного охлаждения контур циркуляции хладагента остается разомкнутым. Расход охлаждающего агента в этом случае значительно больше, чем теоретически требуется. При этом мероприятия по последующей очистке хладагента требуют

значительных капитальных вложений (строительство очистных сооружений и отстойников, дополнительных трубопроводов и насосов), ресурсо- и энергозатрат на очистку, а также сопряжены с риском загрязнения окружающей среды и прочими экологическими факторами.

В свою очередь метод роликового охлаждения лишен большинства вышеперечисленных недостатков. Во-первых, хладагент циркулирует в замкнутом контуре, что не только повышает экономическую и экологическую эффективность охлаждения, но и позволяет, измеряя и регулируя проток хладагента через ролик, контролировать и управлять величиной теплоотвода каждым конкретным роликом, а значит радикально повысить качество процесса охлаждения в целом. Во-вторых, ролики обеспечивают контролируемый равномерный теплосъем по всей ширине слитка, что предотвращает возникновение существенных температурных градиентов и, как следствие, термонапряжений, деформаций и ухудшения поверхности. В третьих, охлаждение идет без интенсивного паро- и окалинообразования, что создает условия для точного прямого контроля полного теплового профиля поверхности слитка с использованием современных термографических (тепловизионных) средств. Это опять же существенно повышает контролируемость процесса и дает возможность использовать более эффективно компьютерные математические модели, но не виртуальные,

как было раньше, а непрерывно идентифицируемые на основании большого объема достоверных оперативных данных о протекании процесса.

Очевидно, что такой подход является на порядок более технологичным и позволяет осуществлять достоверный анализ процессов кристаллизации и рекристаллизации металла в режиме реального времени, а широкие диапазоны регулирования расхода хладагента, пропускаемого через ролики, позволяют оперативно управлять процессом вторичного охлаждения слитка. Более подробно основные теоретические положения, принципы работы охлаждающих роликов, а также схемы автоматизированных систем управления роликовым охлаждением изложены в работах [1 – 4].

Предметом настоящей статьи является исследование проблемы расчета теплотехнических характеристик ролика при проектировании системы роликового охлаждения, для чего предлагается разработать компьютерную модель отвода тепла роликом от слитка, которая позволит рассчитать требуемые характеристики.

Согласно схеме, представленной в изобретении [1], охлаждающий ролик выполнен полым, а его полость заполнена медными шарами определенного диаметра для создания необходимой порозности (для обеспечения протока и эффективного перемешивания хладагента) и фактической площади теплосъема (площади контакта меди и хладагента). Схема охлаждающего ролика в разрезе представлена на рис. 1.

Ролик условно разбит на три слоя (*I* – слой медного ролика, *II* – внутренний слой медных шаров, *III* – центральный слой медных шаров) и двенадцать секторов, что позволяет моделировать теплообмен в ролике в процессе его вращения. Для этого введем правило очередности контакта секторов ролика с поверхностью

слитка. С целью упрощения расчетов примем за основу дискретную модель вращения ролика – сектора контактируют со слитком поочередно, как зубцы в шестерне, т.е. в любой момент времени со слитком соприкасается только один сектор. Длительность контакта  $\delta$  высчитывается по формуле.

$$\delta = \frac{v}{l_s} = v \frac{n}{l} = \frac{vn}{2\pi r}, \quad (1)$$

где  $v$  – линейная скорость вращения ролика, м/с (так как поверхность ролика имеет постоянное сцепление с поверхностью слитка, то  $v$  можно принять равной скорости вытягивания слитка);  $l_s$  – длина сектора на поверхности ролика, м (равна общей длине ролика по окружности, деленной на число секторов);  $l$  – длина окружности ролика, рассчитываемая исходя из радиуса ролика, м;  $n$  – число секторов ролика (в данном примере 12);  $r$  – радиус ролика, м.

При контакте ролика с нагретым телом (слитком, листом) тепло в нем распространяется по следующему правилу: в любой момент времени  $\tau$  некоторый  $k$ -й сектор ролика может контактировать со слитком или не контактировать. Тот сектор, который сейчас контактирует со слитком (далее контактный сектор), получает тепло непосредственно от слитка, и является самым нагретым сектором ролика, так как по закону сохранения энергии тепло передается от более нагретых участков к менее нагретым, т.е. от контактного сектора ко всем остальным, что показано стрелками на рис. 2.

Для простоты и наглядности изобразим схематично распространение тепла по слоям в границах одного сектора (рис. 3). Если сектор контактирует со слитком, то тепловой поток  $\dot{Q}_k^{0-1}$  направлен внутрь ролика, так как слиток очевидно горячее ролика, если сектор не контактирует со слитком, то этот тепловой поток направлен в

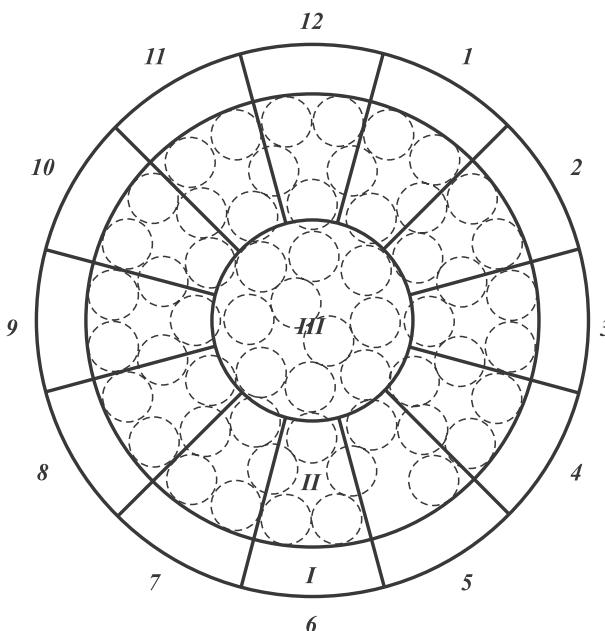


Рис. 1. Схема охлаждающего ролика (в разрезе)

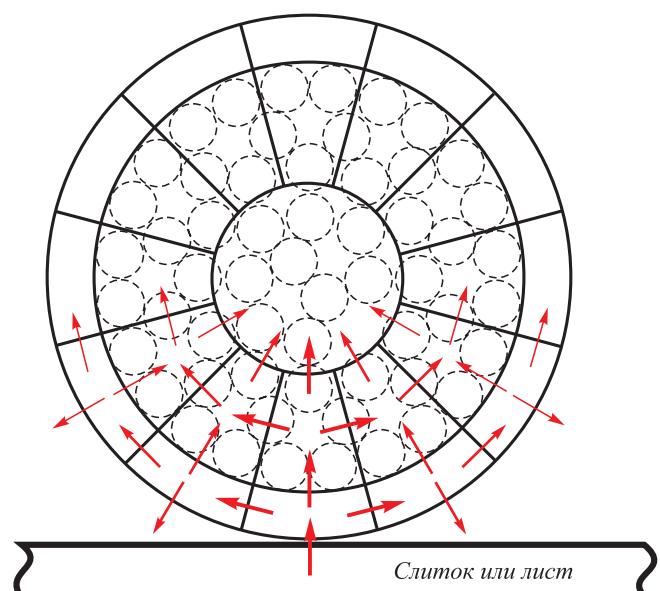


Рис. 2. Схема распространения тепла в охлаждающем ролике

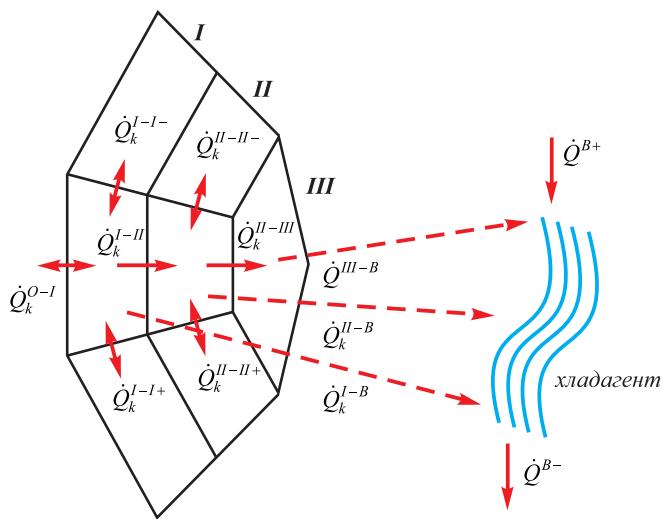


Рис. 3. Схема теплового баланса для одного сектора ролика

обратную сторону, так как окружающая среда очевидно холоднее слитка. Далее тепло из первого слоя (от ролика) передается второму слою (шарам),  $\dot{Q}_k^{I-I}$ , так как те непрерывно омываются проточным хладагентом и поэтому всегда холоднее самого ролика.

Часть тепла также передается непосредственно хладагенту  $\dot{Q}_k^{I-B}$ , так как небольшая площадь внутренней поверхности ролика (та, что не контактирует с шарами) также омывается хладагентом. Далее, в зависимости от того, контактный это сектор или нет, определяется теплообмен с соседними секторами в первом слое. Однако здесь нет необходимости вводить дополнительные правила, так как по закону сохранения энергии тепло движется от более нагретого тела к менее нагретому, а, следовательно, если это контактный сектор, то он будет отдавать тепло в левый  $\dot{Q}_k^{I-I-}$  и в правый  $\dot{Q}_k^{I-I+}$  соседние сектора, а если это неконтактный сектор, то он будет получать тепло из более нагретого соседнего сектора (левого или правого – того, который в данный момент ближе к контактному сектору), и отдавать в менее нагретый. Аналогичная ситуация с теплообменом между секторами во втором слое ( $\dot{Q}_k^{II-II+}$  и  $\dot{Q}_k^{II-II-}$ ). Кроме того, во втором слое тепло интенсивно передается от медных шаров к хладагенту  $\dot{Q}_k^{II-B}$ , а также в третий – центральный слой шаров  $\dot{Q}_k^{III-B}$ . Центральный слой шаров был введен для устранения неопределенности границ секторов вблизи от центра. Так как участки секторов вблизи от центра геометрически меньше размеров шаров, то теплообменные процессы между секторами там становятся неочевидными – неясно, к какому сектору относится какой шар и куда от него передается тепло. Поэтому все центральные шары были отнесены к общему центральному слою, который одновременно контактирует со всеми 12 секторами второго слоя. Центральный слой также отдает тепло хладагенту, омывающему центральные шары  $\dot{Q}^{III-B}$ . Кроме того, часть теплоты  $\dot{Q}^{B+}$  передается в ролик с массой поступающего хладагента и вся накопленная теплота  $\dot{Q}^{B-}$  отводится из ролика с массой нагретого хладагента.

Согласно приведенным выше рассуждениям, представленные на схеме тепловые потоки рассчитываются по формулам (2 – 13)

$$\dot{Q}_k^{O-I} = \begin{cases} A_{\text{Fe-Cu}} S^{O-I} (T_{[j]}^{\text{мет}} - T_k^I), & k = k^*, \\ \sigma \left( \left( \frac{T_k^I}{100} \right)^4 - \left( \frac{T^{\text{o.c.}}}{100} \right)^4 \right), & k \neq k^*; \end{cases} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_k^{I-I-} = A_{\text{Cu}} S^I (T_k^I - T_{k-1}^I); \quad (3)$$

$$\dot{Q}_k^{I-I+} = A_{\text{Cu}} S^I (T_k^I - T_{k+1}^I); \quad (4)$$

$$\dot{Q}_k^{I-II} = A_{\text{Cu}} S^{I-II} (T_k^I - T_k^{II}); \quad (5)$$

$$\dot{Q}_k^{I-B} = A_{\text{Cu-H}_2\text{O}} S^{I-B} (T_k^I - T_{[j],2}^I); \quad (6)$$

$$\dot{Q}_k^{II-II-} = A_{\text{Cu}} S^{II} (T_k^{II} - T_{k-1}^{II}); \quad (7)$$

$$\dot{Q}_k^{II-II+} = A_{\text{Cu}} S^{II} (T_k^{II} - T_{k+1}^{II}); \quad (8)$$

$$\dot{Q}_k^{II-III} = A_{\text{Cu}} S^{II-III} (T_k^{II} - T^{III}); \quad (9)$$

$$\dot{Q}_k^{II-B} = A_{\text{Cu-H}_2\text{O}} S^{II-B} (T_k^{II} - T_{[j],2}^{II}); \quad (10)$$

$$\dot{Q}_k^{III-B} = A_{\text{Cu-H}_2\text{O}} S^{III-B} (T^{III} - T_{[j],2}^{III}); \quad (11)$$

$$\dot{Q}^{B+} = C p_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} V T_{[j],1}; \quad (12)$$

$$\dot{Q}^{B-} = C p_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} V T_{[j],2}, \quad (13)$$

где коэффициенты теплопередачи, Дж/(м<sup>2</sup>·с·К):  $A_{\text{Fe-Cu}}$  – от железа к меди,  $A_{\text{Cu}}$  – от меди к меди,  $A_{\text{Cu-H}_2\text{O}}$  – от меди к воде; площади границ зон (рассчитываются исходя из геометрических размеров ролика), м<sup>2</sup>:  $S^{O-I}$  – площадь контакта ролика и металла,  $S^I$  – площадь границ соседних секторов в слое I,  $S^{II}$  – площадь границ соседних секторов в слое II,  $S^{I-II}$  – площадь контакта внутренней поверхности полого ролика и медных шаров (для одного сектора),  $S^{I-B}$  – площадь контакта внутренней поверхности полого ролика и циркулирующего хладагента,  $S^{II-III}$  – площадь контакта поверхностей медных шаров из сектора в слое II, с шарами из слоя III,  $S^{II-B}$  – площадь контакта поверхностей медных шаров из сектора в слое II с циркулирующим хладагентом,  $S^{III-B}$  – площадь контакта поверхностей медных шаров в слое III с циркулирующим хладагентом; температуры, К:  $T_{[j]}^{\text{мет}}$  – температура металла,  $T^{\text{o.c.}}$  – температура окружающей среды,  $T_k^I$  – температура ролика (слой I) в  $k$ -м секторе ролика,  $T_k^{II}$  – температура шаров (слой II) в  $k$ -м секторе ролика,  $T^{III}$  – температура шаров в центре ролика (слой III),  $T_{[j],1}$ ,  $T_{[j],2}$  – входная и текущая температуры циркулирующего хладагента; а также:  $V$  – поток хладагента (воды), м<sup>3</sup>/с;  $C p_{\text{H}_2\text{O}}$  – теплоемкость воды, Дж/К·кг;

$\rho_{H_2O}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  – коэффициент пропорциональности от степени черноты металла;  $k^*$  – номер текущего контактного сектора, рассчитывается на основании текущего значения таймера по формуле

$$k^* = \text{mod}(\tau/\delta, n), \quad (14)$$

где  $\tau$  – текущее значение таймера, с;  $\delta$  – длительность контакта сектора со слитком, с;  $n$  – число секторов, на которые разделен ролик;  $\text{mod}$  – функция определения остатка от деления.

Значения температур рассчитываются итерационным методом по формулам (15) – (18), где на каждом шаге осуществляется расчет приращений температуры по методу Рунге-Кутты:

$$T_k^I(\tau + \Delta\tau) = T_k^I(\tau) + \frac{\beta_k^I}{Cp_{Cu} G_{sg}^I} \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} \frac{dQ_k^I}{d\tau}; \quad (15)$$

$$T_k^{II}(\tau + \Delta\tau) = T_k^{II}(\tau) + \frac{\beta_k^{II}}{Cp_{Cu} G_{sg}^{II}} \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} \frac{dQ_k^{II}}{d\tau}; \quad (16)$$

$$T^{III}(\tau + \Delta\tau) = T^{III}(\tau) + \frac{\beta_k^{III}}{Cp_{Cu} G_{sg}^{III}} \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} \frac{dQ_k^{III}}{d\tau}; \quad (17)$$

$$T_{[j],2}(\tau + \Delta\tau) = T_{[j],2}(\tau) + \frac{\beta_k^B}{Cp_{H_2O} G_{H_2O}} \int_{\tau}^{\tau + \Delta\tau} \frac{dQ_k^B}{d\tau}, \quad (18)$$

где  $Cp_{Cu}$  – теплоемкость меди, Дж/К кг;  $Cp_{H_2O}$  – теплоемкость воды, Дж/К кг;  $G_{sg}^I$  – масса одного сегмента полого ролика (слой I);  $G_{sg}^{II}$  – масса шаров в одном сегменте полого ролика (слой II);  $G_{sg}^{III}$  – масса шаров в центре полого ролика (слой III);  $G_{H_2O}$  – масса хладагента внутри полого ролика;  $\beta_k^I, \beta_k^{II}, \beta_k^{III}, \beta_k^B$  – настраиваемые корректирующие коэффициенты модели, производные теплоты в ролике, шарах и воде рассчитываются из уравнений теплового баланса (19) – (22), составленных согласно закону сохранения энергии

$$\frac{dQ_k^I}{d\tau} = \dot{Q}_k^{O-I} - \dot{Q}_k^{I-I-} - \dot{Q}_k^{I-I+} - \dot{Q}_k^{I-II} - \dot{Q}_k^{I-B}; \quad (19)$$

$$\frac{dQ_k^{II}}{d\tau} = \dot{Q}_k^{I-II} - \dot{Q}_k^{II-II-} - \dot{Q}_k^{II-II+} - \dot{Q}_k^{II-III} - \dot{Q}_k^{II-B}; \quad (20)$$

$$\frac{dQ_k^{III}}{d\tau} = \sum_{k=1}^n \dot{Q}_k^{III-III} - \dot{Q}_k^{III-B}; \quad (21)$$

$$\frac{dQ_k^B}{d\tau} = \sum_{k=1}^n (\dot{Q}_k^{I-B} + \dot{Q}_k^{II-B}) + \dot{Q}_k^{III-B} + \dot{Q}_k^{B+} - \dot{Q}_k^{B-}. \quad (22)$$

Ниже представлены результаты компьютерного моделирования теплообменных процессов в ролике. Как видно на рис. 4, просматривается очевидная очередь пиков температур по секторам, что соответствует изложенной выше гипотезе.

На рис. 5. показаны графики изменения температуры ролика (слой I) и шаров в полости ролика (слой II) для одного из секторов. Видно, что теплообменные процессы в слое шаров протекают менее интенсивно, и графики температурных кривых в них являются более гладкими. Это подтверждает сглаживающие свойства ролика, что позволяет при использовании роликового охлаждения добиться существенного уменьшения перепадов температур на поверхности литка (в сравнении с форсуночным охлаждением) и избежать возникновения поверхностных дефектов (трещин и расслоений), а также интенсивного образования окалины.

Адекватность математической модели подтверждается результатами испытаний на лабораторной установке в НИТУ «МИСиС». По результатам испытаний были сопоставлены значения измеренных температур поверхности ролика и заготовки с полученными по модели, а также фактические и полученные по модели значения температуры хладагента на выходе из ролика при контролируемых значениях его расхода и температуры на входе. По зафиксированным отклонениям модель была параметрически настроена с точностью

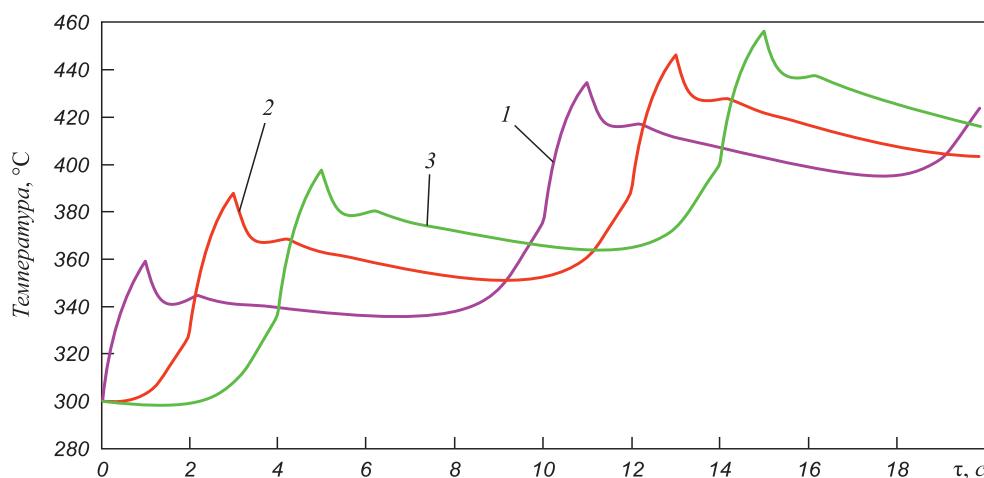


Рис. 4. Графики температур секторов ролика (слой I):  
1 – сектор 1; 2 – сектор 2; 3 – сектор 3

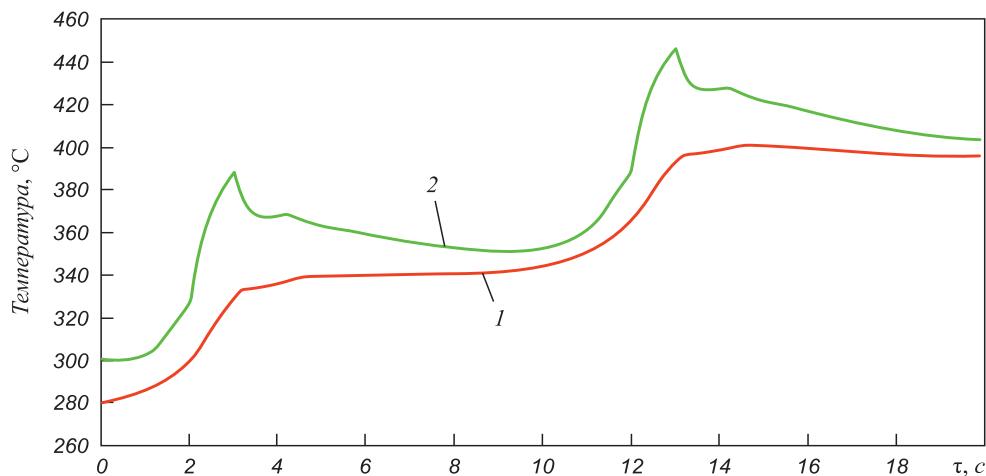


Рис.5. Графики температур сектора ролика (слои I и II):  
1 – сектор N+3; 2 – сектор 3

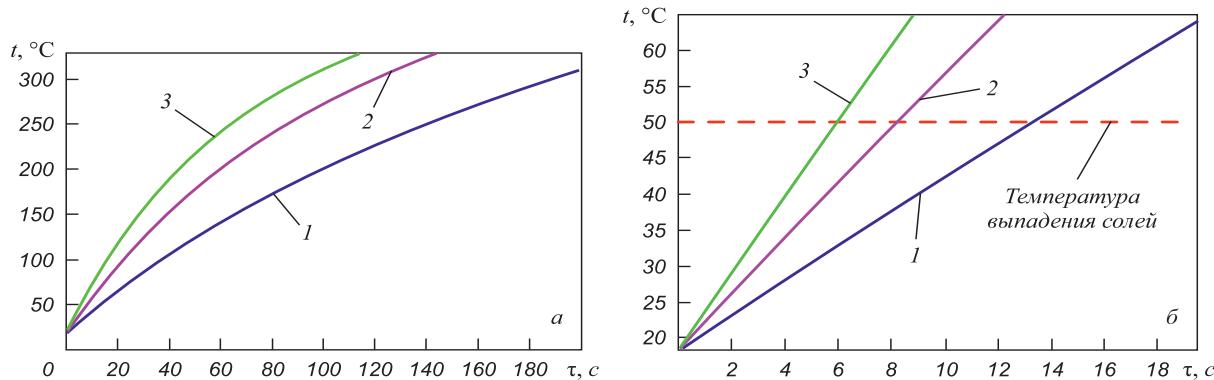


Рис. 6. Результаты моделирования нагрева хладагента при заполнении ролика шарами разного диаметра, см:  
1 – 5; 2 – 2,5; 3 – 1,25

до 1,2 %. Это позволяет судить о ее гибкости и возможности адаптации к условиям на реальном объекте.

На рис. 6. представлены результаты моделирования интенсивности нагрева хладагента при заполнении ролика шарами разного диаметра. Из полученных графиков видно, что критическая температура хладагента (если это вода, то 50 °С – температура выпадения солей) достигается за 6 – 14 с, т.е. это то время, за которое хладагент в ролике должен полностью смениться. При известных внутреннем объеме ролика и порозности шаров это позволяет рассчитать нижнюю критическую границу расхода хладагента в ролик.

**Выводы.** Использование принципа многозонного моделирования позволило разработать достоверную математическую компьютерную модель процесса теплоотвода при роликовом охлаждении. Созданный на основе этой модели программный модуль позволяет определять основные теплотехнические характеристики ролика для любых размеров теплоотводящих шаров, что дает возможность подбора наиболее подходящего размера шаров и определения диапазонов регулирования расхода хладагента в ролик.

Разработанная модель представляет собой систему из  $2N + 2$  обыкновенных дифференциальных

уравнений, что с использованием современной компьютерной техники позволяет рассчитывать параметры теплообменных процессов в ролике в реальном времени. Следовательно, эту модель можно использовать не только для проектирования роликов, но и для расчета величины расхода хладагента при оперативном управлении охлаждением металла непосредственно во время протекания технологического процесса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2422242. РФ. Способ охлаждения заготовок на машинах непрерывного литья. Салихов З.Г., Ишметьев Е.Н., Глебов А.Г. и др. Бюлл. № 18 от 27.06.2011.
2. Салихов З.Г., Газимов Р.Т., Салихов К.З. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 11. С 60 – 64.
3. Salikhov Z.G., Gazimov R.T., Salikhov K.Z. // Metalurgist. 2010. Vol. 54. No. 5 – 6. P. 295 – 298.
4. Салихов К.З. Адаптивная система автоматического управления процессом охлаждения крупного стального слитка в ЗВО МНЛЗ: модели и алгоритмы: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. – М., 2011. – 26 с.