ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 669.14.1

З.К. Кабаков, Ю.В. Грибкова, Д.И. Габелая

РАСЧЕТ БАЛАНСА ТЕПЛОТЫ В ЗАГОТОВКЕ, ОТЛИВАЕМОЙ НА МНЛЗ

В статье изложена методика расчета статей баланса теплоты с использованием двумерной математической модели затвердевания и охлаждения заготовки на МНЛЗ. Приведены формулы для расчета статей в математической и конечно-разностной форме. Результаты расчета статей баланса согласуются с известными результатами, полученными на основе экспериментальных данных по толщине корки, температуре поверхности сляба, времени нахождения слитка в пределах ЗВО и др. Методика позволяет рассчитать баланс теплоты для различных заготовок и режимов разливки на МНЛЗ.

Баланс теплоты, математическая модель, охлаждение, сляб, теплоутилизация, энергосбережение, количество теплоты.

The paper sets out the methodology of calculation of heat balance sheet items using a two-dimensional mathematical model of solidification and cooling of the workpiece on the caster. The formulas for calculation of the articles in mathematical and finite-difference form are given. The results of the calculation of the balance sheet items are consistent with the known results obtained on the basis of experimental data on the thickness of the crust, the surface temperature of the slab, billet residence time within the secondary cooling zone, and others. The technique allows calculating the heat balance for a variety of workpieces and casting in the CCM modes.

Balance of heat, mathematical model, cooling, slab, heat recovery, energy, quantity of heat.

Вопросы энергосбережения являются весьма актуальными для черной металлургии [3], [6]. Для поиска путей энергосбережения применяют различные методы, в частности: анализ тепловых потерь. С этой целью составляются тепловые балансы металлургических агрегатов.

Одним из этапов сталеплавильного производства является непрерывная разливка стали, которая производится на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В кристаллизаторе МНЛЗ из жидкой стали формируется твердая оболочка, которая охлаждается в кристаллизаторе, зоне вторичного охлаждения (ЗВО) и на воздухе. Перед контролем и устранением поверхностных дефектов заготовки на холодном складе охлаждаются в штабелях.

Представляет практический интерес разработка методики оценки потерь тепла от заготовки на пути следования ее от кристаллизатора до раскладки заготовок на стеллажах для контроля качества поверхностных дефектов. Такая попытка оценить потери теплоты от заготовки, формируемой на МНЛЗ, была сделана в работе [1] для конкретной заготовки и условий разливки с использованием экспериментальных данных (по толщине корки, температуры поверхности сляба, времени нахождения слитка в пределах ЗВО и др.).

В данной работе предложена универсальная методика расчета статей расхода тепла, основанная на применении математической модели затвердевания и охлаждения заготовок на МНЛЗ [2]. При моделировании процесса принято во внимание, что критерий Пекле $Pe = \frac{2\mathrm{v}B}{a} > 6$, где v – скорость литья, $2B$ – толщина заготовки, a – температуропроводность материала заготовки. В этом случае процессом теплопроводности вдоль заготовки можно пренебречь и рассматривать процесс теплопроводности только в слое металла единичной толщины, который поступает в кристаллизатор вдоль технологической линии МНЛЗ со скоростью v (рис. 1).

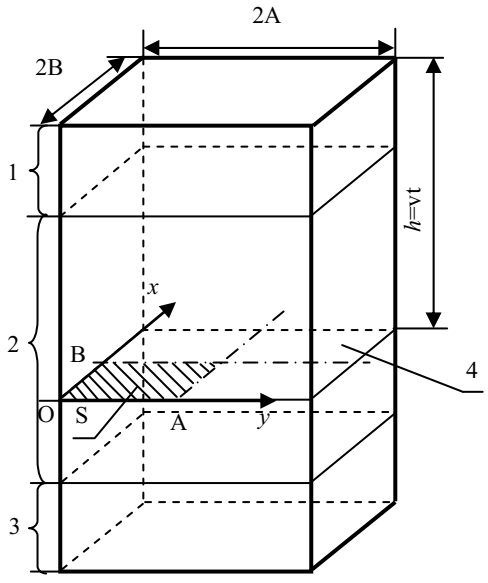


Рис. 1. Схема движения расчетной области на МНЛЗ: 1 – кристаллизатор, 2 – ЗВО, 3 – зона охлаждения на воздухе, 4 – расчетная область, S – расчетное сечение

Таким образом, для анализа потерь теплоты от заготовки достаточно составить тепловой баланс для расчетной области. Запишем уравнение баланса теплоты для расчетной области, расположенной на расстоянии h=vt от мениска металла в кристаллизаторе:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{уш}} + Q_{\text{ост}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{вх}}$ – количество теплоты, поступающей в кристаллизатор с расчетным сечением жидкой стали, $Q_{\text{уш}} = Q_{\text{шг}} + Q_{\text{уг}}$ – количество теплоты, потерянное сечением через широкие и узкие грани заготовки при следовании сечения на пути h, $Q_{\text{ост}}$ – количество теплоты, оставшейся в сечении на высоте h.

С учетом размеров расчетного сечения (рис. 1), используемого в модели [2], запишем формулы для определения статей теплового баланса:

$$Q_{\text{вх}} = 4\text{v} \cdot A \cdot B \cdot \rho \times \times \left[c_{\text{тв}} \left(T_{\text{с}} - T_{\text{ср}} \right) + \left(T_{\text{л}} - T_{\text{с}} \right) \cdot \left(c_{\text{ж}} + c_{\text{тв}} \right) / 2 + L + c_{\text{ж}} \left(T_0 - T_{\text{л}} \right) \right], \quad (2)$$

$$Q_{\text{уг}} = 2v \int_0^t \int_0^B q_y \, dx dt, \quad (3)$$

$$Q_{\text{шг}} = 2v \int_0^t \int_0^A q_{\text{ш}} \, dx dt, \quad (4)$$

$$Q_{\text{ост}} = 4\rho \cdot v \cdot \int_0^A \int_0^B c_{\text{эфф}} \cdot \left(T - T_{\text{ср}} \right) dx dy, \quad (5)$$

где v – скорость разливки; ρ – плотность стали; $c_{\text{тв}}$, $c_{\text{ж}}$ – теплоемкость твердой и жидкой части сляба; $2A$, $2B$ – размеры сечения сляба; $T_{\text{л}}$, $T_{\text{с}}$, $T_{\text{ср}}$ – температуры ликвидуса, солидуса и среды, соответственно; $q_{\text{у}}$, $q_{\text{ш}}$ – удельные количества тепла с узкой и широкой граней сляба; $\frac{\partial \psi}{\partial T}$ – темп кристаллизации в соответствии с [5]; L – теплота кристаллизации, $c_{\text{эфф}}$ – эффективная теплоемкость, определяемая по формуле:

$$c_{\text{эфф}} = \begin{cases} c_{\text{тв}}, T < T_{\text{с}} \\ c(T) - L \dfrac{\partial \psi}{\partial T}, T_{\text{с}} \le T \le T_{\text{л}} \\ c_{\text{ж}}, T > T_{\text{л}}. \end{cases} \quad (6)$$

В численной модели [2] введены дискретные шаги по x и y:

$$\Delta x = \frac{A}{N}, \quad \Delta y = \frac{B}{M}$$

и дискретные величины:

$$x_i = (i - 0{,}5) \cdot \Delta x, \; y_j = (j - 0{,}5) \cdot \Delta y,$$
$$t^n = \Delta t \cdot n, \; T(x_i, y_j, t^n) = T_{i,j}^n,$$
$$i = 1, \ldots, N, j = 1, \ldots, M,$$

где Δt – дискретный шаг по времени t.

С учетом этих обозначений приведем выражения для расчета статей баланса по формуле (2) к конечно-разностной форме:

$$Q_{\text{вх}} = 4\text{v} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \rho \times \times \left[c_{\text{тв}} \left(T_{\text{с}} - T_{\text{ср}} \right) + \left(T_{\text{л}} - T_{\text{с}} \right) \cdot \left(c_{\text{ж}} + c_{\text{тв}} \right) / 2 + L + c_{\text{ж}} \left(T_0 - T_{\text{л}} \right) \right], \quad (7)$$

$$Q_{\text{шг}} = 2v \cdot \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{N} q_{\text{ш}i,j} \Delta t \Delta x, \; Q_{\text{уг}} = 2v \cdot \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{M} q_{yi,j} \Delta t \Delta y, \quad (8)$$

$$Q_{\text{ост}} = 4 \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} Q_{i,j}^{n+1}, \quad (9)$$

где

$$Q_{i,j}^{n+1} = \begin{cases} Q_{i,j}^n + \rho \cdot c_{\text{тв}} \left(T_{i,j}^n - T_{\text{ср}} \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \text{v}, \; T_{i,j}^n \le T_{\text{с}} \\ Q_{i,j}^n + \rho \left[c_{\text{тв}} \left(T_{\text{с}} - T_{\text{ср}} \right) + \dfrac{c_{\text{ж}} + c_{\text{тв}}}{2} \left(T_{i,j}^n - T_{\text{с}} \right) + \right. \\ \quad \left. + L \cdot \left(1 - \psi_{i,j} \right) \right] \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \text{v}, T_{\text{с}} \le T_{i,j}^n \le T_{\text{л}}. \\ Q_{i,j}^n + \rho \left[c_{\text{тв}} \left(T_{\text{с}} - T_{\text{ср}} \right) + c_{\text{ж}} \left(T_{i,j}^n - T_{\text{л}} \right) + \right. \\ \quad \left. + \dfrac{c_{\text{ж}} + c_{\text{тв}}}{2} \left(T_{\text{л}} - T_{\text{с}} \right) + L \right] \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \text{v}, \; T_{i,j}^n > T_{\text{л}}, \end{cases}$$

Обычно настройку алгоритмов численного решения задачи затвердевания и охлаждения заготовки выполняют путем сравнения результатов решения с известными точными решениями задач охлаждения Стефана. Такие настройки необходимы, но они имеют один недостаток. Точные решения получены для условий, отличных от реальных условий применения математической модели.

Приведенные статьи баланса теплоты позволяют определить погрешность расчета баланса, возникающую в результате численного решения задачи теплопроводности, и уточнить параметры разностной сетки $M \times N$ для реальных условий применения математической модели. Величина погрешности определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{вх}} - Q_{\text{уг}} - Q_{\text{шг}} - Q_{\text{ост}}}{Q_{\text{вх}}} \cdot 100\%. \quad (10)$$

Выражения (7)–(10) были внесены в численную модель [2], которая была использована для моделирования процесса затвердевания и охлаждения слябовой заготовки на линии МНЛЗ и расчета статей баланса теплоты.

Для иллюстрации результатов расчета статей баланса с использованием математической модели выполним моделирование затвердевания и охлаждения заготовки сечением 250×1200 мм^2 из углеродистой стали, отливаемой при скорости 0,8 м/мин. Исходные данные для моделирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

№	Величина	Название	Значение
1	$2A$	Ширина расчетного сечения, м	1,2
2	$2B$	Толщина расчетного сечения, м	0,25
3	v	Скорость разливки, м/мин.	0,8
4	$T_{ср}$	Температура окружающей среды, °С	30
5	T_0	Температура стали, подаваемой в кристаллизатор, °С	1520
6	$T_л$	Температура ликвидуса, °С	1485
7	$T_с$	Температура солидуса, °С	1403
8	$c_ж$	Теплоемкость жидкой части сляба, Дж/кг·К	832
9	$c_{тв}$	Теплоемкость твердой части сляба, Дж/кг·К	739
10	λ	Теплопроводность стали, Вт/м·К	29

На рис. 2 представлены результаты расчета количества теплоты, оставшейся в сечении сляба на расстоянии h от мениска металла в кристаллизаторе.

Сравним значения долей теплоты по зонам (кристаллизатор, ЗВО, охлаждение на воздухе), полученные в результате моделирования, с соответствующими значениями, приведенными для слитков из углеродистой стали сечением 150×475 мм (скорость разливки v = 0,5 м/мин.) в работе [4].

Таблица 2

Доли теплоты, потерянной слябом в различных зонах МНЛЗ

Зоны охлаждения	Удельное количество теплоты, кДж/кг	Доля теплоты, %	
		Рутес В.С. [6]	Расчет по модели
Кристаллизатор	210	16	17,1
ЗВО	320	23	23,1
Охлаждение на воздухе	770	61	59,8
Всего	1300	100	100

Приведенные в табл. 2 результаты удовлетворительно согласуются между собой, что свидетельствует о корректности предложенной методики расчета баланса теплоты. Методика позволит рассчитать баланс теплоты в заготовках различного сечения для различных режимов разливки на МНЛЗ.

В работах [1], [4] приведены данные по долям тепла только для скорости разливки v=0,5 м/мин. Представляет научный и практический интерес оценить доли отводимой теплоты для более высоких скоростей разливки.

В табл. 3 представлены результаты оценки количества теплоты, полученные с помощью модели для слябовой заготовки 1,2×0,25 м и скоростей разливки 0,8 м/мин. и 1,2 м/мин.

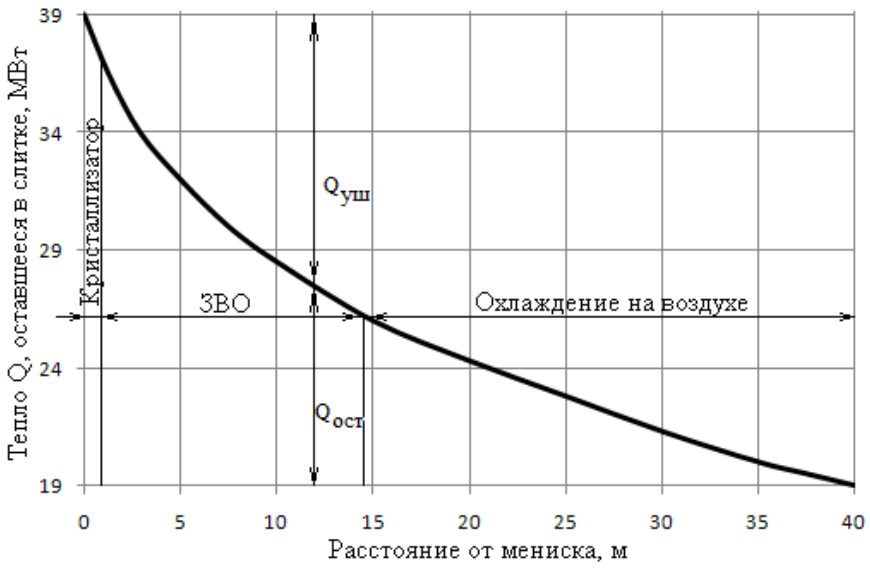


Рис. 2. Количество теплоты, оставшейся в сечении сляба $Q_{ост}$, в зависимости от расстояния от мениска при скорости разливки 0,8 м/мин.

Таблица 3

Оценка количества теплоты, уходящей от заготовки в районе кристаллизатора, ЗВО и на воздухе

Участки охлаждения	Скорость разливки			
	0,8 м/мин.		1,2 м/мин.	
	Тепловой поток, МВт	Доля, %	Тепловой поток, МВт	Доля, %
Кристаллизатор	2,78	7	3,00	5,1
ЗВО	11,00	28	20,00	33,9
На воздухе	25,99	65	36,00	61
Итого	39,77	100	59,00	100

Доли теплоты, отводимой в кристаллизатор и в зоне охлаждения на воздухе, уменьшаются при увеличении скорости вытягивания. Доля теплоты, теряемой в ЗВО при увеличении скорости, наоборот, увеличивается.

Таким образом, разработана универсальная методика расчета статей баланса теплоты с использованием математической модели затвердевания и охлаждения заготовки на МНЛЗ. Полученные результаты расчета статей баланса согласуются с известными результатами, полученными на основе экспериментальных данных по толщине корки, температуре поверхности сляба, времени нахождения слитка в пределах ЗВО и др. Расчет статей баланса при моделировании затвердевания и охлаждения заготовки можно использовать для оценки погрешности результатов моделирования для реальных условий использования модели и установить параметры конечно-разностной аппроксимации для достижения заданной точности моделирования.

Литература

1. *Емельянов, В.А.* Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок / В.А. Емельянов. – М., 1988.

2. *Кабаков, З.К.* Исследование процесса охлаждения штабелей на холодном складе / З.К. Кабаков, Ю.В. Грибкова, Д.И. Габелая // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2011. – № 1. – С. 81–86.

3. *Колпаков, С.В.* Энергосбережение в металлургии / С.В. Колпаков // Сталь.– 2004. – № 3.– С. 71–72.

4. *Рутес, В.С.* Теория непрерывной разливки / [В.С. Рутес и др.]. – М., 1971.

5. *Самойлович, С.А.* Тепловые процессы при непрерывном литье стали / [Ю.А. Самойлович и др.]. – М., 1982.

6. *Щелоков, Я.М.* Черная металлургия: проблемы, технологии, энергоемкость / Я.М. Щелоков. – Екатеринбург, 2012.

УДК 005

И.В. Копылов, Л.Л. Малыгин

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Эффективность и надежность систем компьютерного зрения часто в значительной степени определяется способом представления и качеством признакового описания представленных изображений. Существует множество подходов к заданию пространства признаков для изображения, а также множество алгоритмов, которые исследуют заданное пространство, выбирая наиболее информативные из них.

В данной статье дано описание нового представления изображения (модели изображения) с ассоциированным признаковым пространством. Рассматривается подход к формированию наиболее информативного подмножества признаков и машинного обучения для задачи обнаружения объектов на изображении.

Графические объекты, метод машинного обучения, алгоритм информативного подмножества, техника скользящего окна.

Efficiency and reliability of computer vision systems is often determined by the way of presenting and the quality of attributive description of submitted images. There are many approaches to setting the space for images, as well as a lot of algorithms that explore a given space by choosing the most informative ones. This article describes the new view image (model), with an associated feature space. The paper considers an approach to building the most informative subsets of traits and machine learning for the detection of objects in the image.

Graphic objects, machine learning method, algorithm of informative subset, sliding window technique.