

УДК 669.18.046:519

**Е.И. Марукович, В.А. Пумпур, канд. техн. наук, доц., В.А. Харьков****РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛИТЬЯ ПРОВОЛОЧНЫХ ЗАГОТОВОК**

В статье представлены математическая модель теплообмена и программный комплекс для моделирования процесса формирования проволочной заготовки при непрерывном вертикальном литье. Описаны возможности программного обеспечения и форма представления результатов расчета.

Непрерывные процессы литья являются наиболее перспективными для получения проволочных заготовок из цветных и драгоценных металлов и сплавов и имеют существенные преимущества перед обычными видами литья [1, 2]. Наибольшее распространение получило литье в кристаллизаторы скольжения, которые, как правило, имеют несложную конструкцию, основными элементами которой являются корпус и рабочая втулка. При литье в кристаллизаторы скольжения достаточно просто решаются вопросы начала процесса, защиты поверхности металла в кристаллизаторе от окисления, подачи металла в кристаллизатор и поддержания заданного уровня. Применение вертикальных установок по сравнению с горизонтальными позволяет повысить выход годного и избежать проблем с обеспечением равномерности теплоотвода от отливки в зоне вторичного охлаждения.

При получении проволоки литье целесообразно проводить в стационарный (неподвижный) кристаллизатор, а извлечение отливки осуществлять по циклическому режиму: движение – остановка. Упрощается конструкция литейной установки по сравнению с вариантом качающегося кристаллизатора и обеспечиваются благоприятные условия для формирования отливки. Такая схема литья позволяет также монтировать плавильный узел и кристаллизатор в одном блоке, что обеспечивает надежную автоматическую подачу расплава в зону охлаждения в течение всего процесса литья. Выполнение этого условия особенно важно при литье проволоки малого диаметра (меньше 8 мм). В случае большого сечения не могут быть использованы технологические приемы и конструктивные решения, применяемые при непрерывной разливке цветных металлов и сплавов.

Для стабильного ведения процесса и получения качественных заготовок необходимо обеспечить постоянство температуры расплава и бесперебойность его подачи в зону охлаждения (кристаллизатор), а также направленность затвердевания металла. Для успешного применения направленного затвердевания необходимо правильно выбрать: материал и форму тигля; направление теплового потока; скорость затвердевания; температурный градиент непосредственно перед поверхностью раздела жидкой и твердой фаз; параметры конвекции в расплаве [3].

Принципиальная схема процесса литья, максимально удовлетворяющая предъявляемым требованиям, представлена на рис. 1. Жидкий металл  $I$ , находящийся в тигле  $2$ , постоянно подогревается нагревателями  $3$  во всей зоне нагрева (ЗН) длиной  $H_0$ . Это обеспечивает постоянство температуры и бесперебойное поступление расплава под действием гравитационных сил по металлопроводу  $4$  через неохлаждаемую зону  $I$  (длиной  $H_1$ ) в первую зону охлаждения  $II$  (длиной  $H_2$ ). Здесь от расплава и затвердевающей отливки тепло отводится в радиальном направлении за счет кристаллизатора  $5$ . Для создания условий направленного затвердевания необходимо обеспечить значительный градиент температур вдоль оси отливки. Одним из приемов создания высокого температурного градиента является применение вторичного охлаждения в зоне  $III$  (длиной

$H_3$ ) после выхода отливки из кристаллизатора.

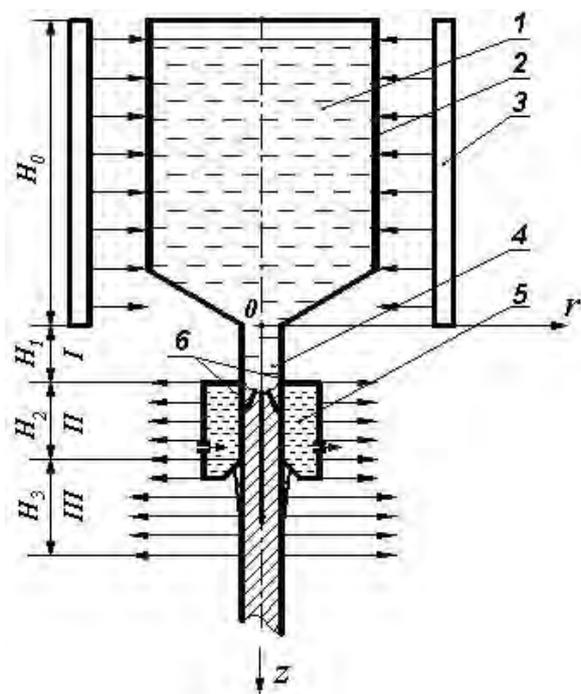


Рис. 1. Схема процесса литья: 1 – расплав в тигле; 2 – тигель; 3 – нагреватели; 4 – металлопровод; 5 – кристаллизатор; 6 – графитовая втулка

Пространственное расположение зон нагрева и охлаждения определяет макроскопическую форму фазовой границы. Поэтому зону нагрева и первичного охлаждения II целесообразно разделить переходной неохлаждаемой зоной I (H3) (см. рис. 1).

Таким образом, одновременно радиальный и значительный осевой теплоотвод от фронта затвердевания создает вогнутую поверхность раздела жидкой и твердой фаз и обеспечивает последовательное направленное затвердевание металла по всему сечению отливки, что исключает образование «мостов», усадочной и газовой пористости. Подача жидкого металла в кристаллизатор под закрытый уровень обуславливает отсутствие в отливке неметаллических и газовых включений.

На основе разработанной принципиальной схемы процесса литья осуществлялось математическое моделирование процесса непрерывного вертикального литья проволоочных заготовок из цветных металлов и сплавов. Основными целями моделирования являются определение геометрических параметров элементов оборудования литейной машины и режимов литья. Для этого необходимо:

- 1) определить длину зоны нагрева, переходной зоны, первичной и вторичной зон охлаждения;
- 2) определить размеры кристаллизатора и его составных частей;
- 3) определить условия охлаждения кристаллизатора;
- 4) оценить интенсивность теплообмена между отливкой и кристаллизатором;
- 5) оценить и определить интенсивность первичного и вторичного охлаждения;
- 6) определить продолжительность остановки  $\tau_{ост}$  и извлечения формирующейся отливки.

Кроме этого, важно оценить влияние на процесс формирования отливки таких

факторов, как величина перегрева расплава, начальная температура кристаллизатора, диаметр отливки.

С целью моделирования влияния основных факторов на процесс формирования радиальной проволочной заготовки при непрерывном вертикальном литье разработан пакет программ, позволяющий осуществить на ПЭВМ численное решение задачи затвердевания и охлаждения отливки, на основе двухмерной математической модели процесса теплообмена. В результате расчета определялись температурные поля в отливке (область 1), в графитовой втулке (область 2), в кристаллизаторе (область 3) и графитовом тигле (область 4).

При создании математической модели были приняты следующие допущения. За начало координат принималась точка, расположенная на пересечении оси симметрии установки  $Oz$  и оси  $Or$ , проходящей через начало неохлаждаемой зоны  $I$ . Температуры расплава на входе в канал тигля и внешней поверхности тигля в зоне  $I$  принимались постоянными во времени. Условия теплообмена между формирующейся отливкой и графитовой втулкой, между втулкой и поверхностью кристаллизатора, а также кристаллизатора с водой принимались постоянными во времени. Теплофизические свойства расплава, затвердевшего сплава, графита и материала кристаллизатора принимались линейно-зависимыми от температуры. Тепловыделение при кристаллизации сплава учитывалось путем введения эффективной теплоемкости двухфазной зоны.

Решение задачи теплообмена осуществлялось в два этапа. На первом этапе решалась задача затвердевания расплава, равномерно поступающего из заполненного тигля в его канал. На каждом временном шаге определялся уровень расплава в канале, который и являлся границей расчетной области в отливке при решении задачи. На втором этапе осуществлялось решение задачи затвердевания отливки при условии, что отливка достигла нижней границы расчетной области  $z = H_1 + H_2 + H_3$ . Моделирование каждого из этапов решения задачи осуществлялось с учетом периодов движения и остановки формирующейся отливки.

Уравнения теплопроводности для рассматриваемой задачи имеют следующий вид:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} \right), \quad i=1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

где индексы "1", "2", "3" и "4" – относятся к областям отливки, графитовой втулки, кристаллизатора и тигля соответственно;  $\rho_i$ ,  $c_i$ ,  $\lambda_i$  – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материала соответственно для  $i$ -й расчетной области;  $T_i$  – температурное поле для  $i$ -й расчетной области.

Начальные условия:

$$T_1|_{\tau=0} = T_{01}, \quad T_2|_{\tau=0} = T_{02}, \quad T_3|_{\tau=0} = T_{03}, \quad T_4|_{\tau=0} = T_{04}, \quad (2)$$

где  $T_{01}$  – начальная температура сплава,  $T_{02}$ ,  $T_{03}$  и  $T_{04}$  – начальные температуры графитовой втулки, кристаллизатора и тигля соответственно.

Граничные условия для процесса теплопередачи вдоль оси  $Or$  для второго этапа решения задачи имеют следующий вид.

На оси симметрии установки:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0. \quad (3)$$

На границе контакта расплава и тигля (зона I):

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_{1,4} (T_1 - T_4), \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_{1,4} (T_1 - T_4), \quad (4)$$

где  $\alpha_{1,4}$  – коэффициент контактного теплообмена между расплавом поверхностью тигля;  $R_1$  – радиус отливки (канала тигля).

На внешней поверхности графитового тигля теплопередача происходит, в основном, излучением, при постоянстве температуры:

$$T_4 \Big|_{r=R_4} = \tilde{T}_{04}, \quad (5)$$

где  $\tilde{T}_{04} = const$ ;  $R_4$  – радиус тигля.

На границе контакта формирующейся отливки с поверхностью графитовой втулки (зона II):

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_{1,2} (T_1 - T_2), \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_{1,2} (T_1 - T_2), \quad (6)$$

где  $\alpha_{1,2}$  – коэффициент контактного теплообмена между отливкой и поверхностью графитовой втулки.

На границе контакта втулки с рабочей поверхностью кристаллизатора:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha_{2,3} (T_2 - T_3), \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha_{2,3} (T_2 - T_3), \quad (7)$$

где  $\alpha_{2,3}$  – коэффициент контактного теплообмена между втулкой и кристаллизатором;  $R_2$  – радиус графитовой втулки.

На границе контакта поверхности кристаллизатора с водой:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} \Big|_{r=R_3} = \alpha_{3,w} (T_3 - T_w), \quad (8)$$

где  $\alpha_{3,w}$  – коэффициент конвективного теплообмена кристаллизатора с водой;  $R_3$  – радиус водоохлаждаемой поверхности кристаллизатора;  $T_w$  – температура охлаждающей воды,  $T_w = const$ .

На границе контакта извлекаемой отливки с водой (зона III – вторичное охлаждение):

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_{1,w} (T_1 - T_w), \quad (9)$$

где  $\alpha_{1,w}$  – коэффициент конвективного теплообмена отливки с водой.

Граничные условия вдоль оси  $Oz$  имеют следующий вид.

На входе расплава в канал тигля (зона I):

$$T_1|_{z=0} = T_{01}. \quad (10)$$

На границе зон *I* и *II* между верхней торцевой поверхностью кристаллизатора и тиглем:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = \alpha_{3,4} (T_3 - T_4), \quad \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial z} \Big|_{z=H_1} = \alpha_{3,4} (T_3 - T_4), \quad (11)$$

где  $\alpha_{3,4}$  – коэффициент контактного теплообмена между торцом кристаллизатора и тиглем.

На границе зон *II* и *III* между нижним торцом втулки и кристаллизатора с воздухом:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=H_1+H_2} = \alpha_{2,A} (T_2 - T_A), \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} \Big|_{z=H_1+H_2} = \alpha_{3,A} (T_3 - T_A), \quad (12)$$

где  $\alpha_{2,A}$ ,  $\alpha_{3,A}$  – коэффициенты конвективного теплообмена между торцом втулки и кристаллизатора соответственно и воздухом.

На границе расчета  $z = H_1 + H_2 + H_3$  допускаем условие симметрии теплового потока:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=H_1+H_2+H_3} = 0. \quad (13)$$

Величина  $H_3$  – длина рассчитываемой отливки после выхода из кристаллизатора, принималась равной  $H_2$ .

Решение задачи (1)...(13) осуществлялось методом конечных разностей по неявной схеме с использованием прямой и обратной прогонки для определения температурных полей для каждой из расчетных областей [4, 5].

Разработанный программный комплекс оснащен современным Windows-интерфейсом. Исходные данные вводятся с помощью двух диалоговых окон, последовательно появляющихся на экране. В первом окне вводятся коэффициенты теплообмена и, кроме этого, представлена схема процесса непрерывного вертикального литья. Во втором диалоговом окне (рис. 2) можно ввести исходные данные, осуществить выполнение программы, просмотреть и вывести на печать результаты расчетов, получить справочную информацию по использованию программного комплекса, выбирая пункты меню или нажимая “быстрые” кнопки на панели окна.

Программный комплекс оснащен системой оперативных подсказок на случай неверных действий пользователя. Результаты расчетов выводятся как в табличном (рис. 3), так и в графическом виде (рис. 4 и 5), что позволяет проводить их эффективный и удобный анализ для различных вариантов.

К примеру, на рис. 3 представлен табличный вывод динамики температур в выбранных пользователем (опорных) точках отливки, тигля, графитовой втулки и кристаллизатора на первом и втором циклах. Каждый цикл состоит из этапа движения и остановки. Используя рис. 4, можно анализировать динамику формирования отливки в процессе литья визуально.

На рис. 5 представлен пример вывода графиков, иллюстрирующий изменение температур в шести опорных точках, месторасположение которых указано на рис. 4.



Рис. 2. Второе диалоговое окно программы

Динамика температуры в точках измерения

Время извлечения отливки: 0.5 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА:

Номер цикла	Общее время с	Текущее время с	y5[0,М/2]	y1[0,М]	y1[0,М/2]	y1[0,1]	y6[0,М/2]	y7[0,М/2]	y2[0,М/2]	y3[0,М/2]
1	0,1	1	800,0	427,6	16,8	18,7	28,1	800,0	15,0	15,8
1	0,2	1	800,0	489,7	23,4	18,6	26,3	800,0	15,0	16,6
1	0,3	1	800,1	497,5	36,3	18,4	24,7	800,0	15,1	17,4
1	0,4	1	800,4	518,8	55,1	18,7	23,2	800,0	15,2	18,1
1	0,5	1	801,1	536,4	78,3	19,6	21,9	800,0	15,4	18,8
1	0,6	2	801,5	514,2	93,0	21,0	20,8	800,0	15,8	19,7
1	0,7	2	801,9	501,5	106,4	22,8	20,0	800,0	16,3	20,6
1	0,8	2	802,1	492,3	119,4	24,9	19,2	800,0	17,1	21,5
1	0,9	2	802,1	485,2	129,2	27,4	18,7	800,0	18,2	22,6
1	1,0	2	802,0	479,5	139,0	30,0	18,2	800,0	19,4	23,8
1	1,1	2	801,6	474,7	147,7	32,4	17,8	799,9	20,9	25,0
1	1,2	2	801,1	470,6	155,6	35,8	17,5	799,8	22,7	26,3
1	1,3	2	800,3	467,1	162,8	38,9	17,3	799,7	24,6	27,7
1	1,4	2	799,4	464,0	169,4	41,9	17,2	799,6	26,6	29,1
1	1,5	2	798,3	461,3	175,4	44,9	17,1	799,5	28,8	30,5

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА:

Номер цикла	Общее время с	Текущее время с	y5[0,М/2]	y1[0,М]	y1[0,М/2]	y1[0,1]	y6[0,М/2]	y7[0,М/2]	y2[0,М/2]	y3[0,М/2]
2	1,6	1	800,6	483,3	192,3	51,8	17,2	799,3	31,1	31,9
2	1,7	1	803,1	499,8	208,9	59,0	17,5	799,1	33,5	33,3
2	1,8	1	805,9	514,4	225,4	66,6	17,9	798,9	36,0	34,8
2	1,9	1	808,8	527,7	241,7	74,6	18,4	798,7	38,5	36,2
2	2,0	1	811,9	540,0	257,9	82,9	19,1	798,4	41,1	37,7
2	2,1	2	811,1	531,7	261,4	84,8	19,4	798,1	43,7	39,1
2	2,2	2	810,2	526,7	264,7	86,8	19,6	797,8	46,3	40,5
2	2,3	2	809,2	522,9	267,8	88,8	19,8	797,4	48,9	41,9
2	2,4	2	808,1	519,6	270,6	90,8	20,0	797,1	51,5	43,3
2	2,5	2	807,0	516,7	273,1	92,8	20,2	796,7	54,1	44,7
2	2,6	2	805,8	514,1	275,3	94,7	20,4	796,3	56,6	46,0
2	2,7	2	804,6	511,7	277,4	96,5	20,5	796,8	59,2	47,3

Печать Сохранить как... Закреть

Рис. 3. Пример представления результатов расчета в табличной форме

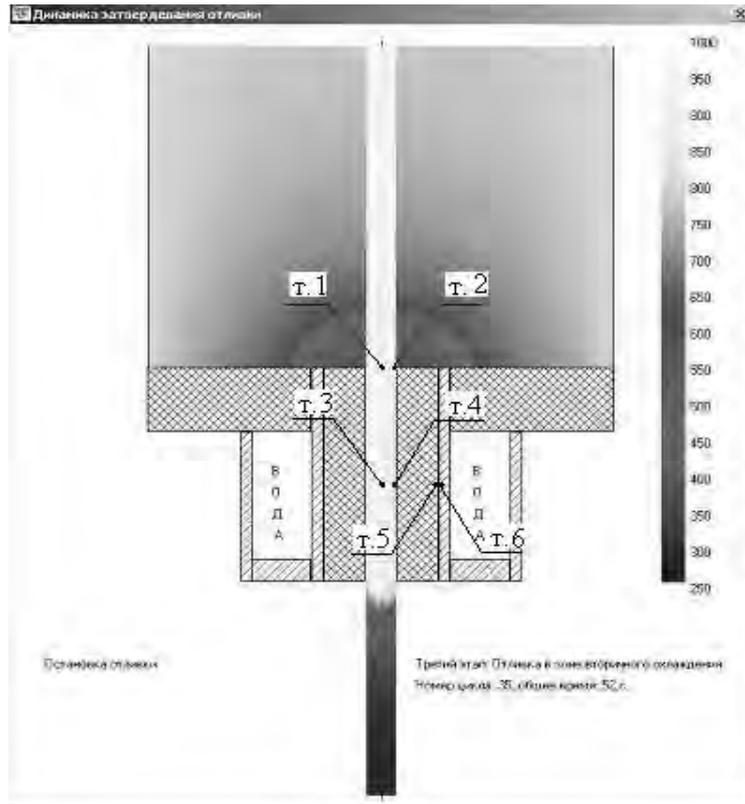


Рис. 4. Представление динамики затвердевания в графической форме: т. 1, т. 2, т. 3, т. 4, т. 5, т. 6 – опорные точки

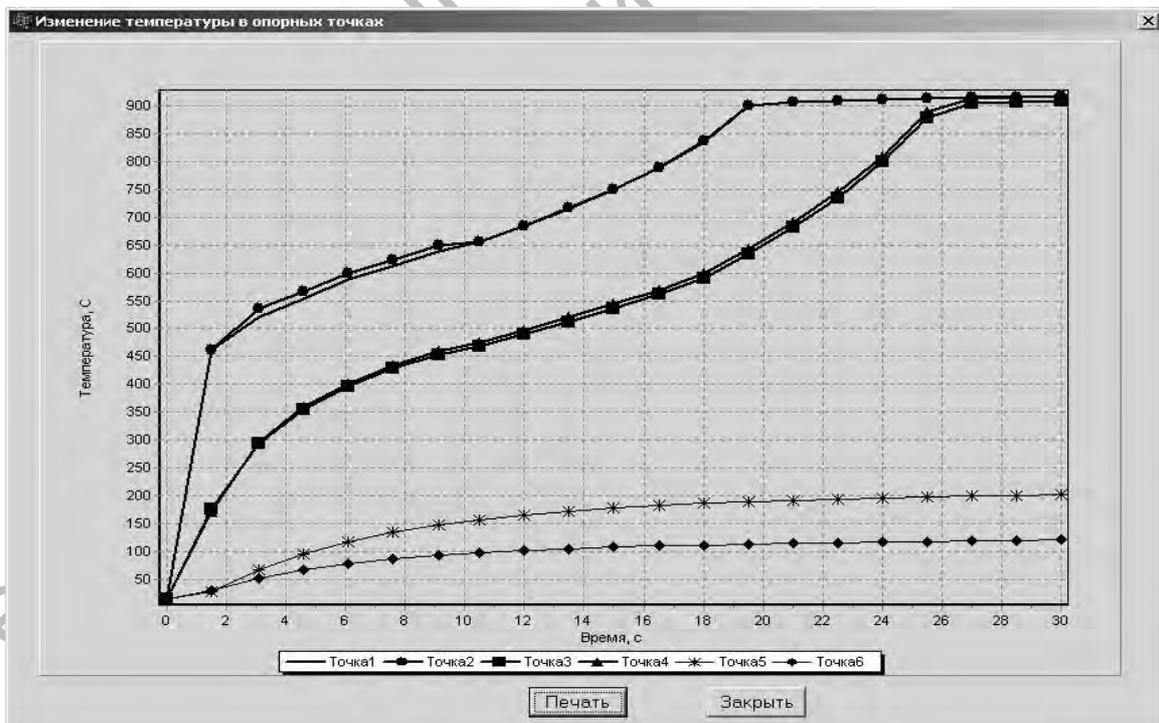


Рис. 5. Вывод динамики температур в опорных точках

В результате расчетов можно оценить влияние следующих факторов: интенсивность контактного теплообмена между отливкой и рабочей поверхностью кристаллизатора; интенсивность охлаждения кристаллизатора водой; интенсивность и протяженность зоны вторичного охлаждения отливки водой; продолжительность остановки отливки в кристаллизаторе  $\tau_{OCT}$ ; начальная температура кристаллизатора  $T_{03}$ ; величина перегрева расплава  $\Delta T_{ПЕР}$  - на изменение объема твердой и жидкой фазы в объеме отливки, на температуру рабочей поверхности кристаллизатора и толщину затвердевшей корки в различных сечениях формирующейся отливки, на температуру поверхности отливки на выходе из кристаллизатора и другие.

Разработанный программный комплекс будет использован для детального исследования влияния указанных факторов на формирование отливки после его адаптации [5] к реальным условиям процесса непрерывного вертикального литья проволочных заготовок на основе экспериментальных данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Марукович, Е. И.** Состояние, проблемы и перспективы непрерывного литья / Е. И. Марукович // Металознание, металлургия и термично обработване : сб. науч. докл. – Казанлък, България, 1996. – Ч. 2. – С. 14-19.
2. **Андронов, В. П.** Плавильно-литейное производство драгоценных металлов и сплавов / В. П. Андронов. – М. : Металлургия, 1974. – 320 с.
3. **Вейник, А. И.** Теплообмен между слитком и изложницей / А. И. Вейник. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1959. – 355 с.
4. **Самарский, А. А.** Введение в численные методы / А. А. Самарский. – М. : Высш. шк., 1987. – 307 с.
5. **Барановский, Э. Ф.** Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов / Э. Ф. Барановский, П. В. Севастьянов. – Мн. : Наука и техника, 1989. – 189 с.

Институт технологии металлов НАН Беларуси  
Материал поступил 19.11.2005

**E.I. Marukovich, V.F. Pumpur, V. A. Kharckov**  
**Creation of the software for simulation of**  
**continuous vertical casting of wire billets**  
Institute of Technology of Metals of NAS of Belarus

The article presents the mathematical model of heat exchange and software for modeling of formation process of wire billets by continuous vertical casting, is shown the software possibility and the form of results presentation.