

4. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий.-М.: Машиностроение, — 1985. — 240 с.
5. Горбунов А. Д., Гольдфарб Э. М. Нахождение корней трансцендентных уравнений в задачах теплопроводности пластины при неоднородных граничных условиях // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1983. — № 8. — С. 104-108.
6. Горбунов А. Д. К расчету термических напряжений при конвективном нагреве пластины // Математичне моделювання.-Днепродзержинск :ДГТУ, — 2010. — № 1 (22). — С. 16-21.
7. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. — М.: Госизд. Физматлит, — 1959. — 356 с.
8. Маковский В. А., Лаврентик И. И. Алгоритмы управления нагревательными печами. — М.: Металлургия, — 1977. — 183 с.

пост. 25.06.12

Оптимизация пространственных координат точек ввода дополнительных материалов в литейные ковши

А. В. ГРЕСС, С. А. СТОРОЖЕНКО

Днепродзержинский государственный технический университет

Методами математического моделирования установлены оптимальные пространственные координаты точек ввода дополнительных материалов в полость литейных ковшей

Методами математичного моделювання встановлені оптимальні просторові координати точок введення додаткових матеріалів у порожнину ливарних ківшів

By the methods of mathematics model was determined the optimal spatial coordinates of the points of the supplementary materials addition in the cave of casting bucket.

Введение. Весьма немаловажным и современным звеном технологии производства стальных отливок является доводка металла в литейных ковшах. Одним из наиболее эффективных и, в то же время, относительно дешевых способов доводки металла в ковшах является его продувка инертными газами с одновременной подачей дополнительных дисперсных материалов.

Состояние вопроса. К наиболее «свежим» публикациям в этом направлении следует отнести работы [1-4]. Здесь решались схожие трехмерные задачи по определению теплового и гидродинамического состояния сталеразливочных ковшей садкой от 60 т и выше. Решаемые задачи усложнялись по мере их времени публикации. Применительно к некоторым ковшам большой и средней вместимости исследовалось влияние места размещения в днище ковша одного или нескольких продувочных устройств с подачей через них аргона различной интенсивности одновременным нагревом металла электрической дугой постоянного или переменного тока заданной мощности на характер тепло-массообмена в объеме металла. Во всех случаях адекватность математической модели доказывалась посредством сравнения полученных численных данных с практическими. В результате исследования были предложены рекомендации применительно к конкретным ковшам первичной металлургии.

Отличие работы литейных ковшей состоит в их малых размерах, что накладывает определенные условия на процессы доводки металла, связанные со слабым развитием конвективных потоков в объеме ковшей и их высокой теплоотдающей способности. Известные науч-

ные работы по исследованию технологий доводки металла в литейных ковшах имеют, как правило, ретро-спективный характер и несколько устарели.

В настоящее время пока не известно, каким образом, в какое место полости литейного ковша, в связи с указанными выше его особенностями, необходимо вводить дополнительные материалы. В какой-то мере решение этих вопросов возможно с помощью методов математического моделирования, позволяющих исследовать гидродинамическую картину при внепечной обработке металла. И, поскольку подача газа производится не по оси ковша, задача неизбежно должна быть трехмерной.

Постановка задачи. Целью данной работы является нахождение оптимальных точек ввода дополнительных дисперсных материалов в процессе донной продувки инертными газами жидкой стали в литейных ковшах.

Изложение основного материала исследования.

Задача решалась с использованием разработанной трехмерной математической модели сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса в литейном ковше [5]. Схема расчетной области представлена на рис.1.

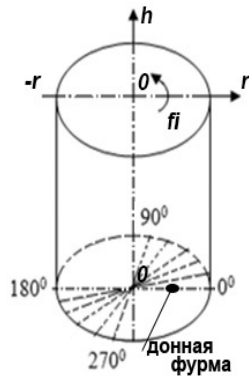


Рис. 1. Расчетная область моделирования

Модель построена на основе общего подхода к описанию многофазных систем, изложенного в работе [6]. При разработке модели предположили:

1. Зеркало металла является ровным, без волн, покрыто шлаком. Следовательно, нет необходимости учета динамики свободной поверхности.
2. Газожидкостная смесь несжимаема, а газовые пузыри движутся практически с теми же скоростями, что и слои окружающей жидкости. Такое допущение справедливо при неглубоком проникновении газа в жидкость, обеспечивает соленоидальность движения смеси и значительно облегчает численное решение уравнений движения.
3. Газ не поглощается и не выделяется в процессе продувки, полностью удаляется из металла через зеркало металла и шлака.
4. Уфутеровки ковшатепловое состояние металла определяется условиями внешнего теплоотвода и зависит от скоростей потоков металла, омывающих футеровку.

Система уравнений, описывающая динамику среды газ-расплав, следующая:

$$\partial \vec{V} / \partial t = R(\vec{V}, \alpha) - \vec{\nabla} \tilde{p}, \quad (1)$$

$$R(\vec{V}, \alpha) = -(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} + \nu_e \Delta \vec{V} - \alpha \vec{g}, \quad (1')$$

$$\vec{\nabla} \vec{V} = \Psi, \quad (2)$$

$$\partial \alpha / \partial t = -\vec{\nabla}(\alpha(\vec{V} + \vec{W})) + \Psi, \quad (3)$$

и дополняется уравнением конвективного теплопереноса в газожидкостной среде, записанным в приближении малого α :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot [a_e (1 - \frac{1}{2} \alpha) \vec{\nabla} T] / (1 - \alpha). \quad (4)$$

Здесь \vec{V} - барицентрическая скорость среды газ-расплав, t - время, Ψ и \vec{W} - объемный источник и диффузионная скорость газовой фазы, \tilde{p} - динамическая составляющая давления, деленная на плотность расплава, ν_e - коэффициент эффективной вязкости, \vec{g} - ускорение свободного падения. Кроме того, T - температура среды, а a_e - коэффициент эффективной теплопроводности среды. Коэффициенты ν_e и a_e включают в себя турбулентные составляющие алгебраической модели турбулентности.

Система уравнений (1) - (4) на каждом временном шаге τ , в соответствии с методом расщепления по физическим факторам, решается в три этапа [6]:

I этап:

$$\vec{V}^{\sim} = \vec{V}^n + \tau R(\vec{V}^n, \alpha^n), \quad (5)$$

$$\alpha^{n+1} = \alpha^n + \tau \left[-\vec{\nabla}(\alpha^n \vec{V}^n) + \Psi \right], \quad (6)$$

$$T^{n+1} = T^n + \tau \left\{ -\vec{V}^n \cdot \vec{\nabla} T^n + \vec{\nabla} \cdot [a_e (1 - \frac{1}{2} \alpha^n) \vec{\nabla} T^n] / (1 - \alpha^n) \right\}, \quad (7)$$

II этап:

$$\Delta \tilde{p}^{n+1} = \left[\vec{\nabla} \vec{V}^{\sim} - \Psi \right] / \tau, \quad (8)$$

III этап:

$$\vec{V}^{n+1} = \vec{V}^{\sim} - \tau \vec{\nabla} \tilde{p}^{n+1}, \quad (9)$$

где n - номер временного слоя.

На внутренних поверхностях ковша выбраны условия не протекания и свободного скольжения. На свободной поверхности металла выбраны условия свободного протекания. Учет подачи газа через фурму осуществляется путем введения в месте ее расположения источников газовой фазы объемной плотностью

$$\psi = \frac{q}{V_0} \frac{T_{met}}{273}$$

где q - расход газа через фурму и V_0 - объем зоны формирования барботажного режима в прифурменной области (в расчетах он принят равным объему расчетной ячейки).

При расстановке граничных условий в нашем случае важно точно обеспечить условие сопряжения всех характеристик среды (скоростей, давлений, плотностей газовой фазы, а также температуры) при $\varphi = 0$ и $\varphi = 2\pi$. Для облегчения этого расчетную область удобно представить в пространстве с координатами ρ , φ и z в качестве декартовых. В этом случае расчетная область принимает форму параллелепипеда, причем грань I, соответствующая значению $r = 0$, в реальной области вырождается в осевую линию, а грани II и III, соответствующие $\varphi = 0$ и $\varphi = 2\pi$, должны быть отождествлены. Таким образом, грани II и III следует связать условиями сопряжения, а на всех остальных границах следует выбрать условия непротекания и эффективной конвективной теплоотдачи.

В разностном виде с использованием шахматной сетки для удобства расстановки граничных условий расчетная область со всех сторон окаймляется слоем заграничных ячеек. В этом случае условия сопряжения на гранях II и III реализуются тем, что заграничные значения всех характеристик среды на одной из граней выбираются равными приграничным значениям на другой, и наоборот.

С целью проверки адекватности математической модели были проведены исследования гидродинамики металлической ванны на физической модели литейного ковша, выполненной в масштабе 0,6 реального образца [7]. При моделировании в качестве определяющих критериев использовались числа Лапласа, Архимеда и критерий гомохронности. Модель выполнена прозрачной, что позволило визуализировать потоки жидкости с помощью специальных маркеров, имеющих нулевую плавучесть. Газ подавался через донную пористую фурму с расходами, соответствующими реальным условиям.

Сравнение результатов численного и физического моделирования показало, что расхождение не превыша-

ет 8%, что позволяет утверждать об адекватности математической модели реальному процессу.

В процессе численного моделирования исследовали тепло- и массообменные процессы, протекающие в реальных литейных ковшах садкой 1, 5, 10, 16, 20, 25, 30, 40, 50 т [8], продуваемых инертным газом снизу через одну донную фурму с интенсивностью 1,2-3,2 л/(т·мин). На основании результатов физического моделирования [7] нами определено, что наиболее рационально донную фурму располагать на расстоянии 0,4-0,6 радиуса ковша от его оси. При расчетах принято, что фурма расположена на расстоянии 0,5 радиуса от оси ковша.

На рис.2 в качестве примера приведено распределение абсолютных значений скоростей в объеме жидкого металла для ковшей садкой 1, 10, 25 и 50 т, продуваемых инертным газом с интенсивностью 2,2 л/(т·мин). Здесь и далее: W – абсолютное значение скорости, м/с; h – расстояние от днища ковша, м; r – расстояние от оси ковша м. Данные представлены по вертикальной плоскости, проходящей через оси ковша и донной газовой фурмы.

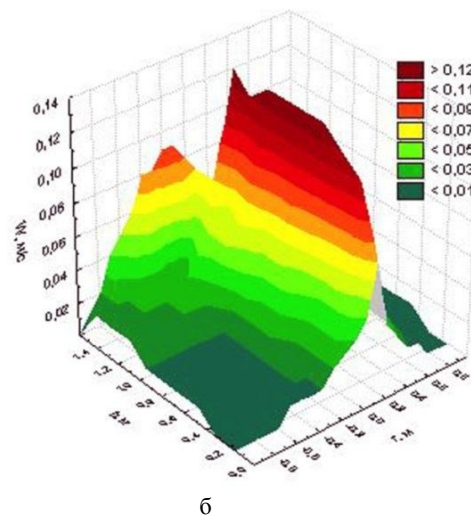
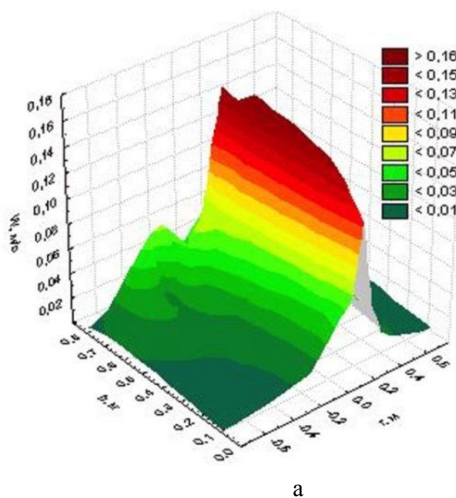
Очевидно, что, при общей схожести картины распределения скоростей в агрегатах различной вместимости, наблюдаются некоторые особенности и закономерности. Так, по мере увеличения размеров ковша, возрастает скорость потоков металла в области, расположенной по другую сторону относительно оси агрегата от места подачи газа.

Статистическая обработка баз данных численных экспериментов позволила сделать вывод о нелинейном характере уменьшения средних скоростей движения расплава по мере увеличения вместимости ковшей при неизменной интенсивности продувки (рис.3). Такой же нелинейный характер носит зависимость средних скорости потоков расплава от садки агрегата. Соответствующая регрессионная зависимость имеет вид (здесь и далее R – коэффициент множественной регрессии, R^2 – коэффициент детерминации):

$$W_{\text{ср}} = 1,62 \cdot 10^{-2} - 6,99 \cdot 10^{-4} \cdot m + 7 \cdot 10^{-2} m^2 + 9,78 \cdot 10^{-3} q - 7,5 \cdot 10^{-4} q^2, R = 0,87, R^2 = 0,75. \quad (10)$$

Определено, что при неизменной интенсивности продувки скорость гомогенизации расплава в ковшах малой садки будет выше, чем в крупных ковшах. И, по мере роста садки ковша, влияние интенсивности подачи газа на время гомогенизации уменьшается. Зная количественную зависимость скоростей перемещения потоков металла от садки агрегата и интенсивности продувки, можно, исходя из условий производства (времени выдержки в ковше, состояния футеровки, скорости разлива и т.п.) определить желаемую для каждого конкретного случая интенсивность продувки.

В результате статистических были найдены скорости потоков металла в объеме исследованных литейных ковшей при различной интенсивности донной продувки газами (доверительный интервал составлял 95%). Адекватность регрессионной модели оценивали по критерию Фишера.



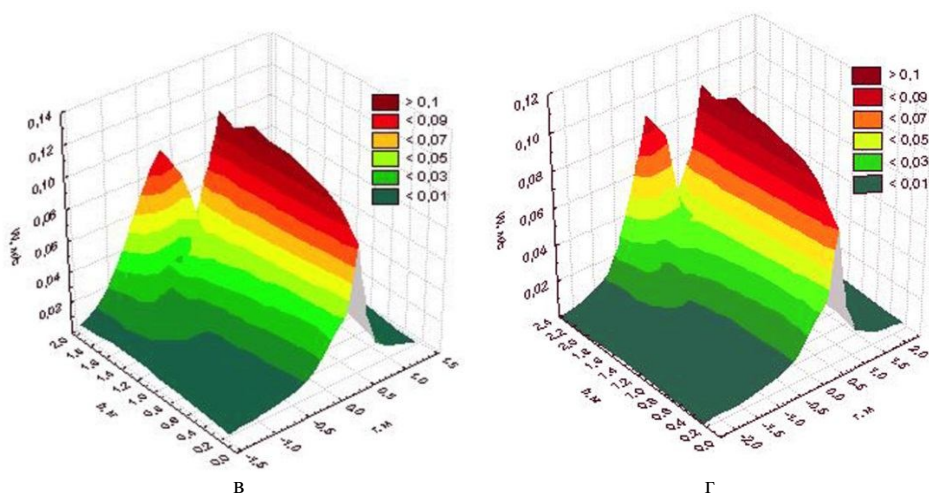


Рис. 2. Распределение абсолютных значений скоростей в объеме жидкого металла для ковшей садкой 1(а), 10(б), 25(в) и 50(г) т, продуваемых инертным газом с интенсивностью 2,2 л/(т·мин)

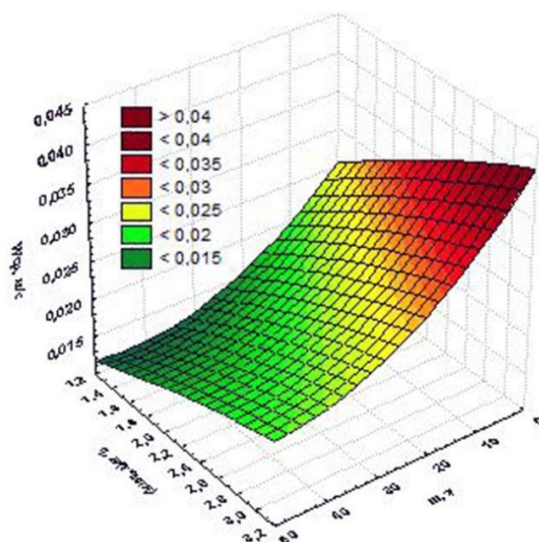


Рис. 3. Зависимость средней скорости потоков расплава от вместимости литейного ковша и интенсивности продувки

Таблица 1. Результаты статистической обработки данных численных экспериментов

m, т	Коэффициенты уравнения регрессии									Статистические оценки	
	b_0	b_1	b_{11}	b_2	b_{22}	b_3	b_{33}	b_4	b_{44}	R	R ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,044 14,48	0,012 4,22	-0,0009 -1,53	-0,019 -16,65	-0,076 -50,53	-0,0004 -28,15	0,000001 17,81	-0,012 -2,39	0,062 11,96	0,80	0,64
5	0,039 14,53	0,010 4,09	-0,0008 -1,48	-0,011 -16,53	-0,031 -50,61	-0,0004 -28,25	0,000001 17,93	-0,007 -2,20	0,022 10,96	0,80	0,63
10	0,033 12,76	0,011 4,83	-0,0010 -1,87	-0,012 -16,51	-0,038 -48,89	-0,0004 -30,49	0,000001 19,64	0,014 5,79	0,006 4,65	0,81	0,66
16	0,034 14,35	0,010 4,82	-0,0009 -1,97	-0,008 -16,42	-0,020 -52,72	-0,0004 -30,44	0,000001 19,61	0,0003 0,13	0,008 8,74	0,81	0,65

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
20	$\frac{0,035}{14,94}$	$\frac{0,009}{4,29}$	$\frac{-0,0007}{-1,59}$	$\frac{-0,008}{-17,28}$	$\frac{-0,016}{-51,44}$	$\frac{-0,0003}{-29,98}$	$\frac{0,000001}{19,08}$	$\frac{-0,001}{-0,71}$	$\frac{0,008}{9,19}$	0,80	0,64
25	$\frac{0,034}{14,84}$	$\frac{0,009}{4,22}$	$\frac{-0,0007}{-1,54}$	$\frac{-0,007}{-17,12}$	$\frac{-0,014}{-51,18}$	$\frac{-0,0003}{-29,64}$	$\frac{0,000001}{18,83}$	$\frac{-0,001}{-0,84}$	$\frac{0,006}{9,12}$	0,80	0,63
30	$\frac{0,033}{14,67}$	$\frac{0,008}{4,06}$	$\frac{-0,0006}{-1,44}$	$\frac{-0,006}{-17,05}$	$\frac{-0,011}{-50,70}$	$\frac{-0,0003}{-29,02}$	$\frac{0,000001}{18,42}$	$\frac{-0,002}{-1,49}$	$\frac{0,006}{9,35}$	0,79	0,62
40	$\frac{0,032}{14,70}$	$\frac{0,008}{4,00}$	$\frac{-0,0006}{-1,44}$	$\frac{-0,005}{-17,15}$	$\frac{-0,009}{-50,13}$	$\frac{-0,0003}{-29,04}$	$\frac{0,000001}{18,44}$	$\frac{-0,002}{-1,74}$	$\frac{0,005}{9,28}$	0,79	0,62
50	$\frac{0,030}{14,21}$	$\frac{0,006}{3,40}$	$\frac{-0,0005}{-1,18}$	$\frac{-0,004}{-16,91}$	$\frac{-0,005}{-45,76}$	$\frac{-0,0003}{-27,31}$	$\frac{0,000001}{17,34}$	$\frac{-0,005}{-3,68}$	$\frac{0,005}{10,04}$	0,75	0,57

Значимость коэффициентов регрессионной модели определяли по величине коэффициента Стьюдента. Общий вид регрессионной зависимости имеет вид:

$$W = b_0 + b_1q + b_{11}q^2 + b_2r + b_{22}r^2 + b_3fi + b_{33}fi^2 + b_4h + b_{44}h^2, \quad (11)$$

где q – интенсивность продувки металла инертными газами, л/(т·мин).

Результаты расчета коэффициентов регрессионной зависимости (11) для различных ковшей приведены в табл. 1 (здесь в знаменателе – коэффициенты Стьюдента).

Пользуясь данными табл. 1 и задавшись координатами интересующего места ввода дополнительных материалов, можно с достаточной степенью достоверности определить скорости обтекающих их потоков жидкого металла.

Для наилучшего усвоения дополнительных материалов, вводимых в литейный ковш, следует определить место расположения в объеме металла локальных областей с наибольшими абсолютными значениями скоростей потоков жидкого металла. Также немаловажно знать и расположение застойных зон, а которые крайне нежелательно вводить реагенты. С этой целью следует решить задачу оптимизации [9].

В настоящее время в процессе решения задач оптимизации целесообразно использовать максимально доступные в эксплуатации лицензированные программные комплексы. Одним из таких комплексов является Solver – приложение MS Excel 2010. Эта программа содержит целый спектр оптимизационных программ. Первая – обобщенный антиградиентный метод нелинейной оптимизации. Вторая – симплексный метод для линейной оптимизации. Третья – эволюционный метод решения негладкой оптимальной функции, использующий генетический алгоритм, методы локального поиска и другие.

Генетические и эволюционные алгоритмы оптимизации являются алгоритмами случайного направленного поиска и применяются, в основном, там, где стоит задача оптимизации недифференцируемой функции или задача многоэкстремальной глобальной оптимизации [10, 11], что и является особенностью данных исследований.

Результаты расчета местоположения глобальных экстремумов абсолютных значений скоростей потоков металла представлены в табл. 2, с помощью которой несложно определить оптимальные места ввода дополнительных материалов в объем металла различных литейных ковшей, продуваемых снизу инертным газом с заданной интенсивностью.

Следует подчеркнуть отсутствие определенной закономерности в расположении точек глобальных экстремумов в объеме металла от садки ковша и интенсивности продувки, что предполагает необходимость проведения дополнительных расчетов в каждом конкретном случае.

Выводы

С использованием разработанной адекватной сопряженной трехмерной математической модели тепло- и массопереноса в объеме жидкого металла, продуваемого снизу в полости литейных ковшей инертным газом, а также на основании решения оптимизационной задачи:

1. Найдены количественные закономерности зависимости абсолютных значений скоростей потоков металла от садки литейных ковшей, интенсивности подачи газа в любой точке их объема.
2. Определено, что при неизменной интенсивности продувки скорость гомогенизации расплава в ковшах малой садки будет выше, чем в крупных ковшах, а по мере роста садки ковша влияние интенсивности подачи газа на время гомогенизации уменьшается.
3. Найдено пространственное местоположение в объеме жидкого металла глобальных экстремумов абсолютных значений скоростей потоков металла.

Таблица 2. Расположение в объеме литейных ковшей локальных точек с глобальными экстремальными значениями скоростей потоков металла

m, τ	Интенсивность продувки, л/(т·мин)	$W, \text{ м/с}$	$r, \text{ м}$	$fi, \text{ град}$	$h, \text{ м}$
1	2	3	4	5	6
1	1,2	0	0,43	158 (202)	0,45
		0,095	-0,12	0	0,88
	2,2	0	-0,65	223 (137)	0,19
		0,100	-0,12	0	0,88
	3,2	0	0,68	228 (132)	0,70
		0,110	-0,12	0	0,88
5	1,2	0	-0,08	106 (254)	0,58
		0,080	-0,18	0	1,31
	2,2	0	0,17	220 (140)	0,86
		0,065	1,12	186 (174)	0,15
	3,2	0	-0,30	110 (250)	0,43

m, τ	Интенсивность продувки, л/(т·мин)	$W, \text{ м/с}$	$r, \text{ м}$	$f_i, \text{ град}$	$h, \text{ м}$	
1	2	3	4	5	6	
10	1,2	0,060	1,12	186 (174)	0,15	
		0	0,71	141 (219)	0,89	
	2,2	0,104	1,56	192 (168)	0	
		0	-1,01	179 (181)	1,01	
		0,099	-0,16	0	1,80	
		0	-0,95	182 (178)	0,11	
	3,2	0,105	-0,16	0	1,80	
		0	0,72	184 (176)	0,55	
		0,082	-0,20	0	2,08	
		0	1,06	257 (103)	0,68	
	16	1,2	0,089	-0,20	0	2,08
			0	1,13	191 (169)	0,99
2,2		0,094	-0,20	0	2,08	
		0	0,96	104 (256)	0,71	
		0,079	-0,24	0	2,22	
		0	1,24	159 (201)	0,15	
20	2,2	0,0867	-0,24	0	2,22	
		0	1,42	155 (205)	1,58	
	3,2	0,906	-0,24	0	2,22	
		0	-1,68	128 (232)	1,34	
25	1,2	0,077	-0,26	0	2,37	
		0	1,09	173 (187)	0,68	
	2,2	0,083	-0,26	0	2,37	
		0	1,23	183 (177)	0,72	
		0,088	-0,26	0	2,37	
		0	1,30	186 (174)	1,49	
30	1,2	0,073	-0,28	0	2,53	
		0	-1,93	243 (117)	0,14	
	2,2	0,079	-0,28	0	2,53	
		0	1,53	177 (183)	1,38	
		0,083	-0,28	0	2,53	
		0	1,13	124 (236)	0,49	
40	1,2	0,0696	-0,32	0	2,75	
		0	1,36	19 (341)	0,33	
	2,2	0,075	-0,32	0	2,75	
		0	-2,27	191 (169)	1,21	
		0,080	-0,32	0	2,75	
		0	1,47	177 (183)	0,92	
50	1,2	0,062	-0,42	0	2,8	
		0	1,68	148 (212)	1,08	
	2,2	0,066	-0,42	0	2,8	
		0	1,97	153 (207)	1,47	
		0,070	-0,42	0	2,8	
		0	1,47	177 (183)	0,92	

ЛИТЕРАТУРА

1. Пиптюк В. П. Исследование гидродинамики и тепло-массообмена ковшевой ванны установки ковш-печь [Текст] / В. П. Пиптюк, В. Ю. Болотов, И. А. Павлюченков // *Металл и литье Украины*. — 2005. — №3—4. — С. 97—98.
2. Пиптюк В. П. Исследование методом математического моделирования процессов обработки стали на установке «печь-ковш» / В. П. Пиптюк, В. Ф. Поляков, В. А. Поляков и др. // *Металл и литье Украины*. — 2006. — №1. — С. 48—54.
3. Пиптюк В. П. Изучение методами моделирования возможностей повышения эффективности использования установок ковш-печь / В. П. Пиптюк, В. Ф. Поляков, Э. В. Приходько и др. // *Бюллетень «Черная металлургия»*. — 2009. — №8. — С. 22—28.
4. Пиптюк В. П. Изучение теплового состояния ванны установки ковш-печь / В. П. Пиптюк, В. Ф. Поляков, С. Е. Самохвалов и др. // *Металлург*. — 2011. — №7. — С. 50—53.
5. Гресс А. В. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса в литейном ковше / А. В. Гресс, С. Е. Самохвалов, С. А. Стороженко и др. // *Математичне моделювання*. — 2011. — №2(25). — С. 119—122.
6. Огурцов А. П. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах // А. П. Огурцов, С. Є. Самохвалов. — К.: Наукова думка, 2001. — 409 с. — Бібліогр.: с. 393—406. — ISBN 966-00-0724-8.
7. Гресс А. В. Физическое моделирование гидродинамики металлической ванны литейного ковша / А. В. Гресс, С. А. Стороженко // *Зб. наук. пр., сер. «Металлургия»*. — Запоріжжя: ЗДІА, 2011. — Вип. 24. — С. 19-24.
8. Власов Н. Н. Разливка черных металлов: справ. Издание / Н. Н. Власов, В. В. Король, В. С. Радя. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1987. — 272 с.
9. Белай Г. Е. Организация металлургического эксперимента / Г. Е. Белай, В. В. Дембовский, О. В. Соценко — М.: Металлургия, 1993. — 256 с.
10. Популярно о генетических алгоритмах. Исаев Сергей. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://algolist.manual.ru/ai/ga/ga1.php>.
11. Применение генетических и эволюционных алгоритмов оптимизации. Нейронные сети и анализ данных. Материал из сайта Виктора Царегородцева NeuroPro. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.neuropro.ru/memo314.shtml>.