

УДК 621.74.047

О ВЛИЯНИИ КОНВЕКТИВНЫХ ПОТОКОВ РАСПЛАВА НА ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ОТЛИВКИ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ НЕПРЕРЫВНОМ ЛИТЬЕ

Канд. техн. наук, доц. ДЕМЧЕНКО Е. Б.

Белорусский национальный технический университет

Известно, что при горизонтальном непрерывном литье в процессе формирования отливки в верхней зоне кристаллизатора образуется более тонкая корка затвердевшего расплава, чем в нижней. Основными причинами возникновения такого явления считаются усадка отливки и конвективные потоки расплава [1–4].

При усадке отливка прижимается к нижней зоне кристаллизатора, образуя сверху газовый зазор. Конвективные потоки действуют в кристаллизаторе при поступлении более горячего расплава из металлоприемника в процессе вытяжки отливки и омывают корку в верхней зоне. Теплоотвод в верхней зоне и скорость затвердевания снижаются, корка перегревается и подплавляется. Фронт затвердевания становится несимметричен относительно оси вытяжки отливки, возникают явления запаздывания затвердевания корки в верхней зоне и смещения теплового центра отливки относительно геометрического [4]. В результате увеличивается вероятность прорывов корки расплавом на выходе из кристаллизатора.

Влияние усадки отливки исследовано достаточно полно [5]. Воздействие конвективного движения расплава можно оценить следующим образом.

Сформулируем задачу о тепловом состоянии твердой корки. Тепловой баланс на границе между расплавом и коркой запишем в форме Стефана

$$\rho r \frac{d\xi}{dt} = q_{1n}(z, t) - q'(z, t) \quad (1)$$

при граничных условиях:

$$T[\xi(t), z, t] = T_{кр};$$

$$[\xi(0)] = 0; T(x, z, 0) = T_{кр},$$

где $q_{1n}(z, t)$ – удельный тепловой поток, отводимый через корку; $q'(z, t)$ – то же со стороны расплава; r – удельная теплота кристаллизации; ρ – плотность расплава.

Уравнение (1) позволяет определить условие вероятности оплавления корки: корка будет оплавляться при $\frac{d\xi}{dt} < 0$, т. е.

$$q_{1n}(z, t) \leq q'(z, t). \quad (2)$$

Иначе при $\frac{d\xi}{dt} \geq 0$ будет происходить ее рост.

Удельный тепловой поток со стороны расплава $q'(z, t)$ найдем с помощью критериальных зависимостей теории подобия.

Теплообмен при вынужденной конвекции расплава ($Pr < 1$) в случае ламинарного режима движения описывается уравнением [6]

$$Nu = 1,1[(1 - Pr)^{1/3} Pe]^{1/2}, \quad (3)$$

где $Nu = \frac{q'(z, t)d'}{\lambda'\Delta T}$ – критерий Нуссельта; $d' = d - 2\xi$ – эффективный диаметр жидкой фазы; d – диаметр отливки; $\Delta T = T_{зал} - T_{кр}$ – температура перегрева расплава; $Pr = \frac{\nu'}{a'}$ – критерий

Прандтля; $Pe = \frac{\omega d'}{a'}$ – критерий Пекле.

Конкретизируем условия для решения поставленной задачи. Для этого воспользуемся

результатами [7], где рассматривается затвердевание сплошной цилиндрической отливки $d = 0,1$ м из чугуна. Здесь толщина корки на выходе из кристаллизатора $\xi = 8-13$ мм. Значения коэффициентов теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности вблизи температур кристаллизации изменяются в узких интервалах: $\lambda' = 29-35$ Вт/(м·К); $\nu' = (0,8-1,1) \cdot 10^{-6}$ м²/с; $a' = (4,0-4,6) \cdot 10^{-6}$ м²/с. Поэтому выберем их средние величины. Удельный тепловой поток, отводимый через корку $q_{1n}(z, t)$, примем равным удельному тепловому потоку в кристаллизаторе $q_{2n}(z, t)$. Теплопередачей вдоль оси отливки пренебрегаем.

Раскроем выражение (3) и решим его относительно $q'(z, t)$. После несложных вычислений и подстановок условие вероятности оплавления корки (2) для ламинарного режима движения расплава примет вид

$$q_{2n}(z, t) \leq 57553\omega^{1/2}\Delta T. \quad (4)$$

Это соотношение дает возможность вычислить критическую скорость потоков $\omega_{крит}$, достаточную для начала оплавления корки:

$$\omega_{крит} \geq 3,02 \cdot 10^{-10} \left[\frac{q_{2n}(z, t)}{\Delta T} \right]^2. \quad (5)$$

Для расчета $\omega_{крит}$ в случае турбулентного

режима движения воспользуемся формулой, взятой из [8]:

$$\omega_{крит} \geq \frac{q_{2n}(z, t)}{34783\Delta T}. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) позволяют вычислить критические скорости конвективных потоков по результатам исследования теплового режима кристаллизатора. Для этого воспользуемся данными [7]. Приближенные к реальным условиям скорости потоков можно определить методом гидротепловой аналогии [9, 10]. Сравнение расчетных и действительных скоростей потоков даст ответ на вопрос, оплавляется корка или нет.

Картину конвективного движения расплава вдоль фронта затвердевания изучали с помощью модельной установки (рис. 1, табл. 1). В процессе моделирования металлоприемник заполняли водой ($T_{в} = 8-12$ °С) до уровня $h_{м,мин}$. Затем осуществляли доливку горячей подкрашенной воды ($T_{в} = 55-60$ °С). Объем доливаемой воды соответствовал объему, необходимому для заполнения металлоприемника до уровня $h_{м,макс}$. Для имитации вытяжки отливки воду периодически в соответствии со временем движения $t_{м,дв}$ цикла вытяжки ($t_{ц} = t_{м,дв} + t_{м,ост}$) сливали через выпускное устройство. Объем сливаемой воды соответствовал объему отливки, вытянутой за один шаг движения Δh . Скорости

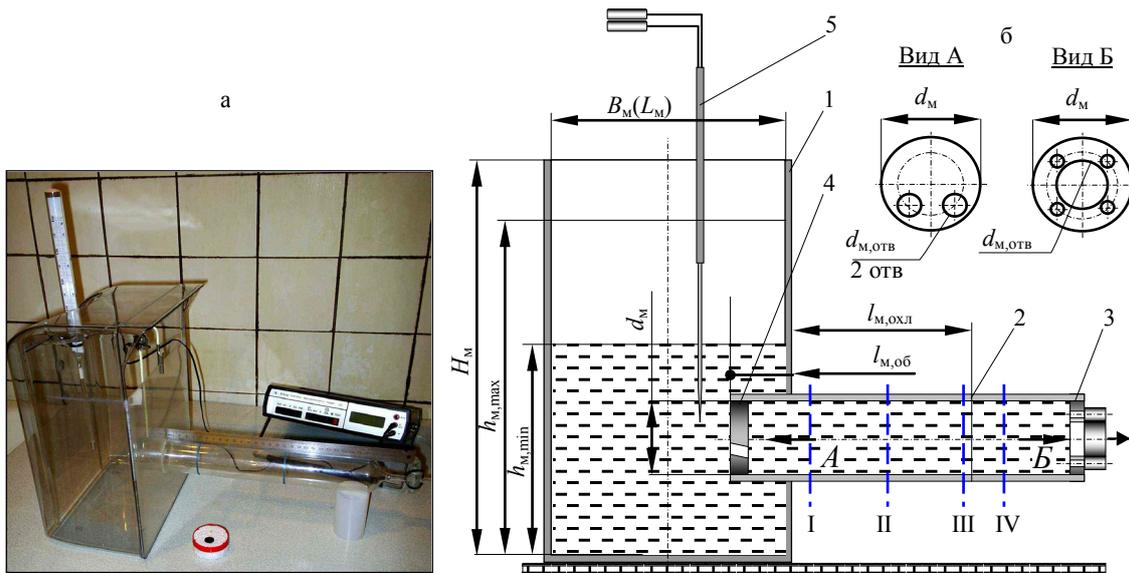


Рис. 1. а – общий вид; б – схема модельной установки: 1 – металлоприемник; 2 – кристаллизатор; 3 – выпускное устройство; 4 – разделительное устройство; 5 – термопара

конвективных потоков измеряли в зонах I–IV. Для более удобного восприятия материала все экспериментальные значения скоростей пото-

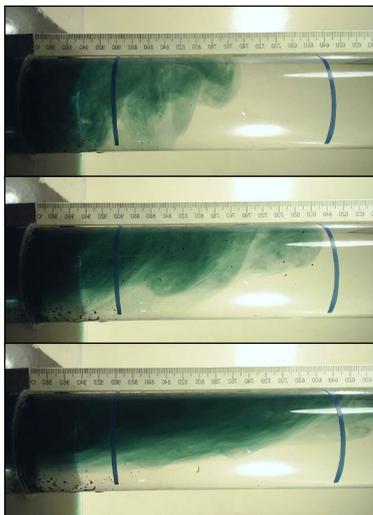
Таблица 1

Параметры моделирования

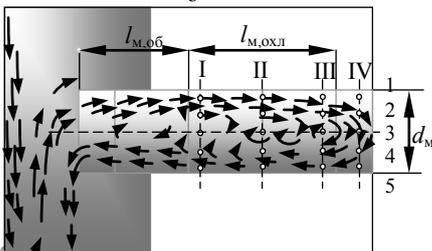
Параметр	Размер, м			
	Натуры		Модели	
Кристаллизатор				
Диаметр	D	0,1000	d_M	0,0660
Длина	$l_{охл}$	0,2000	l_M	0,1320
Длина хвостовика	$l_{об}$	0,1400	$l_{м,хв}$	0,0920
Металлоприемник				
Длина	L	0,6000	L_M	0,3960
Ширина	B	0,5000	B_M	0,3300
Высота	H	0,8000	H_M	0,5280
Уровень расплава				
Максимальный	h_{max}	0,6000	$h_{m,max}$	0,3960
Минимальный	h_{min}	0,2500	$h_{m,min}$	0,1670
Масштаб времени			M_L	0,8100
Масштаб расхода	Q_H	0,0118	Q_M	0,0047

Исследования движения конвективных потоков провели при следующих параметрах вытяжки отливки: $w_{cp} = 0,26$ м/мин; $t_{дв} = 3$ с; $t_{ост} = 6$ с; $\Delta h = 0,04$ м. В результате моделирования установлено, что в процессе вытяжки горячий расплав из металлоприемника втягивался в кристаллизатор, создавая потоки, движущиеся вдоль верхней области фронта затвердевания (рис. 2).

а



б



ков ω_m пересчитаны на действительные значения ω_n согласно масштабам моделирования.

Рис. 2. а – характер движения конвективных потоков в кристаллизаторе; б – схема движения потоков

Более холодный расплав вытеснялся в нижнюю область кристаллизатора (рис. 2а). Образовавшиеся круговые потоки изменяли направление движения на противоположное и выходили в металлоприемник (рис. 2б).

Измерения в различных зонах кристаллизатора показали (рис. 3), что максимальная скорость потоков имела место в верхней области фронта затвердевания (точки 1) в зоне I: $\omega_n = 0,022$ м/с. По мере продвижения потоков за пределы кристаллизатора скорость уменьшалась до $\omega_n = 0,020$ м/с (зона IV). В нижней области кристаллизатора (точки 5) скорость потоков меньше: $\omega_n = 0,018$ м/с в зоне IV и $\omega_n = 0,014$ м/с в зоне I. В средней области (точки 2, 3, 4) скорость составила $\omega_n = 0,015–0,019$ м/с.

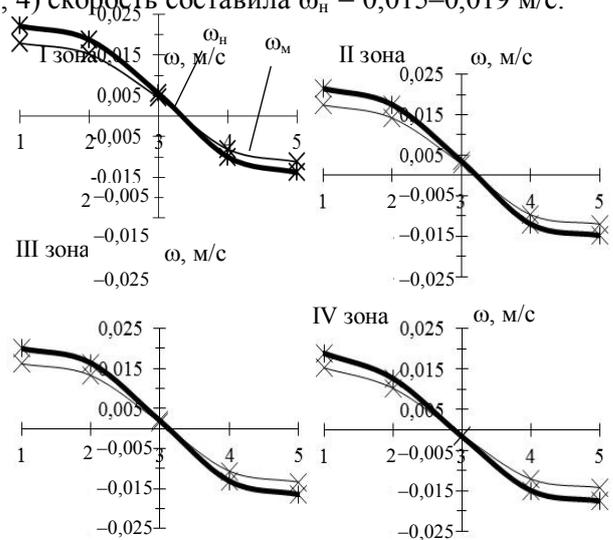


Рис. 3. Эпоры скоростей конвективных потоков: 1, 2 – верх; 3 – средняя зона; 4, 5 – низ

Моделирование показало, что в процессе литья в момент вытяжки отливки в системе «металлоприемник – кристаллизатор» периодически возникает вынужденное конвективное движение расплава. Оно обусловлено взаимодействием более горячего расплава, поступающего из металлоприемника, и расплава в кристаллизаторе. Наиболее интенсивное движение потоков имеет место в верхней зоне затвердевания. Их интенсивность зависит не только от градиента температур в системе, но и от объема

поступающего в кристаллизатор расплава, режима вытяжки отливки и высоты проходного сечения кристаллизатора [11, 12].

Изменить такой весьма нежелательный характер движения потоков можно с помощью разделительного устройства [13]. Оно представляет собой заглушку, «пробку», которая имеет в нижней части отверстия для пропуска расплава (рис. 1). Расплав поступает в кристаллизатор через отверстия только в нижнюю зону отливки и только в момент вытяжки отливки.

В этом случае движение потоков изучали при следующих параметрах литья: $w_{\text{ср}} = 0,3$ м/мин; $t_{\text{дв}} = 3$ с; $t_{\text{ост}} = 6$ с; $\Delta h = 0,045$ м. Исследования показали, что конвективные потоки, поступающие из отверстия разделительного устройства, имели форму компактной горизонтальной струи (рис. 4).

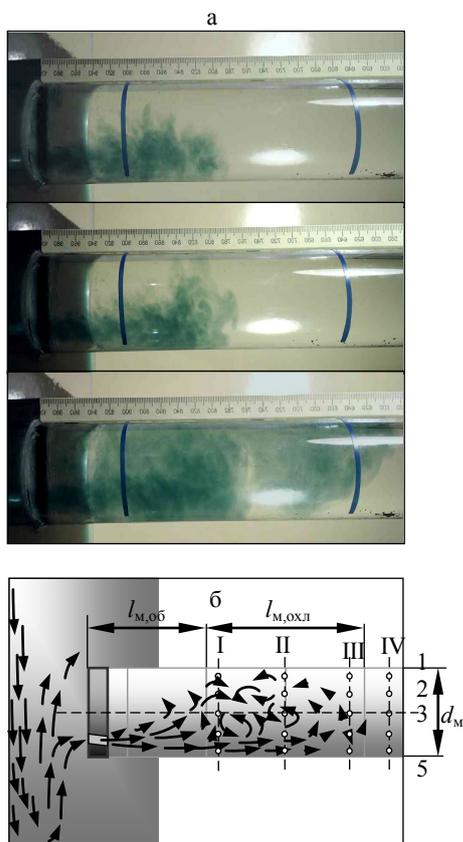


Рис. 4. а – характер движения конвективных потоков в кристаллизаторе; б – схема движения потоков (с использованием разделительного устройства)

Движение потоков к фронту затвердевания направлено вдоль нижней образующей кристаллизатора. Поскольку полость отливки представляет собой замкнутое пространство,

интенсивность движения горячих потоков резко замедлялась из-за сопротивления более холодных потоков. В зонах I и II струя раскрывалась, и отделившиеся потоки, имеющие более высокую температуру, двигались в верхнюю зону затвердевания. Образовывалось слабо выраженное круговое движение потоков относительно горячей струи. В серединных частях отливки интенсивность потоков снижалась, а в верхней области кристаллизатора угасала. В зону выхода отливки из кристаллизатора (зона IV) потоки практически не проникали.

Результаты измерения скоростей конвективных потоков показали следующее. При вытяжке отливки в месте истечения расплава из меньшего (по отношению к диаметру кристаллизатора) отверстия разделительного устройства скорость потока была очень высока $\omega_n = 0,28$ м/с (рис. 4), что явилось следствием всасывания расплава. По мере движения потоков к фронту затвердевания их скорость из-за сопротивления холодного расплава быстро падала: в нижней области кристаллизатора (рис. 5, точки 4, 5) в зоне I – $\omega_n = 0,059$ м/с, в зоне III – $\omega_n = 0,010$ м/с. В верхней области кристаллизатора скорость потоков еще больше снижалась с $\omega_n = 0,008$ м/с (зона I) до минимальных значений $\omega_n = 0,002$ м/с (зона III, точки 1, 2). В серединных частях отливки и в зоне IV направление движения потоков менялось на обратное. Интенсивность незначительна: $\omega_n = 0,001-0,004$ м/с (точки 1–3).

Моделирование показало, что использование разделительного устройства приводит к возникновению вынужденного конвективного движения расплава в жидкой лунке отливки. Причиной этого является всасывание расплава в полость кристаллизатора при вытяжке отливки. Интенсивность движения потоков зависит от режима вытяжки отливки. Чем больше время вытяжки $t_{\text{дв}}$, тем большее количество расплава поступает в кристаллизатор и тем интенсивнее движение потоков.

В рассмотренных случаях моделирования вынужденная конвекция расплава вдоль фронта затвердевания носит преимущественно ламинарный характер ($Re < 2000$). Число Рейнольдса для скоростей потоков $\omega_n = 0,014-0,022$ м/с при обычном способе литья составляет $Re =$

= 780–1650, а в случае использования разделительного устройства для $\omega_n = 0,002–0,060$ м/с – $Re = 150–4500$. Турбулентный режим течения расплава наблюдался только в зоне I в нижней области кристаллизатора (рис. 5, точка 5), где происходит формирование начальной корки отливки. Тем не менее незначительная турбулентность в этой зоне не оказывает существенного влияния на затвердевание отливки и стабильность литья из-за ее удаленности от зоны выхода отливки из кристаллизатора.

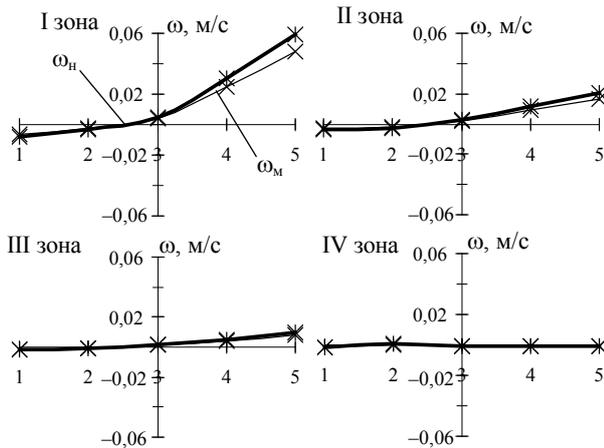
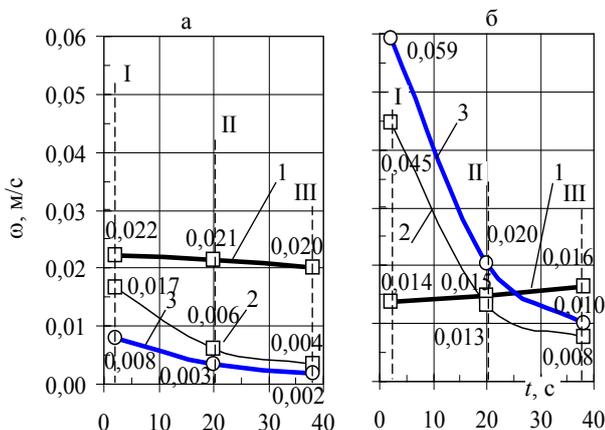


Рис. 5. Эпюры скоростей конвективных потоков (с разделительным устройством): 1, 2 – верх; 3 – средняя зона; 4, 5 – низ

Расчеты критических скоростей потоков (5), (6) и сравнение с экспериментом показали, что наиболее уязвимым местом в системе «металлоприемник – кристаллизатор», подверженным активному влиянию вынужденной конвекции, является верхняя зона кристаллизатора (рис. 6а). Интенсивность потоков определяется режимом вытяжки отливки, а также разностью температур в системе.

Рис. 6. Экспериментальные ω_n (1, 3) и расчетные



критические $\omega_{n,крит}$ (2) скорости потоков:
а – верхняя; б – нижняя зоны; □ – обычный способ;
○ – с разделительным устройством

Однако, несмотря на то, что вынужденная конвекция носит кратковременный характер, именно в этот период степень влияния потоков достаточна для оплавления корки по всему фронту затвердевания. Скорости потоков ω_n в этот момент в верхней и нижней областях кристаллизатора (зоны II–III) выше критических скоростей $\omega_{n,крит}$ в соответствующих зонах. Исключение имеет место лишь в зоне I, где скорости потоков ω_n меньше критических $\omega_{n,крит}$ и оплавления корки не происходит.

При использовании разделительного устройства влияние конвективного движения расплава на процесс формирования отливки резко меняется. Оплавление корки полностью отсутствует в верхней области кристаллизатора во всех зонах (рис. 6б), что весьма важно. Именно в верхней области кристаллизатора концентрация горячего расплава при обычном литье всегда выше, чем в нижней. А это является основной причиной подплавления корки, нарушения стабильности литья и возникновения прорывов расплава на выходе отливки из кристаллизатора.

В нижней области кристаллизатора как при обычном литье, так и в случае использования разделительного устройства в зонах I–III наблюдается незначительное оплавление корки (рис. 6б). Причиной этого являются потоки выходящего в металлоприемник более холодного расплава кристаллизатора (обычный способ литья) и достаточно мощный поток расплава ($\omega_n = 0,28$ м/с), истекающий из отверстия разделительного устройства. Однако существенно влияния на ход процесса затвердевания отливки в целом потоки не оказывают ввиду незначительного различия экспериментальных ω_n и критических $\omega_{n,крит}$ скоростей и удаленности от зоны выхода отливки из кристаллизатора.

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика оценки влияния конвективных потоков расплава на затвердевание отливки при горизонтальном непрерывном литье. Основанная на результатах исследования

теплового режима кристаллизатора, она позволяет рассчитать критические скорости потоков, достаточные для начала оплавления корки.

2. В результате исследования процесса формирования отливки методом гидротепловой аналогии удалось выявить картину конвективного движения расплава вдоль фронта затвердевания и определить реальные скорости потоков.

3. Сравнение расчетных и действительных скоростей потоков позволило определить зоны фронта затвердевания, подверженные оплавлению. Показано, что наиболее уязвимым местом в системе «металлоприемник – кристаллизатор», подверженным активному оплавлению, является верхняя зона кристаллизатора.

4. Установлено, что использование в процессе горизонтального литья разделительного устройства в значительной степени снижает влияние конвективных потоков расплава на затвердевание отливки. Оплавление корки полностью отсутствует в верхней области кристаллизатора во всех зонах, что весьма важно с точки зрения стабильности процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomson, R. Closed-hearth continuous casting. Part II. Mould billet interactions / R. Thomson, E. Ellwood // *British Foundryman*. – 1972. – Vol. 65, No. 5. – P. 186–197.
2. Вяткин, И. П. Анализ особенностей горизонтального непрерывного литья магния / И. П. Вяткин, М. В. Чухров // *Цветные металлы*. – 1976. – № 12. – С. 43–45.
3. Шатагин, О. А. Горизонтальное непрерывное литье цветных металлов и сплавов / О. А. Шатагин, В. Т. Сладкоштеев. – М.: *Металлургия*, 1974. – 176 с.
4. Исследование кинетики смещения теплового центра при горизонтальной непрерывной разливке / Л. И. Белякова [и др.] // *Черная металлургия... Известия вузов*. – 1979. – № 9. – С. 41–44.
5. Непрерывное литье чугуна / О. А. Баранов [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1968. – 335 с.
6. Жидкометаллические теплоносители / В. М. Борщанский [и др.]. – М.: *Атомиздат*, 1976. – 328 с.
7. Демченко, Е. Б. Кинетика затвердевания отливки при горизонтальном непрерывном литье / Е. Б. Демченко // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 3. – С. 28–32.
8. Демченко, Е. Б. Исследование гидродинамики расплава в кристаллизаторе при вертикальном непрерывном литье / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // *Литье и металлургия*. – 2006. – № 4. – С. 77–81.
9. Афанасьева, К. И. Моделирование разливки непрерывного литья / К. И. Афанасьева, Г. П. Иванцов // *Сталь*. – 1958. – № 7. – С. 599–603.
10. Акименко, А. Д. Особенности исследования процессов разливки жидких металлов на водяных моделях / А. Д. Акименко, А. А. Скворцов // *Теплообмен между отливкой и формой*. – 1967. – Вып. 1. – С. 42–43.
11. Влияние термоконвекции на стабильность горизонтального непрерывного литья / В. И. Тутов [и др.] // *Литейное производство*. – 1987. – № 1. – С. 21–22.
12. Стабилизация процесса горизонтального непрерывного литья / В. И. Тутов [и др.] // *Металлургия*. – 1986. – Вып. 20. – С. 70–72.
13. Устройство для горизонтального непрерывного литья заготовок сплошного сечения: пат. Респ. Беларусь № 13981 / С1 В22D 11/045, 2011 // Е. И. Марукович, Е. Б. Демченко.

Поступила 25.07.2011