

**А. С. Нурадинов, А. В. Ноговицын, И. А. Нурадинов,
И. Р. Баранов**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

Методом физического моделирования исследовано влияние формы поверхности теплообмена на интенсивность отвода тепла охлаждающей водой в кристаллизаторе МНЛЗ. Проведен теоретический анализ данного процесса для различных форм поверхности теплообмена. Проведен сравнительный анализ параметров теплообменных процессов в кристаллизаторе МНЛЗ для исследованных способов их интенсификации.

Ключевые слова: кристаллизатор МНЛЗ, охлаждающая вода, теплообмен, искусственная шероховатость, ребристая поверхность, количество тепла.

Методом фізичного моделювання досліджено вплив форми поверхні теплообміну на інтенсивність відводу тепла охолоджуючою водою в кристалізаторі МБЛЗ. Проведено теоретичний аналіз даного процесу для різних форм поверхонь теплообміну. Проведено порівняльний аналіз параметрів теплообмінних процесів в кристалізаторі МБЛЗ для досліджених способів їх інтенсифікації.

Ключові слова: кристалізатор МБЛЗ, охолоджуюча вода, теплообмін, штучна шорсткість, ребриста поверхня, кількість тепла.

The influence of the shape of the heat transfer surface on the intensity of heat removal by cooling water in crystallizer of machine of steel continuous casting (MSCS) has been studied by the method of physical modeling. The theoretical analysis of this process for various forms of heat transfer surfaces has been carried out. A comparative analysis of the parameters of heat transfer processes in crystallizer of MSCS for the studied ways of their intensification has been carried out.

Keywords: crystallizer of machine of steel continuous casting (MSCS), cooling water, heat transfer, artificial roughness, ribbed surface, the quantity of heat.

Возможность оптимизации тепловой работы кристаллизатора путем интенсификации теплообменных процессов на некоторых стадиях теплопередачи от жидкого металла к охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ авторами уже исследовано [1-4]. Данная работа посвящена разработке методов интенсификации теплоотдачи от медной стенки кристаллизатора к охлаждающей воде.

Исследования проведены на лабораторной установке, представленной на рис. 1 и состоящей из бака с мерной шкалой (1), с которого вода (теплоноситель) при помощи насоса (2) через расходомер (3) подается к кристаллизатору (4). Внутри кристаллизатора с зазором 0,5 мм от внутренней стенки установлен электрический ТЭН (5), который нагревается до температуры 815 ± 2 °С и имитирует непрерывно-литую заготовку. От кристаллизатора вода через патрубки подается обратно в бак. Скорость движения теплоносителя в закрытых каналах кристаллизатора (6) регулируется в широких пределах, меняя производительность центробежного насоса. Если расход воды в регулируемых нами пределах перевести в скорость ее движения в канале кристаллизатора, получаются значения от 0 до 6 м/с.

Изменения температуры воды в баке фиксируются двумя термомпарами (7), установленными на разных уровнях по высоте. Температуры электрического ТЭНа, внутренней и наружной поверхностей втулки кристаллизатора контролируются, со-

ответственно, термомпарами (8-9) и (10). Температуры воды на входе и выходе из кристаллизатора при необходимости фиксируются термомпарами (11-12).

Как инструмент для повышения эффективности тепловой работы кристаллизатора в данных исследованиях использованы медные втулки (1) с различной структурой поверхности, контактирующей с охлаждающей водой (рис. 1): с искусственной шероховатостью и продольными или винтообразными ребрами.

Функция искусственной шероховатости на поверхности втулки кристаллизатора

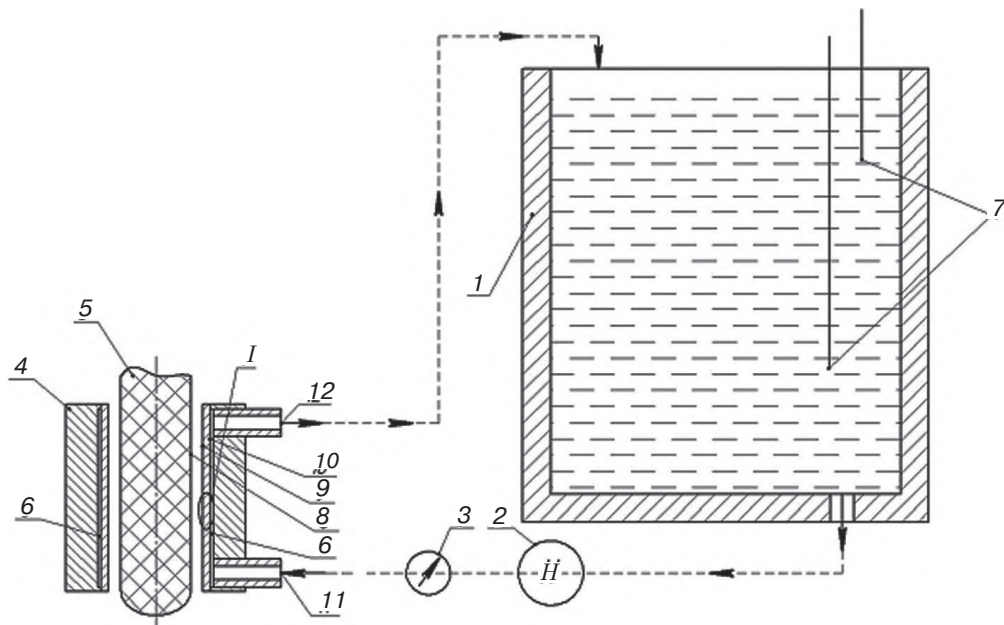


Рис. 1. Схема лабораторной установки

(в нашем случае – поперечные выступы высотой $h = 1$ мм и расстояниями между выступами $s = 13$ мм) заключается в разрушении вязкого подслоя в приграничном гидродинамическом слое набегающего потока для изменения характера движения охлаждающей воды. Продольные и винтообразные ребра на поверхностях втулок ($h = 1$ мм, шаг винта 40 мм) обеспечивают увеличение площади теплообмена.

В ходе экспериментов для всех трех типов втулок кристаллизатора прямыми замерами фиксировали значения температур нагрева воды в баке $\Delta T = T_k - T_n$ (T_k и T_n – конечная и начальная температуры воды в баке) при разных скоростях ее движения. Коэффициент теплоотдачи охлаждающей воды и количество отводимого ею тепла определяли расчетным путем.

Теоретический анализ интенсификации теплоотдачи путем применения искусственной шероховатости на поверхности теплообмена

Метод применения искусственной шероховатости основан на структурных особенностях набегающего гидродинамического слоя. Из теории пограничного слоя известно, что при набегающем потоке жидкости (газа) на гладкую поверхность на ней формируется приграничный гидродинамический слой с различной структурой по направлению течения и сечению (рис. 2) [5-8]. При малых значениях числа Рейнольдса ($Re < 2 \cdot 10^5$) режим движения жидкости в приграничном слое имеет ламинарный характер (рис. 2, область А), а при $Re \geq 2 \cdot 10^5$ – турбулентный (рис. 2, область В).

Длина перехода от ламинарного режима к турбулентному ($X_{кр.}$) тем меньше, чем больше скорость движения жидкости. Для скоростей движения воды в кристаллизаторах МНЛЗ (10-12 м/с) ламинарный слой в потоке жидкости практически отсутствует. В турбулентном слое (рис. 2, область В) всегда присутствует тонкий пристеночный вязкий подслей (рис. 2, область Л), который существенным образом влияет на теплопередачу между поверхностью и жидкостью.

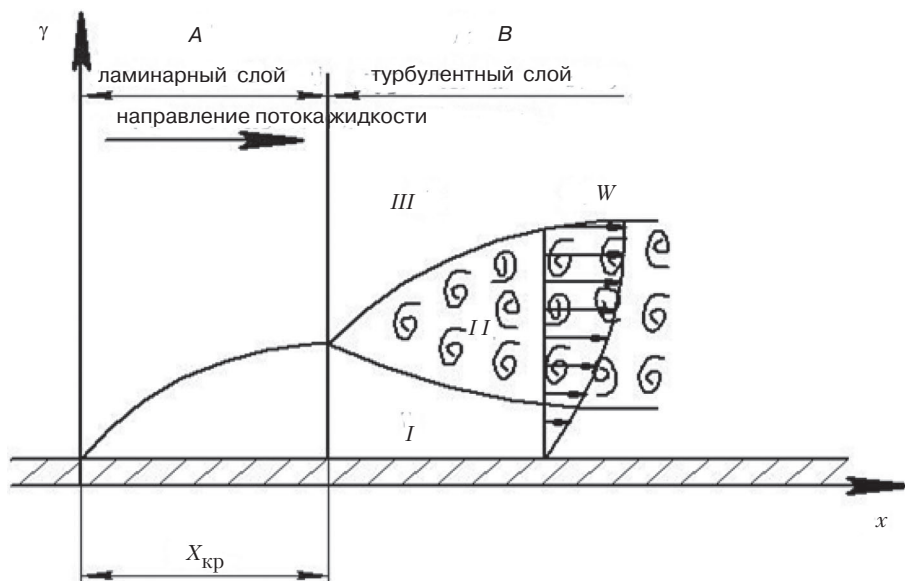


Рис. 2. Структура пограничного гидродинамического слоя

Толщину турбулентного пограничного слоя можно определить из следующей зависимости [6, 8]:

$$\delta_m = \frac{0,37 \cdot X}{Re^{0,3}}, \quad (1)$$

где X – расстояние от точки набегания потока жидкости на поверхность.

По данным различных источников толщина вязкого подслоя составляет около 0,01 части от общей толщины турбулентного слоя [5, 6, 8]. Из формулы (1) следует, что с удалением от верхней кромки кристаллизатора толщина турбулентного слоя увеличивается, соответственно, увеличивается и толщина вязкого подслоя.

Если структуру турбулентного пограничного слоя рассматривать с позиции теплообмена между поверхностью и набегающей жидкостью, то можно заключить, что в вязком подслое (рис. 2, область I) тепло передается теплопроводностью, а в турбулентном подслое (рис. 2, область II) – конвекцией. Следовательно, в общем переносе тепла лимитирующей стадией является теплопередача теплопроводностью в вязком (ламинарном) подслое. Тогда коэффициент теплоотдачи (α) от поверхности теплообмена к потоку жидкости можно определить из следующего выражения:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta_{в.п.}}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности жидкости; $\delta_{в.п.} = 0,01 \delta_m$ – толщина вязкого (ламинарного) подслоя.

Таким образом очевидно, что для усиления отвода тепла от поверхности теплообмена к набегающей жидкости необходимо разрушить вязкий подслоя или уменьшить его толщину.

Известно, что наведение искусственной шероховатости на поверхности теплообмена является эффективным способом повышения теплоотдачи в теплообменных аппаратах, применяемых в ядерной и тепловой энергетике [9-11]. При этом также установлено оптимальное соотношение расстояния между выступами и их высотой ($s/h = 13$), при котором достигается максимальная теплоотдача.

В нашем случае создание искусственной шероховатости на поверхности теплообмена заключалась в создании на поверхности втулки кристаллизатора, контактирующей с охлаждающей водой, поперечных выступов прямоугольной формы высотой $h = 1$ мм и расстоянием между ними $s = 13$ мм.

Интенсификация теплоотдачи путем увеличения площади поверхности теплообмена

В общем виде количество тепла (Q), передаваемого охлаждающей воде в кристаллизаторе МНЛЗ, можно определить по формуле [5, 6]:

$$Q = \alpha_b \cdot (T_1 - T_b) \cdot F \cdot \tau, \quad (3)$$

где α_b – коэффициент теплоотдачи воды; T_1 – температура наружной поверхности втулки кристаллизатора; T_b – средняя температура охлаждающей воды; F – площадь наружной поверхности втулки кристаллизатора; τ – время пребывания металла в кристаллизаторе.

Из формулы (3) видно, что количество передаваемого охлаждающей воде тепла (Q) можно повысить путем увеличения площади поверхности теплообмена (F), то есть не прибегая к изменению гидродинамики процесса.

Для повышения площади теплообмена на практике применяют ребристые поверхности. Рассмотрим частный случай, когда на поверхности контакта втулки кристаллизатора с охлаждающей водой установлены продольные ребра постоянного сечения. Сечение ребра имеет прямоугольную форму с высотой h_p и толщиной δ_p , расположение ребер совпадает с направлением движения воды в кристаллизаторе. В этом случае длина ребра равна высоте кристаллизатора h_k .

При такой структуре поверхности теплообмена количество отводимого тепла будет состоять из двух составляющих: тепла, отводимого с боковых поверхностей ребер (Q_6), и тепла, отводимого с гладкой части поверхности теплообмена (Q_r). Тогда общее количество тепла ($Q_{p.n.}$), отводимое с ребристой поверхности теплообмена, можно определить как сумму двух этих составляющих:

$$Q_{p.n.} = Q_6 + Q_r. \quad (4)$$

Количество тепла, отводимое с боковых поверхностей ребер (Q_6), равно [5]:

$$Q_6 = \alpha_p \cdot (T_p - T_b) \cdot F_p \cdot E \cdot \tau, \quad (5)$$

где α_p – коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности ребра; T_p – средняя температура боковой поверхности по высоте ребра; T_b – средняя температура охлаждающей воды; F_p – площадь боковых поверхностей всех ребер; E – коэффициент эффективности ребра, который может изменяться в пределах от 0 до 1 (в идеале) и определяется по формуле:

$$E = \frac{h_p}{\delta_p} \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_p \cdot \delta_p}{\lambda_p}}. \quad (6)$$

Согласно формуле (6), при постоянном значении коэффициента теплопроводности материала (λ_p) увеличение толщины ребра (δ_p) снижает коэффициент эффективности ребра, а увеличение высоты ребра (h_p) и коэффициента теплоотдачи (α_p), наоборот, повышает.

Количество тепла, отводимое с гладкой части ребристой поверхности (Q_r), равно:

$$Q_r = \alpha_r \cdot (T_r - T_b) \cdot F_r \cdot \tau, \quad (7)$$

где α_r – коэффициент теплоотдачи с гладкой части ребристой поверхности; T_r – температура гладкой части поверхности; F_r – площадь гладкой части поверхности.

Общее количество тепла, отводимое охлаждающей водой с ребристой поверхности, согласно (4), составит:

$$Q_{p.п.} = \alpha_p \cdot (T_p - T_b) \cdot F_p \cdot E \cdot \tau + \alpha_r \cdot (T_r - T_b) \cdot F_r \cdot \tau. \quad (8)$$

Выражение (8) можно упростить, приняв определенные допущения, что коэффициенты теплоотдачи с боковой и гладкой частями ребристой поверхности одинаковы и равны коэффициенту теплоотдачи охлаждающей воды, то есть $\alpha_p = \alpha_r = \alpha_b$. Кроме этого, учитывая высокую теплопроводность меди, температуры боковой и гладкой частей ребристой поверхности можно считать идентичными и равными температуре наружной поверхности втулки кристаллизатора (3), то есть $T_p = T_r = T_1$.

Тогда выражение (8) принимает следующий вид:

$$Q_{p.п.} = \alpha_p \cdot (T_1 - T_b) \cdot (F_p \cdot E + F_r) \cdot \tau. \quad (9)$$

Количество тепла, отводимое охлаждающей водой с гладкой (не ребристой) поверхности определяется по формуле (3). Разделив выражение (9) на (3) получим параметр, характеризующий степень увеличения теплоотдачи от ребристой поверхности теплообмена в сравнении с гладкой поверхностью, то есть:

$$n_Q = \frac{Q_{p.п.}}{Q} = \frac{(F_p \cdot E + F_r)}{F}. \quad (10)$$

Из выражения (10) видно, что решающее влияние на степень увеличения теплоотдачи от поверхности теплообмена к охлаждающей воде оказывает коэффициент эффективности ребра (E).

В наших экспериментах (кристаллизатор с медной втулкой) при постоянных значениях теплопроводности, высоты и толщины ребер коэффициент эффективности ребра (E) в зависимости от интенсивности теплоотвода (α_b) изменяется в пределах 0,2-0,5. Для полученных значений коэффициента эффективности ребра (E) степень увеличения теплоотдачи от ребристой поверхности теплообмена в сравнении с гладкой поверхностью (n_Q) может иметь значения 1,0-1,14, то есть в оптимальном варианте количество тепла, отводимого от поверхности с продольными ребрами, может увеличиться на 14 %.

Аналогичный теоретический анализ теплообменного процесса будет корректен и для поверхности теплообмена с винтообразными ребрами, при котором разница будет заключаться в более высоких значениях коэффициента эффективности ребра и их боковой площади.

Полученные результаты теоретического анализа теплообмена между кристаллизатором и охлаждающей водой практически подтвердились в ходе проведенных на лабораторной установке исследованиях (см. рис. 1). При этом параметры теплообмена определяли, исходя из следующих соображений. Независимо от формы поверхности теплообмена общее количество тепла, отводимое охлаждающей водой, определяли по известной формуле [11]:

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T, \quad (11)$$

где m – масса воды; C – удельная теплоемкость воды; ΔT – разность между конечной и начальной температурами воды в баке.

По общему количеству тепла, отведенному охлаждающей водой, по формулам (3) или (9) в зависимости от формы поверхности теплообмена определяли значения коэффициента теплоотдачи.

Главным параметром, по которому можно судить об эффективности тепловой работы кристаллизатора, является количество тепла, отводимое охлаждающей водой. По величине отводимого количества тепла удобно оценивать конечный результат влияния различных приемов интенсификации теплообменных процессов в кристаллизаторе (в том числе рассмотренных авторами способов).

На рис. 3 представлена зависимость количества тепла от скорости движения воды в кристаллизаторе для различных конфигураций поверхности теплообмена.

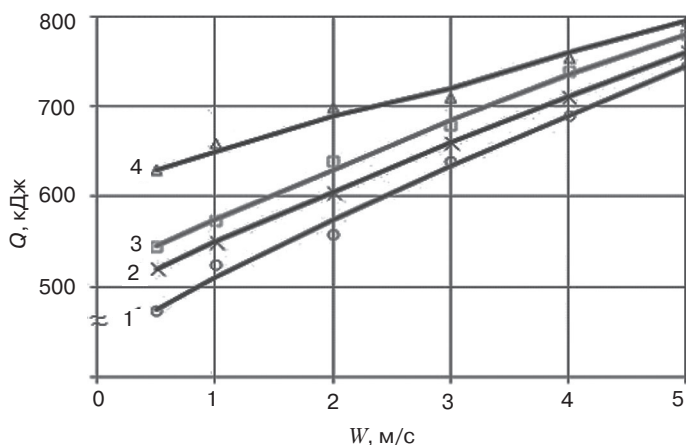


Рис. 3. Зависимость количества отводимого в кристаллизаторе тепла от скорости движения воды: 1 – стандартная гладкая втулка; 2 – втулка с продольными ребрами; 3 – втулка с винтовыми ребрами; 4 – втулка с поперечными выступами

Видно, что для всех рассмотренных вариантов интенсификации теплообменных процессов в кристаллизаторе количество отводимого тепла в той или иной степени увеличивается. Обращает на себя внимание тот факт, что степень интенсификации теплообмена для ребренных поверхностей не зависит от скорости движения воды (рис. 3, прямые 2 и 3 практически параллельны прямой 1), в то время как для поверхности с искусственной шероховатостью эта зависимость очевидна (рис. 3, прямая 4). При этом степень интенсификации теплообмена тем выше, чем ниже скорость движения воды в кристаллизаторе. Вероятно, это связано со структурой приграничного гидродинамического слоя: чем ниже скорость движения воды, тем больше толщина вязкого пристеночного подслоя и, наоборот, чем выше скорость движения воды, тем меньше толщина вязкого пристеночного подслоя. Соответственно толщине вязкого подслоя и проявляется влияние искусственной шероховатости на степень его разрушения, вследствие чего теплообмен в кристаллизаторе при разных скоростях движения воды тоже меняется аналогично.

Все полученные результаты экспериментов сведены в таблицу.

Анализ полученных результатов показывает, что исследованные методы интенсификации теплообменных процессов в кристаллизаторе МНЛЗ действительно повышают параметры теплообмена в нем. На практике главным критерием оценки эффективности тепловой работы кристаллизатора, по мнению авторов, должен быть параметр, характеризующий степень увеличения теплоотдачи от поверхности теплообмена (n_Q). В рассмотренных методах наибольшие значения этого параметра (n_Q) получены для поверхности теплообмена с искусственной шероховатостью ($n_{Q_{\max}} = 1,29$), то есть количество отводимого тепла увеличивается до 29 %, в то время как для ребристых поверхностей оно повышается максимум от 6 до 11 % в зависимости от типа ребер.

Параметры теплообмена между кристаллизатором и охлаждающей водой

W, м/с	α , Вт/м ² ·К		Q, кДж				n_Q		
	г. п.	и. ш.	г. п.	и. ш.	п. р.	в. р.	и. ш.	п. р.	в. р.
0,5	1843	2378	492,8	635,7	525,4	546,2	1,29	1,06	1,11
1,0	2463	3054	539,5	668,4	549,7	566,6	1,24	1,02	1,05
2,0	3331	4031	564,5	694,1	593,5	618,4	1,21	1,05	1,09
3,0	3987	4505	631,5	715,0	643,2	663,5	1,13	1,02	1,05
4,0	4546	4909	694,2	752,8	700,0	716,5	1,08	1,01	1,03
5,0	5052	5305	737,7	778,3	747,5	760,2	1,05	1,01	1,03

г. п. – гладкая поверхность теплообмена; и.ш. – поверхность теплообмена с искусственной шероховатостью; п.р. – поверхность теплообмена с продольными ребрами; в.р. – поверхность теплообмена с винтообразными ребрами

Таким образом, из рассмотренных приемов интенсификации теплоотвода охлаждающей водой в кристаллизаторе МНЛЗ наиболее оптимальным вариантом является метод искусственной шероховатости теплообменной поверхности. Кроме этого, втулки кристаллизатора с искусственной шероховатостью, турбулизируя вязкий пристеночный слой потока, могут снижать образование накипи на теплообменной поверхности.



Список литературы

1. Нурадинов А.С. Теплообменные процессы при формировании непрерывнолитых заготовок // Литейщик России. – 2006. – № 7. – С. 34-37.
2. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Таранов Е. Д. Теплообменные процессы при формировании НЛЗ в поле упругих колебаний // Сталь. – 2006. – № 6. – С. 51-52.
3. Эльдарханов А. С., Нурадинов А. С., Саипова Л. Х-А., Нурадинов И. А. Интенсификация теплообмена через газовый зазор в кристаллизаторе МНЛЗ // Сталь. – 2016. – № 4. – С. 8-11.
4. Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Дымнич А. Х., Ноговицын А. В., Нурадинов И. А. Способ оптимизации тепловой работы кристаллизатора МНЛЗ // Процессы литья. – 2016. – № 2. – С. 42-51.
5. Дымнич А. Х., Троянский А. А. Вопросы тепломассообмена в сталеплавильных процессах. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – 582 с.
6. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 414 с.
7. Ефимов А. А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
8. Себиси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. – М.: Мир, 1987. – 590 с.
9. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен. Учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с.
10. Научные исследования в области ядерной энергетики в технических вузах России / Под ред. В. Д. Кузнецова // Сб. науч. тр. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 280 с.
11. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. Учебник для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 472 с.



References

1. Nuradinov A. S. (2006) Teploobmennye protsessy pri formirovanii nepreryvnolytykh zagotovok [*Heat transfer processes in the formation of continuously cast billets*]. Liteyshchik Rossii, no. 7, pp. 34-37. [in Russian].
2. Nuradinov A. S., Eldarkhanov A. S., Taranov E. D. (2006) Teploobmennyye protsessy pri formirovani NLZ v pole uprugikh kolebaniy [*Heat transfer processes in the formation of cast billets in the field of elastic vibrations*]. Stal, no. 6, pp. 51-52. [in Russian].
3. Eldarkhanov A. S., Nuradinov A. S., Saipova L. H-A, Nuradinov I. A. (2016) Intensifikatsiya teploobmena cherez gazovyy zazor v kristallizatore MNLZ [*Enhancement of heat transfer through the gas gap in the mold of CCM*]. Stal, no. 4, pp. 8-11. [in Russian].
4. Nuradinov A. S., Eldarkhanov A. S., Dymnich A. H., Nogovitsin A. V., Nuradinov I. A. (2016) Sposob optimizatsii teplovyoy raboty kristallizatora MNLZ [*The method of optimizing thermal performance of CCM*]. Protsessy litya, no. 2, pp. 42-51. [in Russian].
5. Dymnich A. H., Troyanskiy A. A. (2009) Voprosy teplomassoobmena v staleplavilnykh protsessakh [*Questions heat and mass transfer in steelmaking processes*]. Donetsk: DVNZ «DonNTU», 582 p. [in Russian].
6. Kutateladze S. S. (1979) Osnovy teorii teploobmena [*Fundamentals of heat transfer theory*]. Moscow: Atomizdat, 414 p. [in Russian].
7. Efimov A. A. (1976) Razlivka i kristallizatsiya stali [*Casting of steel and crystallization*]. Moscow: Metallurgiya, 552 p. [in Russian].
8. Sebisi T., Bradshaw P. (1987) Konvektivnyy teploobmen. [*Convective heat exchange*]. Moscow: Mir, 590 p. [in Russian].
9. Tsvetkov F. F., Grigorev B. A. (2011) Teplomassoobmen. Uchebnik dlya vuzov [*Heat and Mass Transfer. Textbook for high schools*]. Moscow: Izdatelskiy dom MEI, 562 p. [in Russian].
10. Kuznetsov V. D. (1999) Nauchnyye issledovaniya v oblasti yadernoy energetiki v tekhnicheskikh vuzakh Rossii [*Scientific research in the field of nuclear power engineering in the Russian universities*]. Coll. scientific. tr. Moscow: Izdatelstvo MEI, 280 p. [in Russian].
11. Sokolov E. Y. Teplofikatsiya i teplovyye seti. Uchebnik dlya vuzov. [*District heating and heat networks. Textbook for high schools*]. Moscow: Izdatelstvo MEI, 472 p. [in Russian].

Поступила 28.02.2017