

4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М., 1967. – 600 с.

5. Спитченко Д.И., Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В., Казяев Д.М. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поковок // Сб. докладов международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 367-370.

6. Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е., Тымчак В.М. Сожигательные устройства нагревательных и термических печей. – М.: Металлургия, 1981. – 272 с.

УДК 621.746.27: 047

Т. И. Шафиков, И. М. Ячиков, М. Н. Самодурова

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет

(национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МЕДНОЙ СТЕНКИ СЛЯБОВОГО КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ ПРИ РАЗНОЙ СХЕМЕ ПОДВОДА И ОТВОДА ВОДЫ

Аннотация. *Тепловая работа слябового кристаллизатора МНЛЗ во многом определяется гидравлическими процессами в системе его охлаждения. Расход воды в каналах охлаждения, а соответственно скорость воды, определяет интенсивность теплообмена и значения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях охлаждающих каналов. Потери напора, обусловленные большими гидравлическими сопротивлениями в системе охлаждения, равно как и неудачная схема подвода и отвода воды к панелям кристаллизатора, могут привести к уменьшению давления, а значит, к снижению температуры насыщения и возникновению нежелательного местного кипения воды. В кристаллизаторе, имеющем цилиндрические или щелевые каналы для охлаждения, актуальными являются определение потерь давления на широких и узких стенках кристаллизатора и знание значений давления и скорости в каждом канале. Важным является также то, как эти показатели зависят от геометрических характеристик каналов и технологических параметров – расхода и выходного (или входного) давления воды.*

Разработана математическая модель гидравлического расчета медной стенки кристаллизатора, имеющей произвольное число горизонтальных и вертикальных каналов со сложным их соединением. Полученная в результате система нелинейных уравнений решалась итерационным методом сопряженных градиентов. Создана компьютерная программа «Кристаллизатор-гидравлика v2» в среде разработки Mathcad.

Произведено сравнение гидравлических параметров стенок кристаллизатора с различными схемами подвода и отвода воды. Созданный алгоритм и компьютерная программа может быть полезна при конструировании новых медных кристаллизаторов МНЛЗ, для поиска наиболее рациональных режимов их гидродинамической работы, для выбора схемы подвода и отвода воды в кристаллизатор, а также при реконструкции уже существующих кристаллизаторов с целью перехода от конструкции стенок со сверленными каналами к щелевым охлаждающим каналам.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, медный кристаллизатор, цилиндрические водяные каналы, щелевые водяные каналы, гидравлический напор, гидравлическая работа МНЛЗ.

Abstract. *The thermal work of the slab mold of the CCM is largely determined by the hydraulic processes in its cooling system. The water flow in the cooling channels, and, accordingly, the water velocity, determines the intensity of heat transfer and the values of the heat transfer coefficients on the surfaces of the cooling channels. Pressure losses due to high hydraulic resistances in the cooling system, as well as an unsuccessful scheme for supplying and discharging water to the mold panels, can lead to a decrease in pressure, and hence to a decrease in saturation temperature and the occurrence of undesirable local water boiling. In a mold with cylindrical or slotted channels for cooling, it is important to determine the pressure loss on the wide and narrow walls of the mold and to know the values of pressure and velocity in each channel. It is also important how these indicators depend on the geometric characteristics of the channels and technological parameters - the flow rate and the outlet (or inlet) water pressure.*

A mathematical model has been developed for the hydraulic calculation of the copper wall of the mold, which has an arbitrary number of horizontal and vertical channels with their complex connection. The resulting system of nonlinear equations was solved by the iterative method of conjugate gradients. The computer program "Crystallizer-hydraulics v2" was created in the Mathcad development environment.

A comparison of the hydraulic parameters of the mold walls with different schemes for supplying and discharging water was made. The created algorithm and computer program can be useful in the design of new CCM copper molds, to find the most rational modes of their hydrodynamic operation, to select the scheme for supplying and draining water to the mold, as well as in the reconstruction of existing molds in order to switch from the design of walls with drilled channels to slotted cooling channels.

Key words: *continuous casting machine, copper mold, cylindrical water channels, slotted water channels, hydraulic head, hydraulic operation of CCM.*

Введение

Тепловая работа слябового кристаллизатора МНЛЗ во многом определяется гидравлическими процессами, протекающими в широких и узких стенках, входящих в систему его охлаждения [1, 2]. В медных стенках кристаллизаторах с цилиндрическими или щелевыми водяными каналами основными параметрами контроля являются потери давления на широких и узких гранях стенок кристаллизатора, значения давления и скорости воды в каждом канале [3]. Также важным параметром является зависимость данных величин от геометрических характеристик каналов, технологических параметров – расхода и выходного (или входного) давления воды и схемы подвода и отвода воды в стенки кристаллизатора.

Гидравлическая система медной стенки кристаллизатора представляет собой сложное соединение горизонтальных и вертикальных каналов при разной схеме подвода и отвода воды, как это показано на рисунках 1, 2.

Гидравлический расчет вертикальной стенки кристаллизатора, имеющей произвольное число периодически повторяющихся вертикальных и горизонтальных каналов с односторонним подводом и отводом воды, показанной на рисунке 1, был рассмотрен в работах [4, 5]. Причем, в зависимости от конструкции, подача воды может осуществляться снизу или сверху через сечения 0 или 0' соответственно. Схема гидравлической работы медной стенки кристал-

лизатора при подводе воды с разных сторон, показанная на рис. 2, довольно широко используется, поэтому возникает проблема ее гидравлического расчета.

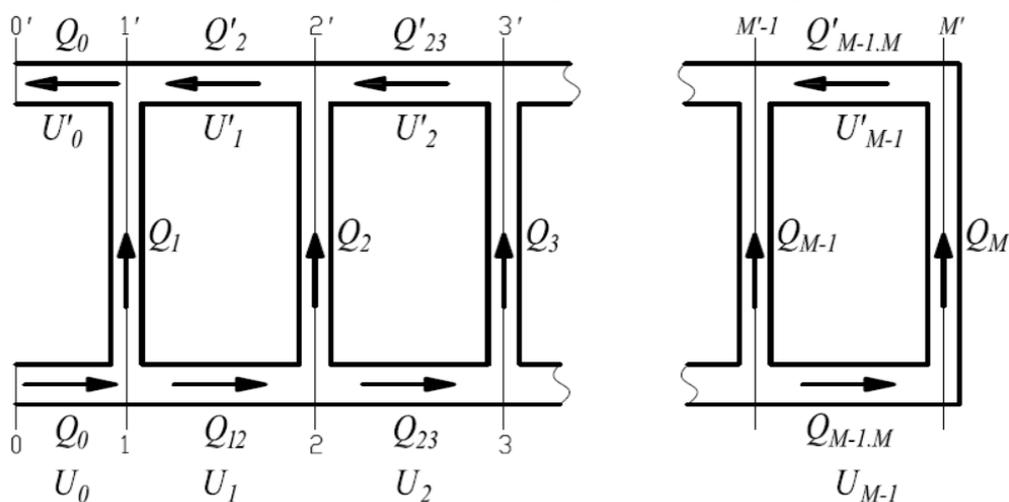


Рис. 3. Схема гидравлической работы стенки кристаллизатора с односторонним подводом и отводом воды

Целью работы является создание математической модели и алгоритма гидравлического расчета стенки кристаллизатора со сложным соединением вертикальных и горизонтальных каналов при подводе и отводе воды с разных сторон.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим вертикальную стенку кристаллизатора, на которую снизу через сечение 0 подается вода с известным расходом Q_0 (см. рис. 2), а отвод воды осуществляется через сечение M' . Рассмотрим задачу, когда известен общий расход воды Q_0 , а требуется определить расходы воды во всех вертикальных и горизонтальных каналах круглой или прямоугольной формы. Обозначим площади сечения горизонтальных и вертикальных каналов соответственно F и f . Пусть известны длины вертикального l_v и горизонтального l_r каналов, а также их диаметры – d и D соответственно. Для каналов некруглого сечения в качестве диаметра канала используется эквивалентный диаметр $d_3 = 4f_0/p$, где f_0 – площадь живого сечения, p – периметр канала.

Для произвольного количества M вертикальных каналов имеем $2M$ особых точек гидравлической системы, где наблюдаются местные сопротивления, – эти точки будем обозначать как 1, 1', 2, 2'.. M, M' (см. рис. 2).

При разработке математической модели расчета гидравлической работы кристаллизатора для определения неизвестных расходов жидкости в горизонтальных и вертикальных каналах использовались условия балансов расходов воды и гидравлических напоров.

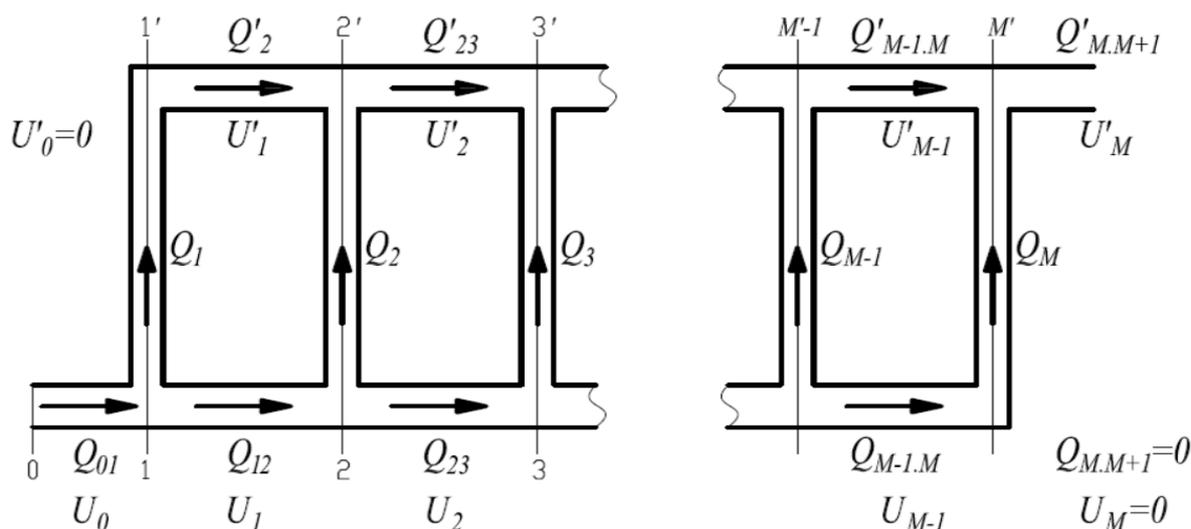


Рис. 4. Схема гидравлической работы стенки кристаллизатора при подводе воды с разных сторон

Для расчета неизвестных расходов жидкости применяли законы Кирхгофа. Для узлов $j = 1, 2, \dots, M - 1$ записываются уравнения на основе условия баланса расходов

$$Q_{j,j-1} - Q_j - Q_{j+1,j} = 0. \quad (1)$$

Введем обозначение $U_j = Q_{j+1,j}$ (причем $U_0 = Q_{01} = Q_0$; $U_M = Q_{M,M+1}$), для $M - 1$ узлов получим систему из $M - 1$ уравнений с учетом направлений, указанных на рис. 2

$$U_{j-1} - Q_j - U_j = 0, \quad (2)$$

где $j = 1, 2, \dots, M$.

Уравнение (2) можно записать как

$$Q_j = U_{j-1} - U_j. \quad (3)$$

Введем обозначение для расхода через верхние горизонтальные каналы $U'_j = Q'_{j,j+1}$ (причем $U'_0 = Q'_{0,1}$; $U'_M = Q'_{M,M+1}$), для M узлов получим систему из M уравнений с учетом указанных направлений

$$U'_{j-1} + Q_j - U'_j = 0, \quad (4)$$

где $j = 1, 2, \dots, M$.

Подставляя (2) в (4), получим соотношение, связывающее расходы через верхние и нижние горизонтальные каналы

$$U'_{j-1} - U'_j = U_j - U_{j-1}. \quad (5)$$

Рассмотрим случай, когда вода подается снизу, $U_0 = Q_0$, а отводится сверху $U'_M = Q_0$. В этом случае, используя выражение (5), можно получить

$$U'_j = Q_0 - U_j, \quad (6)$$

$$U'_0 = U'_M = 0. \quad (7)$$

Аналогичная ситуация возникнет, если подача воды осуществляется сверху, $U'_0 = Q_0$, а отводится снизу $U_M = Q_0$.

Таким образом, в системе остаются $M-1$ неизвестных U_j . Для их нахождения составляются дополнительные уравнения на основе условия баланса напоров для $M-1$ контуров. Обход контура будем производить по направлению против хода часовой стрелки. Для произвольного контура $(i) - (i+1) - (i+1)' - (i)' - (i)$ имеем с учетом заданных направлений (см. рис. 2)

$$h_n(Q_i) + h_g(U_i) + h_{\delta}(Q_{i+1}, U_i) + h_v(Q_{i+1}) + h'_{\delta}(Q_{i+1}, U_i) - h'_n(Q_{i+1}, U'_{i+1}) - h'_g(U'_1) - h'_g(Q_i, U'_i) - h_v(Q_i) - h_{\delta}(Q_i, U_{i-1}) = 0; \quad (8)$$

где $i = 1, 2, \dots, M-1$; $h_v(Q_i) = \phi l_B + Q_i^2 \left[\frac{8\lambda(Q_i)l_B}{g\pi^2 d^5} \right]$ – потери напора по длине в i -м вертикальном канале при разных способах подачи воды ($\phi=1$ при подаче воды снизу и $\phi=-1$ при подаче воды сверху); $h_g(U_i) = Q_{ij}^2 \left[\frac{8\lambda(U_i)l_T}{g\pi^2 D^5} \right]$ – потери напора по длине в i -м горизонтальном канале; $h_n, h'_n, h_{\delta}, h'_{\delta}$ – местные потери напора проходных и боковых потоков при их делении и соединении под углом 90° определялись по формулам В.П. Зубова [6–8]; λ – коэффициент гидравлического трения, определяемый по формуле А.Д. Альтшуля.

Из уравнения (1) выразим $Q_i = U_{i-1} - U_i$ и, подставив его в (8), получим

$$h_n(U_{i-1} - U_i) + h_g(U_i) + h_{\delta}(U_i - U_{i+1}, U_i) + h_v(U_i - U_{i+1}) + h'_{\delta}(U_i - U_{i+1}, U_i) - h'_n(U_i - U_{i+1}, Q_0 - U_{i+1}) - h'_g(Q_0 - U_i) - h'_{\delta}(U_{i-1} - U_i, Q_0 - U_i) - h_v(U_{i-1} - U_i) - h_{\delta}(U_{i-1} - U_i, U_{i-1}) = 0; \quad (9)$$

При известном расходе воды через медную плиту Q_0 данную систему $M-1$ нелинейных уравнений можно решить, дополнив ее условиями:

$$\begin{aligned} U_0 &= Q_0 = U'_M, \\ U_M &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученная система нелинейных уравнений (9)–(10) решалась итерационным методом сопряженных градиентов (*Conjugate Gradient*). Начальные расходы воды в горизонтальных и вертикальных каналах задавались, соответственно, как

$$\begin{aligned} U_i^0 &= Q_0 \left(1 - \frac{i}{M} \right), \\ Q_j^0 &= U_{j-1}^0 - U_j^0. \end{aligned} \quad (11)$$

Зная расходы воды во всех каналах, определялись перепады давления в отдельных точках гидравлической системы относительно входного давления (P_i и P'_i). При подаче воды снизу при заданном расходе Q_0 :

$$\begin{aligned} P_0 &= 0, \\ P'_0 &= P'_1 + \gamma(h_T(Q_0)), \quad P_1 = P_0 + \gamma(h_T(Q_0)), \\ P_k &= P_{k-1} + \gamma(h_n(Q_{k-1}) + h_T(U_{k-1})), \\ P'_k &= P'_k + \gamma(h_{\delta}(Q_k, U_{k-1}) + h_B(Q_k) + h'_{\delta}(Q_k, U_{k-1})), \end{aligned} \quad (12)$$

где $k = 2, 3, \dots, M$. Потери напора в k -м вертикальном канале определяются как $\Delta P_k = |P_k - P'_k|$.

Такой подход и итерационный алгоритм расчета позволяют без особых принципиальных изменений проводить гидравлический расчет при нижней и верхней подачах воды, задавая, в зависимости от исходных условий, расход воды или перепад давления на рассматриваемой стенке кристаллизатора.

При сравнении гидравлической работы различных вариантов стенки кристаллизатора важными являются такие характеристики, как средний и максимальный разброс скоростей (в вертикальных каналах кристаллизатора) [2]:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^M |V_i - \bar{V}|}{M\bar{V}}, \quad \delta_{\max} = \frac{\max_{i=1, \dots, M} (|V_i - \bar{V}|)}{\bar{V}}, \quad (13)$$

где $\bar{V} = \sum_{i=1}^M V_i / M$ – средняя скорость в каналах.

По разработанному алгоритму (9)–(13) создана компьютерная программа «Кристаллизатор-гидравлика v2» в среде разработки *Mathcad 14*, с интерфейсом и возможностями аналогичной программы [4]. Программа позволяет проводить гидравлический расчет медной плиты кристаллизатора с произвольным количеством каналов различной формы и размеров, имеющих последовательно-параллельное соединение. При этом пользователь может легко вводить и редактировать исходные данные. Программа позволяет получать перепад давления на стенке кристаллизатора, скорости воды в отдельных каналах и давление в его узлах, зная общий расход воды. Кроме этого, можно анализировать перепад давления от изменения различных геометрических характеристик, например от диаметров вертикальных и горизонтальных каналов. Результаты компьютерного моделирования можно получать в виде таблиц, графиков и диаграмм.

Проведены расчеты гидравлических параметров стенки кристаллизатора с четырьмя цилиндрическими или шестью прямоугольными щелевыми каналами при подводе и отводе воды «с одной стороны» и «с разных сторон». Основные геометрические параметры каналов приведены в табл. 1. При расчетах для цилиндрических каналов расход воды составил $Q_0 = 28,5 \text{ м}^3/\text{ч}$, для щелевых – $Q_0 = 9,5 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Проведено сравнение гидравлической работы стенки кристаллизатора в зависимости от направления подвода и отвода воды. На рис. 3 приведены величины потерь напора и скорости воды в каналах для варианта подвода и отвода воды, показанного на рис. 2. Аналогично на рис. 4 приведены величины потерь напора и скорости воды в каналах для варианта подвода и отвода воды, показанного на рис. 1. В этом случае расчет проводился согласно алгоритму, рассмотренному в работах [3, 4]. При сравнительных расчетах задавались одинаковые значения геометрических параметров и соответствующие расходы воды.

Таблица 1

Исходные данные для гидравлического расчета стенки кристаллизатора с каналами разной формы

Параметр	Обозначение	Единица изм.	Значение
<i>Круглые каналы</i>			
Диаметр вертикальных каналов	d	мм	20
Диаметр горизонтальных каналов	D	мм	35
Расстояние между вертикальными каналами	l_2	мм	40
Число каналов	M	~	4
<i>Прямоугольные каналы</i>			
Размеры вертикальных каналов	$a*b$	мм	6×20
Размеры горизонтальных каналов	$A*B$	мм	20×20
Расстояние между вертикальными каналами	l_2	мм	18
Число каналов	M	~	6
<i>Общие параметры</i>			
Эквивалентная шероховатость стенки медных каналов	Δ_3	мм	0,01
Высота вертикальных каналов	l_6	мм	1000

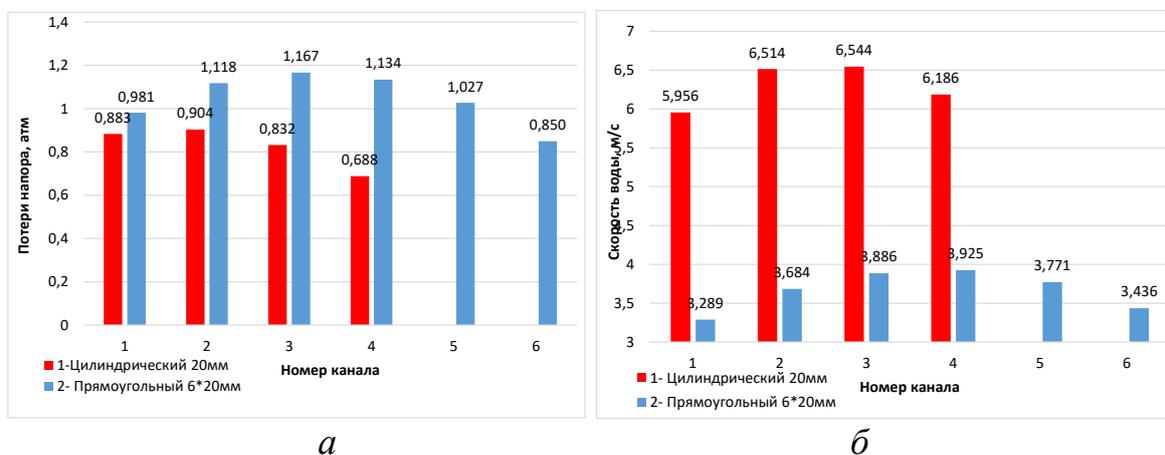


Рис. 5. Распределение потерь напора (а) и скоростей (б) течения воды по каналам различной формы в стенках кристаллизаторов для схемы подачи воды «с разных сторон»:

1 – цилиндрические каналы; 2 – фрезерованные прямоугольные каналы

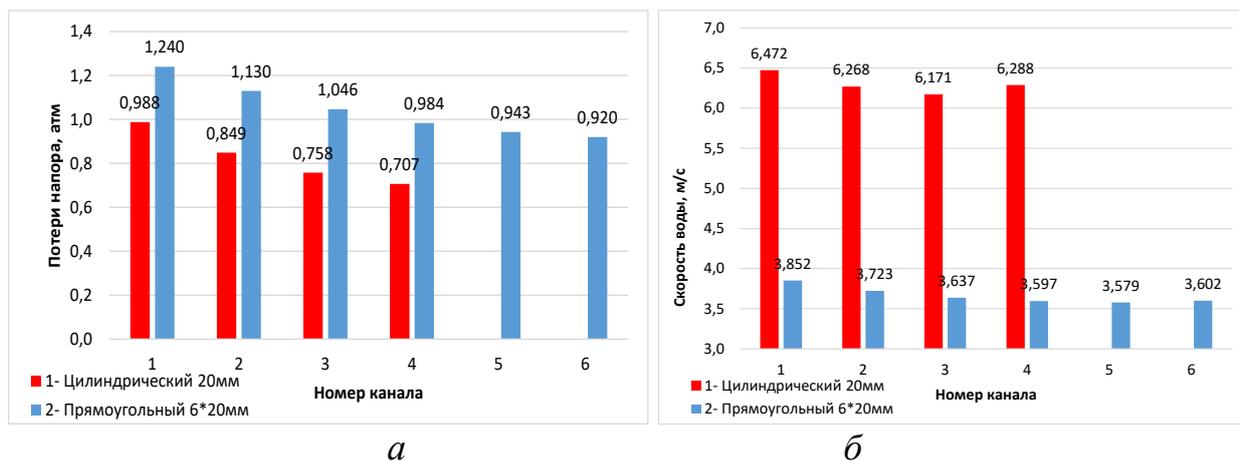


Рис. 6. Распределение потерь напора (а) и скоростей (б) течения воды по каналам различной формы в стенках кристаллизаторов для схемы подвода и отвода воды в стенку кристаллизатора «с одной стороны»:

1 – цилиндрические каналы; 2 – фрезерованные прямоугольные каналы

Значения среднего и максимального разбросов скоростей для схемы подачи воды «с разных сторон» для цилиндрических каналов равны $\delta=3,6\%$ и $\delta_{\max}=5,5\%$ соответственно, а для прямоугольных каналов данные значения равны $\delta=5,5\%$ и $\delta_{\max}=10,2\%$. Средний и максимальный разброс скоростей для схемы подачи воды «с одной стороны» для цилиндрических каналов соответственно равны $\delta=1,4\%$ и $\delta_{\max}=2,7\%$. Для прямоугольных каналов данные величины имеют значения $\delta=2,2\%$ и $\delta_{\max}=5,1\%$.

При анализе двух способов подвода и отвода воды можно сказать, что способ подвода воды с разных сторон приводит к снижению потерь напора воды, увеличению средней скорости движения воды в вертикальных каналах и одновременно к росту среднего и максимального разбросов скоростей.

Выводы

1. Разработаны математическая модель и алгоритм гидравлического расчета медной стенки кристаллизатора МНЛЗ, имеющей произвольное число горизонтальных и вертикальных каналов для схемы подвода и отвода воды «с разных сторон». Создана компьютерная программа «Кристаллизатор-гидравлика v2» в среде разработки *Mathcad*.

2. Использование компьютерного моделирования позволяет получать перепад давления на стенке кристаллизатора, скорости воды в отдельных каналах и давление в его узлах, зная общий расход воды. Кроме этого, можно анализировать перепад давления от изменения различных геометрических характеристик, например от диаметров вертикальных и горизонтальных каналов, от схемы подвода и отвода воды в кристаллизатор.

3. Созданная компьютерная программа может быть полезна при конструировании новых медных кристаллизаторов, для выбора наиболее рациональных режимов их гидродинамической работы. Компьютерное моделирование позволяет выбрать наиболее эффективное направление подвода и отвода воды, а также оценить возможности реконструкции уже существующих кристаллизато-

ров с целью перехода от конструкции медных стенок со сверленными каналами к щелевым охлаждающим каналам.

Список использованных источников

1. Ячиков И.М., Феоктистов Н.А., Савинов А.С., Шафиков Т.И., Михалкина И.В. Моделирование тепловых полей в кристаллизаторе с щелевыми каналами охлаждения // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 1 (40). – С. 12-18.
2. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Под общ. ред. Г.А. Шалаева. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.
3. Ячиков И.М., Ларина Т.П., Вдовин К.Н. Сравнение тепловой работы кристаллизаторов МНЛЗ с охлаждающими каналами различной формы // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2007. № 11. – С. 55–60.
4. Ячиков И.М., Ларина Т.П., Вдовин К.Н. Гидравлический расчет стенки кристаллизатора // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2013618853. – БПБТ. 2013. №4. – С. 199.
5. Ларина Т.П., Вдовин К.Н., Ячиков И.М. Расчет гидравлических параметров медных кристаллизаторов со сложным соединением каналов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2015; (5): 74–79.
6. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1973.
7. Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Ларина Т.П. [и др.]. Непрерывная разливка стали. Расчеты медных кристаллизаторов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014.
8. Вдовин, К.Н., Точилкин И.М., Ячиков И.М. Непрерывная разливка сталей: монография. – СПб.: Лань, 2020. – 732 с.

УДК: 669.046.414:622.355.1

Э. Г. Шафикова, Б. П. Юрьев

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ИЗВЕСТНЯКА И ИЗВЕСТИ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИХ ОБЖИГА В ШАХТНОЙ ПЕЧИ

Аннотация. С помощью разработанной методике определен удельный расход топлива на разложение карбонатов, содержащихся в известняке, который составляет основную величину в расходной части теплового баланса. С использованием существующих методов и