

DOI 10.23859/1994-0637-2017-3-78-3
УДК 62-682

© Лукин С.В., Шумова А.А., Завалина М.В.,
Шестаков Н.И., Ригин А.Н., 2017

Лукин Сергей Владимирович

Доктор технических наук, профессор,
Вологодский государственный университет
(Вологда, Россия)
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Lukin Sergey Vladimirovich

Doctor of Sciences (Technology),
professor, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Шумова Анастасия Алексеевна

Студент, Вологодский государственный
университет (Вологда, Россия)
E-mail: nastasya.shumova@mail.ru

Shumova Anastasya Alexevna

Student, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: nastasya.shumova@mail.ru

Завалина Марина Викторовна

Студент, Вологодский государственный
университет (Вологда, Россия)
E-mail: marishzava@mail.ru

Zavalina Marina Viktorovna

Student, Vologda State University
(Vologda, Russia)
E-mail: marishzava@mail.ru

Шестаков Николай Иванович

Доктор технических наук, профессор,
Череповецкий государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: shestakovni@chsu.ru

Shestakov Nikolay Ivanovich

Doctor of Sciences (Technology), professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: shestakovni@chsu.ru

Ригин Александр Николаевич

Кандидат экономических наук, генеральный
директор ООО «Научно-производственное
предприятие «Свет» (Череповец, Россия)
E-mail: rigin@inbox.ru

Rigin Alexander Nikolaevich

PhD (Engineering), CEO of ООО «Research and
Development Enterprise «Light»
(Cherepovets, Russia)
E-mail: rigin@inbox.ru

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ,
ОТВОДИМОЙ ОТ СТАЛЬНЫХ
СЛЯБОВ КРИСТАЛЛИЗАТОРАМИ
И РОЛИКАМИ МАШИН
НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ
ЗАГОТОВОК, В СИСТЕМЕ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
ПРЕДПРИЯТИЯ**

**USING THE HEAT TAKEN FROM
STEEL SLABS BY MOLDS
AND ROLLS OF CONTINUOUS
CASTING MACHINES IN THE HEAT
SUPPLY SYSTEM OF THE
METALLURGICAL PLANT**

Аннотация. В статье рассмотрен метод использования теплоты, отводимой от стальных слабов кристаллизаторами и роликами машин непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения металлургического предприятия, включающей водогрейную котельную. Рассмотрены тепловые характеристики промежуточных теплообменников, в которых охлаждается химически очищенная вода, нагретая в кристаллизаторах и роликах,

Abstract. The article considers the method of using the heat taken from steel slabs by molds and rolls of continuous casting machine in the heat supply system of metallurgical facility, including hot water boiler plant. Thermal characteristics of intermediary heat-exchangers in which chemically cleaned water, heated in the molds and rolls, is cooled, and heating-system water is heated are also considered. It is shown that applying this method in metallurgical faci-

и нагревается вода, циркулирующая в тепловой сети. Показано, что использование данного метода на предприятии, где применяется непрерывная разливка стали, позволяет достигнуть значительного энергетического, экологического и экономического эффекта.

ty using continuous steel casting allows to gain significant energy, ecology and economy effects.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, кристаллизатор, ролики, система теплоснабжения

Keywords: continuous casting machine, mold, rolls, slab, heat supply system

Введение

В настоящее время жидкая сталь, получаемая в конверторах или электродуговых печах, разливается на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). МНЛЗ является современным высокотемпературным металлургическим агрегатом, в котором температура жидкой стали, подаваемой в кристаллизатор МНЛЗ, составляет примерно 1550 °С. Основная технологическая задача МНЛЗ – превратить жидкую сталь в твердую заготовку правильной формы, для чего нужно отвести от металла значительное количество теплоты. Так, на пяти слабовых криволинейных МНЛЗ ЧерМК ПАО «Северсталь» разливается примерно 10 млн т стали в год. Количество теплоты, поступающее с жидкой сталью в кристаллизаторы МНЛЗ в единицу времени, в среднем составляет 1500 ГДж/ч, или 1,3 ГДж на 1 т жидкой стали. Примерно треть поступившей теплоты отводится в системе охлаждения МНЛЗ и далее теряется в окружающей среде. Использование даже части этой теплоты, например, в системе теплоснабжения предприятия, может дать значительный энергетический, экологический и экономический эффекты [1].

Основная часть

Исследование теплового баланса криволинейной машины непрерывного литья заготовок показало, что при увеличении скорости разливки v возрастает доля теплоты, отводимой из МНЛЗ со слабом ($q_{\text{сляб}}$), и уменьшается доля теплоты, отводимой в системе охлаждения МНЛЗ ($q_{\text{охл}}$) [2]. При скорости разливки $v = 0,5$ м/мин. величины $q_{\text{сляб}}$ и $q_{\text{охл}}$ примерно равны, т.е. в системе охлаждения МНЛЗ отводится примерно половина всей теплоты, поступающей с жидкой сталью в кристаллизаторы МНЛЗ. На современных слабовых МНЛЗ применяются скорости разливки 1,0÷1,4 м/мин. Так, при средней скорости 1,2 м/мин. в системе охлаждения отводится около $q_{\text{охл}} = 37$ % теплоты жидкой стали, при этом кристаллизаторами отводится 5 % теплоты жидкой стали, роликами – 11 %, паровоздушной смесью – 17 %, неиспарившейся водой – 4 % [2]. Применительно к ЧерМК на пяти слабовых МНЛЗ в кристаллизаторах и роликах в среднем отводится 240 ГДж/ч низкопотенциальной теплоты.

Вся теплота, отводимая в системе охлаждения МНЛЗ, в настоящее время теряется в окружающей среде. Наиболее просто, т.е. с наименьшими дополнительными капитальными затратами, можно использовать теплоту, отводимую кристаллизаторами и роликами, которые на современных МНЛЗ охлаждаются химически очищенной водой по схеме, показанной на рис. 1.

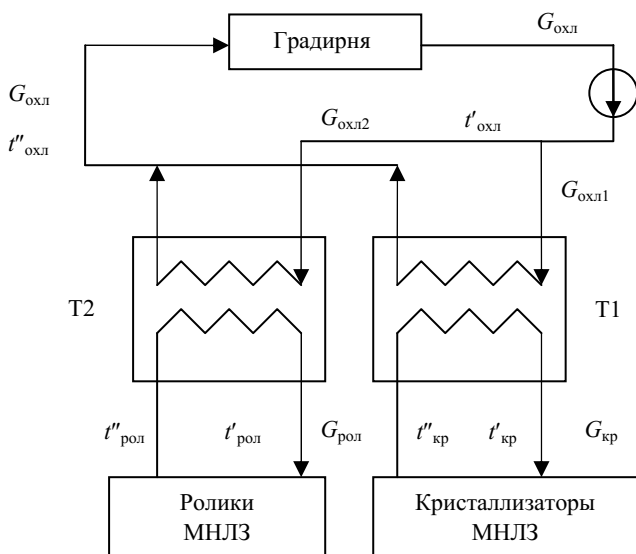


Рис. 1. Схема охлаждения оборудования МНЛЗ химочищенной водой

В схеме на рис. 1 охлаждающая техническая вода с расходом $G_{\text{охл}}$ и температурой $t'_{\text{охл}}$ поступает с градирни и разделяется на два потока. Один поток с расходом $G_{\text{охл1}}$ направляется в поверхностные водоводяные теплообменники Т1, где нагревается, одновременно охлаждая химически очищенную воду с расходом $G_{\text{кр}}$, нагретую в кристаллизаторах МНЛЗ от температуры $t''_{\text{кр}}$ до $t'_{\text{кр}}$. Другой поток, с расходом $G_{\text{охл2}}$, направляется в поверхностные водоводяные теплообменники Т2, где также нагревается, одновременно охлаждая химически очищенную воду с расходом $G_{\text{рол}}$, нагретую в роликах МНЛЗ от температуры $t''_{\text{рол}}$ до $t'_{\text{рол}}$. Нагретые потоки $G_{\text{охл1}}$ и $G_{\text{охл2}}$ смешиваются, и суммарный поток с расходом $G_{\text{охл}}$ и температурой $t'_{\text{охл}}$ направляется для охлаждения в градирню. В данной схеме вся теплота, отводимая с охлаждающей водой в роликах и кристаллизаторе, сбрасывается в градирне.

Хотя теоретически МНЛЗ должны работать непрерывно и равномерно, на практике МНЛЗ приходится иногда останавливать, например, когда изменяют сечение разливаемых слябов. Также при переходных режимах разливки скорость вытягивания слябов может значительно изменяться. Все это приводит к тому, что выход теплоты от кристаллизаторов и роликов МНЛЗ не остается постоянным, а может снижаться или увеличиваться, иногда значительно, относительно его среднего выхода. Поскольку в кристаллизаторах и роликах охлаждающую химически очищенную воду можно нагреть до температуры, как правило, не выше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3], то наилучшее использование теплоты, отводимой кристаллизаторами и роликами, – это подогрев сетевой воды, используемой для отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и кондиционирования промышленных и коммунально-бытовых потребителей. Известно, что отопительная и вентиляционная тепловая нагрузка отличается большой сезонной неравномерностью, а нагрузка на горячее водоснабжение – суточной неравномерностью [4].

В связи с неравномерным выходом теплоты от МНЛЗ, а также неравномерной тепловой нагрузкой, наиболее удобной схемой, позволяющей использовать теплоту, отводимую кристаллизаторами и роликами, является схема, показанная на рис. 2.

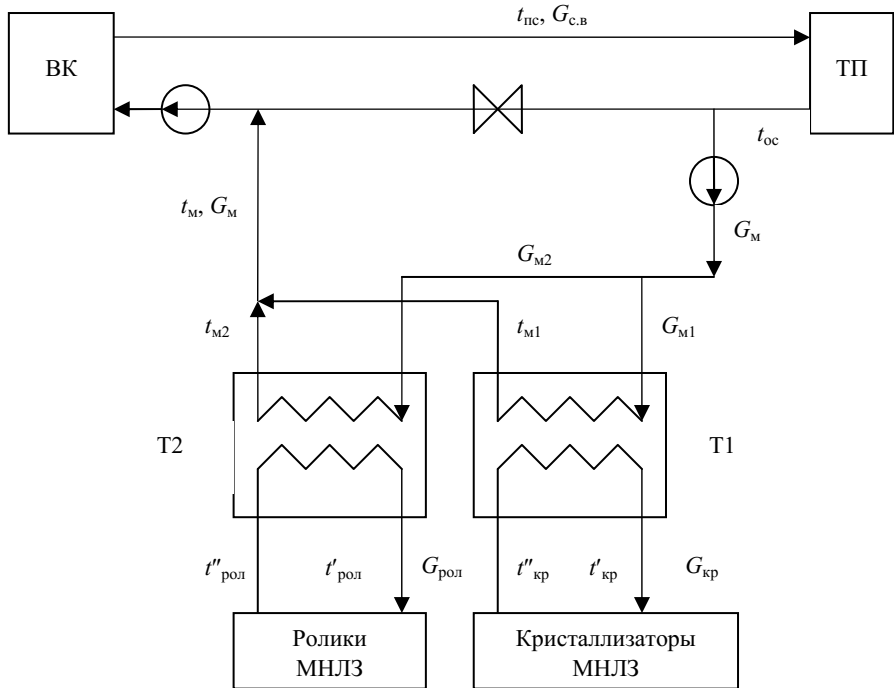


Рис. 2. Схема использования теплоты, отводимой в кристаллизаторах и роликах МНЛЗ

В схеме на рис. 2 от водогрейной котельной (ВК) к тепловым потребителям (ТП) по прямому теплопроводу подается прямая сетевая вода с расходом $G_{с.в.}$ и температурой $t_{пс}$. Значение температуры $t_{пс}$ существенно зависит от температуры наружного воздуха и температурного графика, по которому работает тепловая сеть [4]. Как правило, для целей горячего водоснабжения величина $t_{пс}$ не должна быть ниже $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальное значение температуры $t_{пс}$ обычно составляет $130\div 150\text{ }^{\circ}\text{C}$. От тепловых потребителей обратная сетевая вода возвращается по обратному теплопроводу с температурой $t_{ос}$, значение которой также зависит от температуры наружного воздуха. Максимальное значение температуры $t_{ос}$, обычно не превышает $50\div 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4].

Если расход сетевой воды $G_{с.в.}$ не превышает суммарного расхода охлаждающей воды $G_{охл}$ на кристаллизаторы и ролики всех МНЛЗ при обычной схеме охлаждения, то вся обратная сетевая вода в количестве $G_M = G_{с.в.}$ направляется в промежуточные теплообменники МНЛЗ, включенные параллельно: поток сетевой воды с расходом G_{M1} проходит теплообменники Т1, входящие в контур охлаждения кристаллизаторов, поток сетевой воды с расходом G_{M2} проходит через теплообменники Т2, входящие в контур охлаждения роликов. Затем потоки G_{M1} и G_{M2} смешиваются, и получается общий поток сетевой воды с расходом G_M и температурой t_M , которая по условиям нормальной работы оборудования не должна превышать $95\div 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Подогретая в теплообменниках сетевая вода направляется в водогрейную котельную, где нагревается до нужной температуры $t_{пс}$.

Если расход сетевой воды $G_{с.в.}$ превышает суммарный расход охлаждающей воды $G_{охл}$ на кристаллизаторы и ролики всех МНЛЗ при обычной схеме охлаждения, то

расход сетевой воды G_m , направляемый для подогрева в теплообменники МНЛЗ, следует принимать равным $G_{охл}$, т.е. $G_m = G_{охл}$, чтобы обеспечить нормальный гидравлический режим работы теплообменников. При этом часть обратной сетевой воды в количестве $G_{с.в.} - G_m$ возвращается на котельную, минуя теплообменники МНЛЗ.

Рассмотрим тепловую работу промежуточных теплообменников Т1 и Т2, показанных на рис. 2, от которых зависит надежность работы оборудования МНЛЗ. Обратная сетевая вода в количестве G_m (для данной МНЛЗ) с температурой $t_{о.с.}$ направляется в промежуточные теплообменники МНЛЗ, включенные параллельно: поток сетевой воды с расходом $G_{м1}$ проходит теплообменник Т1, входящий в контур охлаждения кристаллизатора, поток сетевой воды с расходом $G_{м2}$ проходит через теплообменник Т2, входящий в контур охлаждения роликов. Затем потоки $G_{м1}$ и $G_{м2}$ смешиваются, и получается общий поток сетевой воды с расходом G_m и температурой t_m . Химочищенная вода с расходом $G_{кр}$, охлаждающая кристаллизатор, нагревается в кристаллизаторе от температуры $t'_{кр}$ до $t''_{кр}$, и соответственно, охлаждается в теплообменнике Т1 от $t''_{кр}$ до $t'_{кр}$. Химочищенная вода с расходом $G_{рол}$, охлаждающая ролики, нагревается в роликах от температуры $t'_{рол}$ до $t''_{рол}$ и охлаждается в теплообменнике Т2 от $t''_{рол}$ до $t'_{рол}$.

Температуры химочищенной воды на выходе из кристаллизатора и роликов будут зависеть от температуры обратной сетевой воды $t_{о.с.}$, от соотношения расходов первичного и вторичного теплоносителей, и от эффективности теплопередачи в теплообменниках. По условиям нормальной работы оборудования МНЛЗ температуры $t''_{кр}$ и $t''_{рол}$ не должны превышать $100 \div 110$ °С.

Отметим, что тепловые потоки, отводимые в кристаллизаторе $Q_{кр}$ и роликах $Q_{рол}$, практически не зависят от температур охлаждающей воды, а зависят, главным образом, от скорости разлики и сечения разливаемого сляба [2]: $Q_{кр} = Q_{кр}(v, P)$; $Q_{рол} = Q_{рол}(v, P)$, где v – скорость разлики; P – периметр сляба.

Уравнения теплового баланса для кристаллизатора и роликов имеют вид:

$$Q_{кр} = W_{кр} \cdot \delta t_{кр}; \quad Q_{рол} = W_{рол} \cdot \delta t_{рол}, \quad (1)$$

где $W_{кр} = c_v \cdot G_{кр}$; $W_{рол} = c_v \cdot G_{рол}$ – водяные эквиваленты для воды, охлаждающей кристаллизатор и ролики; $c_v \cong 4,19$ кДж/(кг·К) – теплоемкость воды; $\delta t_{кр}$, $\delta t_{рол}$ – повышение температуры охлаждающей воды в кристаллизаторе и роликах:

$$\delta t_{кр} = t''_{кр} - t'_{кр}; \quad \delta t_{рол} = t''_{рол} - t'_{рол}.$$

Обычно в кристаллизаторе повышение температуры воды составляет $\delta t_{кр} = 5 \div 10$ °С; в роликах $\delta t_{рол} = 15 \div 20$ °С [2]. Поскольку в предлагаемой схеме утилизации теплоты, показанной на рис. 2, массовые расходы $G_{кр}$ и $G_{рол}$ остаются прежними, то повышение температуры воды в кристаллизаторе $\delta t_{кр}$ и роликах $\delta t_{рол}$ при тех же условиях не изменится.

Рассмотрим изменение температур греющей и нагреваемой воды в противоточных теплообменниках Т1 и Т2. Сетевая вода с расходом $G_{м1}$ нагревается в Т1 от температуры $t_{о.с.}$ до $t_{м1}$. Максимальная разность температур в теплообменнике равна разности температуры воды на выходе из кристаллизатора и температуры обратной сетевой воды:

$$\Delta t_{max1} = t''_{кр} - t_{о.с.}$$

Сетевая вода с расходом $G_{м2}$ нагревается в Т2 от температуры $t_{о.с}$ до $t_{м2}$. Максимальная разность температур в теплообменнике равна разности температуры воды на выходе из роликов и температуры обратной сетевой воды:

$$\Delta t_{\max 2} = t''_{\text{рол}} - t_{о.с}.$$

Тепловой поток, передаваемый от греющего к нагреваемому теплоносителю в поверхностном теплообменнике, можно определить по выражению [4]:

$$Q = \varepsilon \cdot \Delta t_{\max} \cdot W_{\min}, \quad (2)$$

где ε – коэффициент эффективности теплообменника; $\Delta t_{\max}$ – максимальная разность температур в теплообменнике; $W_{\min}$ – наименьший из двух водяных эквивалентов греющего и нагреваемого теплоносителей.

Тепловые потоки $Q_{кр}$ и $Q_{рол}$, отводимые в кристаллизаторе и роликах и определяемые выражениями (1), равны тепловым потокам Q_1 и Q_2 , отводимым в теплообменниках Т1 и Т2, и их можно считать известными, а неизвестной является величина $\Delta t_{\max}$, которую можно выразить из (2):

$$\Delta t_{\max} = Q / (\varepsilon \cdot W_{\min}), \quad (3)$$

где в качестве величины Q могут выступать величины $Q_1 = Q_{кр}$ или $Q_2 = Q_{рол}$.

Коэффициент эффективности ε для противоточных водоводяных теплообменников при различных режимах работы можно определить по формуле [4]:

$$\varepsilon = \left(0,35 \cdot W_{\min} / W_{\max} + 0,65 + (1/\Phi) \sqrt{W_{\min} / W_{\max}} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где $W_{\max}$ – наибольший из двух водяных эквивалентов теплоносителей; Φ – параметр теплообменника, который при неизменном качестве поверхности нагрева остается постоянным в широком диапазоне изменения расходов теплоносителей. Величина Φ определяется выражением [4]:

$$\Phi = k \cdot F / \sqrt{W_{\min} \cdot W_{\max}} = \sqrt{\delta t_{\min} \cdot \delta t_{\max}} / \Delta t_{ср}, \quad (5)$$

где k – коэффициент теплопередачи в теплообменнике при данных $W_{\min}$ и $W_{\max}$; F – площадь поверхности нагрева теплообменника; $\Delta t_{ср}$ – среднелогарифмический температурный напор в теплообменнике; $\delta t_{\min}$ и $\delta t_{\max}$ – наименьшее и наибольшее изменения температур теплоносителей, определяемые из соотношения:

$$Q = W_{\min} \cdot \delta t_{\max} = W_{\max} \cdot \delta t_{\min}. \quad (6)$$

Для всех типов секционных водоводяных теплообменников с чистой поверхностью нагрева величина $\Phi = \Phi_y \cdot l$, где $\Phi_y = 0,1 \text{ 1/м}$, l – длина подогревателя, м. Для пластинчатых подогревателей можно принимать одно и то же значение удельного параметра одного канала $\Phi_y = 1 \text{ 1/м}$ [4]. При загрязнении поверхности нагрева вели-

чина Φ снижается, и ее нужно определять экспериментально, например, используя выражение (5).

Рассмотрим случай, когда водяной эквивалент первичного (греющего) теплоносителя W_{Π} больше, чем у вторичного (нагреваемого) $W_{\text{в}}$, т.е. $W_{\Pi} = W_{\text{max}}$, $W_{\text{в}} = W_{\text{min}}$. С учетом (6) и (3) можно получить:

$$\Delta t_{\text{max}} / \delta t_{\Pi} = (1/\varepsilon) \cdot W_{\text{max}} / W_{\text{min}}, \quad W_{\Pi} > W_{\text{в}}, \quad (7)$$

где δt_{Π} – изменение температуры первичного теплоносителя (химически очищенной воды, нагретой в кристаллизаторе или роликах).

В случае, если $W_{\Pi} < W_{\text{в}}$, т.е. $W_{\Pi} = W_{\text{min}}$, $W_{\text{в}} = W_{\text{max}}$, тогда с учетом (6) и (3) получим:

$$\Delta t_{\text{max}} / \delta t_{\Pi} = 1/\varepsilon, \quad W_{\Pi} \leq W_{\text{в}}. \quad (8)$$

Поскольку величина ε зависит от отношения $W_{\text{min}}/W_{\text{max}}$, а отношение водяных эквивалентов первичного и вторичного теплоносителя для водоводяных теплообменников можно представить как $W_{\Pi}/W_{\text{в}} = G_{\Pi}/G_{\text{в}}$, то из выражений (7) и (8) следует, что отношение $\Delta t_{\text{max}}/\delta t_{\Pi}$ является функцией отношения $G_{\Pi}/G_{\text{в}}$ и параметра Φ теплообменника.

Так, на рис. 3 показана зависимость $\Delta t_{\text{max}}/\delta t_{\Pi}$ от $G_{\Pi}/G_{\text{в}}$, рассчитанная по выражениям (4), (7) и (8) для трех значений параметра $\Phi = 0,7; 1; 2$. Из рис. 3 следует, что чем больше отношение $G_{\Pi}/G_{\text{в}}$ и меньше параметр Φ , тем больше отношение $\Delta t_{\text{max}}/\delta t_{\Pi}$, и тем в более тяжелых температурных условиях находится оборудование МНЛЗ.

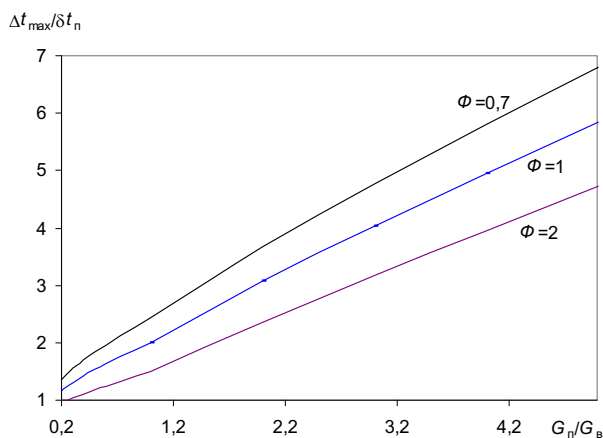


Рис. 3. Зависимость $\Delta t_{\text{max}}/\delta t_{\Pi}$ от $G_{\Pi}/G_{\text{в}}$

Зная отношение $\Delta t_{\text{max}}/\delta t_{\Pi}$, повышение температуры первичного теплоносителя δt_{Π} в оборудовании (кристаллизаторе, роликах) и температуру обратной сетевой воды $t_{\text{o.с.}}$, можно определить максимальную температуру первичного теплоносителя t'_{Π} по выражению:

$$t''_{\pi} = t_{o.c} + (\Delta t_{\max} / \delta t_{\pi}) \cdot \delta t_{\pi}. \quad (9)$$

Пусть, например, максимальный нагрев химочищенной воды в кристаллизаторе составляет $\delta t_{\text{кр}} = 10^{\circ}\text{C}$, температура обратной сетевой воды $t_{o.c} = 70^{\circ}\text{C}$, тогда при параметре $\Phi = 1$ и равенстве расходов воды, охлаждающей кристаллизатор и теплообменник Т1, т.е. при $G_{\pi}/G_{\text{в}} = 1$, из рис. 3 получаем $\Delta t_{\max} / \delta t_{\pi} = 2$, а из формулы (9), где $\delta t_{\pi} = \delta t_{\text{кр}}$, получаем максимальную температуру воды на выходе из кристаллизатора $t''_{\text{кр}} = 70 + 2 \cdot 10 = 90^{\circ}\text{C}$.

Максимальный нагрев химочищенной воды в роликах обычно не превышает $\delta t_{\pi} = 20^{\circ}\text{C}$; при $t_{o.c} = 70^{\circ}\text{C}$, $\Phi = 1$ и $G_{\pi}/G_{\text{в}} = 1$ максимальная температура воды, нагретой в роликах, составит $t''_{\text{рол}} = 110^{\circ}\text{C}$.

В рассмотренных примерах максимальная температура воды, нагретой в оборудовании, не превышает допустимой температуры 110°C . Поскольку максимальная температура $t_{o.c}$ обратной сетевой воды при температурном графике $70 \div 130^{\circ}\text{C}$ не превышает 70°C , то отношение $G_{\pi}/G_{\text{в}} = 1$ можно считать максимально допустимым для кристаллизатора или роликов при данных условиях. С учетом возможного загрязнения поверхности нагрева теплообменника соотношение $G_{\pi}/G_{\text{в}}$ должно быть меньше единицы. В общем случае допустимое отношение $G_{\pi}/G_{\text{в}}$, которое необходимо для нормальной работы оборудования МНЛЗ, зависит от максимальной температуры обратной сетевой воды $t_{o.c}$, от максимального нагрева воды δt_{π} в оборудовании, и от параметра Φ теплообменника.

Подогрев сетевой воды в теплообменнике определяется по выражению:

$$\delta t_{\text{в}} = \delta t_{\pi} \cdot G_{\pi} / G_{\text{в}}. \quad (10)$$

Например, при $G_{\pi}/G_{\text{в}} = 5$ и $\delta t_{\pi} = 10^{\circ}\text{C}$, подогрев сетевой воды составит $\delta t_{\text{в}} = 50^{\circ}\text{C}$, а при $G_{\pi}/G_{\text{в}} = 1$ будет $\delta t_{\text{в}} = 10^{\circ}\text{C}$.

Суммарный подогрев сетевой воды в промежуточных теплообменниках МНЛЗ определяется выражением:

$$\delta t_{\text{м}} = (\delta t_{\text{кр}} \cdot G_{\text{кр}} + \delta t_{\text{рол}} \cdot G_{\text{рол}}) / G_{\text{м}},$$

где $G_{\text{м}} = G_{\text{м1}} + G_{\text{м2}}$.

Температура сетевой воды $t_{\text{м}}$, получаемой при смешении воды, подогретой в теплообменниках Т1 и Т2 на схеме рис. 2, равна:

$$t_{\text{м}} = t_{o.c} + \delta t_{\text{м}}. \quad (11)$$

Величина $t_{\text{м}}$, определяемая выражением (11), может относиться к одной МНЛЗ, если величины $G_{\text{м}}$, $G_{\text{кр}}$ и $G_{\text{рол}}$ относятся к одной МНЛЗ, либо это температура сетевой воды, идущей на котельную после всех МНЛЗ, тогда $G_{\text{м}}$, $G_{\text{кр}}$ и $G_{\text{рол}}$ – суммарные расходы воды для всех МНЛЗ.

При использовании теплоты, отводимой в промежуточных теплообменниках МНЛЗ по схеме, показанной на рис. 2, достигается прямая экономия топлива, сжигаемого на водогрейной котельной. Если провести расчеты на 1 т разливаемой стали, то получают следующие примерные цифры:

- в промежуточных теплообменниках, охлаждающих кристаллизатор и ролики МНЛЗ, отводится примерно 0,2 ГДж теплоты на 1 т разлитой стали;
- при использовании теплоты, отводимой в промежуточных теплообменниках МНЛЗ, экономия условного топлива в водогрейной котельной составит приблизительно 5 кг у.т. на 1 т разлитой жидкой стали;
- при стоимости природного газа 3,5 руб./м³ экономия денежных средств составит 15 руб. на 1 т разлитой жидкой стали;
- уменьшение выбросов CO₂ в атмосферу составит 12 кг на 1 т стали (при условии, что водогрейная котельная работает на природном газе).

Капитальные затраты на реализацию мероприятия по использованию теплоты, отводимой в промежуточных теплообменниках МНЛЗ, являются не очень значительными, так как промежуточные теплообменники для охлаждения химочищенной воды, нагретой в кристаллизаторе и роликах, на большинстве МНЛЗ уже имеются, а другие МНЛЗ планируют перевести на охлаждение химочищенной водой. Требуется проложить лишь дополнительный участок тепловой сети, связывающий сталеразливочный цех с водогрейной котельной или заводской ТЭЦ.

Выводы

В статье рассмотрена схема, позволяющая использовать для нужд отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и кондиционирования в системе теплоснабжения предприятия теплоту, отводимую кристаллизаторами и роликами машин непрерывного литья заготовок.

Также рассмотрены тепловые характеристики промежуточных теплообменников, в которых охлаждается химически очищенная вода, нагретая в роликах и кристаллизаторах МНЛЗ, и подогревается обратная сетевая вода. Используя данные характеристики, можно выбрать рациональные расходы сетевой воды, проходящей через данные теплообменники, при которых обеспечивается надежная тепловая работа оборудования МНЛЗ.

Приведены удельные (на 1 т разливаемой стали) энергетические, экономические и экологические показатели, достигаемые при использовании теплоты, отводимой кристаллизаторами и роликами МНЛЗ.

Литература

1. Лукин С.В., Кибардин А.Н., Мухин В.В. Утилизация низкопотенциальной теплоты в системе охлаждения машины непрерывного литья заготовок // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. № 2 (38). Т. 1. С. 11–14.
2. Лукин С.В., Кочкин А.А., Кибардин А.Н. Исследование теплового баланса криволинейной машины непрерывного литья заготовок // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. № 3 (64). С. 29 – 32.
3. Лукин С.В., Поселожный Д.В., Кибардин А.Н. Использование теплоты охлаждения стали, разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 7 – 9.
4. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М., 2001. 472 с.

References

1. Lukin S.V., Kibardin A.N., Muchin V.V. Utilizatsiia nizkopotentsial'noi teploty v sisteme okhlazhdeniia mashiny nepreryvnogo lit'ia zagotovok [Utilization of low potential heat in the cooling system of continuous casting machine]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves state university bulletin], 2012, no. 2. pp. 11–14.

2. Lukin S.V., Kochkin A.A., Kibardin A.N. Isledovanie teplovogo balansa krivolineynoi mashiny nepreryvnogo litia zagotovok [The studying of heat balance of the curved continuous casting machine]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves state university bulletin], 2015, no. 3, pp. 29–32.
3. Lukin S.V., Poseluznyi D.V., Kibardin A.N. Ispolzovanie teploty ochlazdeniia stali, razlivaemoi na mashinah nepreryvnogo litia zagotovok, v sisteme teplosnabzheniia predpriiatiia [Utilization of cooling heat of steel cast on continuous casting machines in the heat supply system of the plant]. *Promyshlennaiia energetika* [Industrial energy], 2013, no. 5, pp. 7–9.
4. Sokolov E.Ia. *Teplofikatsiia i teplovye seti* [Cogeneration and heating systems]. Moscow, 2001. 472 p.

Лукин С.В., Шумова А.А., Завалина М.В., Шестаков Н.И., Ригин А.Н. Использование теплоты, отводимой от стальных слэбов кристаллизаторами и роликками машин непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №3(78). С. 28–37.

For citation: Lukin S.V., Shumova A.A., Zavalina M.V., Shestakov N.I., Rigin A.N. Using the heat taken from steel slabs by molds and rolls of continuous casting machines in the heat supply system of the metallurgical plant. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 3 (78), pp. 28–37.