

DOI 10.23859/1994-0637-2017-2-77-3
УДК 669.04

© Лукин С.В., Кочкин А.А., Кибардин А.Н.,
Антонова Ю.В., Мухин В.В., Игонин В.И., 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

Кочкин Александр Александрович

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

Kochkin Alexander Alexandrovich

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

Игонин Владимир Иванович

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

Igonin Vladimir Ivanovich

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

Кибардин Антон Николаевич

Аспирант, Череповецкий
государственный университет
(Череповец, Россия)
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Kibardin Anton Nikolaevich

Post graduate student, Cherepovets State
University (Cherepovets, Russia)
E-mail: s.v.luk@yandex.ru

Мухин Владимир Васильевич

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

Muchin Vladimir Vasilievich

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

Антонова Юлия Валерьевна

Кандидат технических наук,
Череповецкий государственный
университет (Череповец, Россия)
E-mail: iulia.antonowa2010@yandex.ru

Antonova Yulia Valerievna

PhD (Technology), Associate professor,
Cherepovets State University
(Cherepovets, Russia)
E-mail: iulia.antonowa2010@yandex.ru

**АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ
РЕЖИМОВ ОХЛАЖДЕНИЯ,
ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ И
НАГРЕВА СЛЯБОВ НА ЛИНИИ
«МНЛЗ – НАГРЕВАТЕЛЬНАЯ
ПЕЧЬ »**

**ALGORITHMS OF OPTIMIZING
MODES OF SLABS COOLING,
THERMOSTATING AND HEATING
ON THE LINE “CCM – HEATING
STOVE”**

Аннотация. В статье рассмотрены алгоритмы оптимизации режимов охлаждения и термостатирования стальных слабов в машине непрерывного литья заготовок, и

Abstract. In the article the algorithms of optimizing modes of cooling and thermostating steel slabs in continuous casting machine and modes of heating and blistering slabs in

режимов нагрева и томления слабов в нагревательной методической печи. Данные алгоритмы реализуются на ЭВМ с использованием алгоритмического языка программирования.

methodical heating stove are considered. These algorithms are realized on a computer with the use of an algorithmic program language.

Ключевые слова. Машина непрерывного литья заготовок, слаб, термостат, нагревательная печь.

Key words. Continuous casting machine, slab, thermostat, heating stove.

Введение

В настоящее время жидкая сталь разливается главным образом на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). На выходе из МНЛЗ среднemasсовая температура слабов превышает 1000 °С, поэтому при использовании физической теплоты слабов в нагревательных печах прокатного производства может быть достигнут значительный энергетический, экономический и экологический эффект. В идеальном случае, когда на выходе из МНЛЗ слэбы имеют среднюю температуру, равную или превышающую температуру прокатки металла, нагрев слэба в печах вообще не требуется, необходимо лишь выровнять температуру по сечению слэба в термостате [2]. Когда средняя температура слабов, выходящих из МНЛЗ, недостаточна для прокатки, необходим нагрев слабов в методической печи и их томление с целью выравнивания температуры перед прокаткой [3]. В обоих случаях необходима оптимизация режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слабов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь».

Основная часть

В работе [1] разработана математическая модель, позволяющая последовательно рассчитывать затвердевание слэба в МНЛЗ, охлаждение на воздухе и в термостате, и нагрев в печи, а также рассмотрены методы оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слабов на линии «МНЛЗ – прокатный стан».

Для реализации разработанной математической модели затвердевания, охлаждения, термостатирования и нагрева слэба был разработан алгоритм расчета температурного поля слэба и оценки его теплового состояния, блок-схема которого показана на рис. 1. Исходные данные для расчета температурного поля слэба в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения МНЛЗ, в зоне воздушного охлаждения МНЛЗ, в термостате, в нагревательных и томильной зонах печи включают в себя:

1) геометрические условия (ГУ): толщина $2B$ и ширина $2A$ охлажденного слэба; число узлов по полутолщине слэба N_1 , по полутолщине слэба N_2 ; рабочие длины кристаллизатора и секций ЗВО МНЛЗ l_i ; длины нагревательных зон печи l_{ni} ; ширина b и высота зон h_i рабочего пространства печи;

2) технологические параметры (ТП): скорость вытягивания слэба в МНЛЗ (скорость разливки) v ; расходы охлаждающей воды, подаваемой на кристаллизатор $G_{кр}$, ролики $G_{рол,i}$ и форсунки ЗВО МНЛЗ $G_{в,i}$;

3) временные условия (ВУ): длительность охлаждения слэба в зоне воздушного охлаждения τ_o ; длительность нахождения слэба в термостате τ_t ; длительности нагрева слэба в методической и сварочной зонах печи τ_{n1} , τ_{n2} ; длительность выдержки слэба в томильной зоне печи τ_{tm} ; расчетный шаг по времени Δt ;

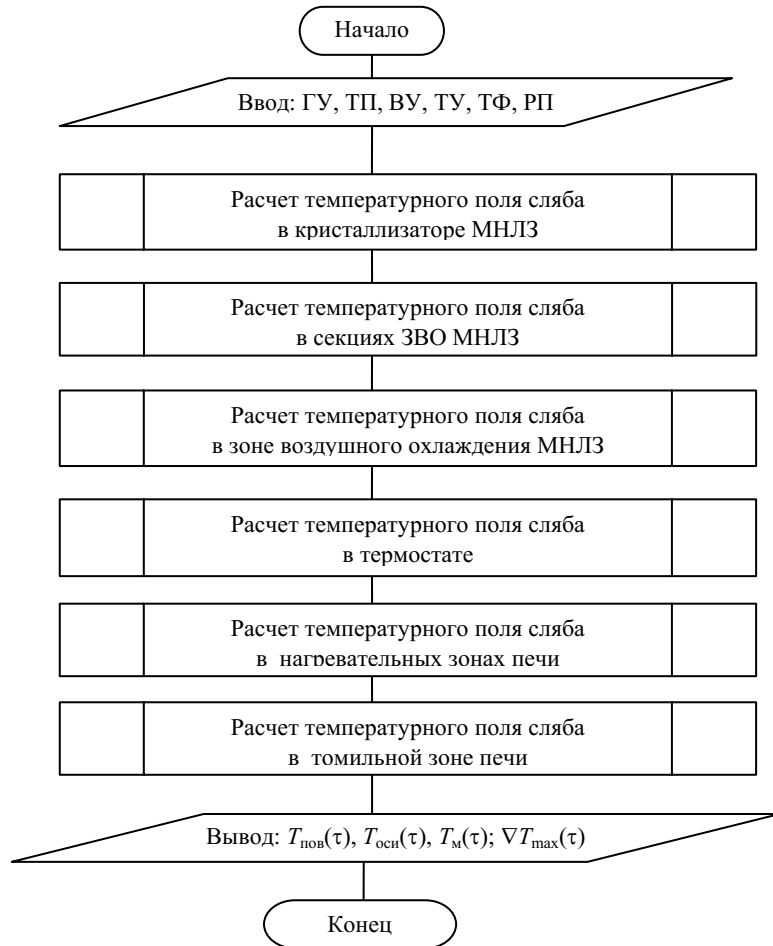


Рис. 1. Алгоритм расчета температурного поля слэба и оценки его теплового состояния

4) температурные условия (ТУ): температура T_0 жидкой стали, поступающей в кристаллизатор МНЛЗ; температура воды, подаваемой из форсунок, $T_{в}$; нагрев воды в кристаллизаторе $\Delta T_{кр}$ и роликах $\Delta T_{рол}$; температура окружающей среды $T_{о.с}$; температуры в рабочем пространстве методической печи $T_{пi}$;

5) теплофизические параметры (ТФ): теплота затвердевания стали L ; температуры ликвидус и солидус t_l и t_s ; коэффициент теплопроводности λ , плотность ρ , эффективная теплоемкость $C_{эф}$ стали в зависимости от температуры;

6) расчетные параметры (РП): коэффициент σ , характеризующий интенсивность охлаждения в кристаллизаторе; коэффициенты μ_i , характеризующие интенсивность охлаждения в ЗВО; степень черноты поверхности слэба ε ; приведенная степень черноты в зоне воздушного охлаждения $\varepsilon_{пр}$; плотность тепловых потерь в термостате $q_{терм}$; приведенные коэффициенты излучения в нагревательных зонах печи $C_{прi}$.

Расчет температурного поля слэба проводится последовательно для следующих участков: кристаллизатор МНЛЗ, секции зоны вторичного охлаждения, зона

воздушного охлаждения, термостат, нагревательные зоны методической печи, томильная зона печи.

По результатам расчета температурного поля сляба производится оценка его теплового состояния, включающая информацию о средней температуре поверхности широкой грани сляба $T_{\text{пов}}(\tau)$, температуре на оси сляба $T_{\text{оси}}(\tau)$, среднемассовой энтальпии $h_{\text{ср}}(\tau)$ и температуре металла $T_{\text{ср}}(\tau)$, максимальном градиенте температур по сечению сляба $\nabla T_{\text{max}}(\tau)$, где τ – время, проведенное данным сечением сляба в МНЛЗ, термостате или печи начиная с момента поступления жидкой стали в кристаллизатор.

На основе алгоритма расчета температурного поля сляба и оценки его теплового состояния разработан алгоритм определения оптимальных длительностей охлаждения сляба в зоне воздушного охлаждения МНЛЗ и в термостате, когда не требуется нагрев сляба в печи, и обеспечивается поступление сляба на прокатку с заданной среднемассовой температурой и допустимым градиентом температур по сечению сляба.

Данный алгоритм показан на рис. 2. Исходными для него являются данные по МНЛЗ и термостату: геометрические условия (ГУ), технологические параметры (ТП), температурные условия (ТУ), теплофизические параметры (ТФ), расчетные параметры (РП), временные условия (ВУ). Кроме того, задаются требуемая температура металла перед прокаткой T_m и допустимый градиент температур по сечению сляба перед прокаткой ∇T_m .

Сначала производится расчет температурного поля сляба в кристаллизаторе, в ЗВО, в зоне воздушного охлаждения МНЛЗ, в термостате, в результате чего определяется среднемассовая температура сляба на выходе из термостата $T_{\text{ср}}$. Если данная температура превышает требуемую температуру металла перед прокаткой T_m , то длительность охлаждения сляба в зоне воздушного охлаждения τ_o нужно увеличить, если $T_{\text{ср}}$ меньше T_m , то длительность τ_o нужно уменьшить. Если $T_{\text{ср}} = T_m$, то τ_o равняется оптимальной длительности охлаждения в зон воздушного охлаждения $\tau_{o,\text{опт}}$.

Может получиться, что при $\tau_o = 0$ температура $T_{\text{ср}}$ меньше T_m . Это значит, что на выходе из зоны вторичного охлаждения сляб имеет среднемассовую температуру ниже требуемой для прокатки. Если имеется возможность, нужно увеличить скорость разливки v либо уменьшить требуемую температуру металла перед прокаткой T_m . Если это невозможно, то в качестве оптимального значения принимается $\tau_{o,\text{опт}} = 0$.

Затем производится расчет температурного поля сляба в МНЛЗ и термостате, при условии, что $\tau_o = \tau_{o,\text{опт}}$. В результате определяется максимальный градиент температур по сечению сляба на выходе из термостата ∇T_{max} . Если данный градиент превышает допустимый градиент температур ∇T_m , то длительность нахождения сляба в термостате τ_t нужно увеличить, в противном случае величину τ_t нужно уменьшить. Если выполняется $\nabla T_{\text{max}} = \nabla T_m$, то длительность нахождения сляба в термостате τ_t равна оптимальному значению $\tau_{t,\text{опт}}$.

В случае, когда при $\tau_o = 0$ выполняется $T_{\text{ср}} < T_m$, требуется дополнительный нагрев сляба в нагревательной печи.

Разработан алгоритм определения оптимальных длительностей нагрева и томления сляба в методической печи при горячем посаде, обеспечивающий поступление сляба на прокатку с заданной среднемассовой температурой и допустимым градиентом температур по сечению сляба. Данный алгоритм показан на рис. 3. Исходными для него являются данные по нагревательной печи: геометрические условия (ГУ), технологические параметры (ТП), температурные условия (ТУ), теплофизические

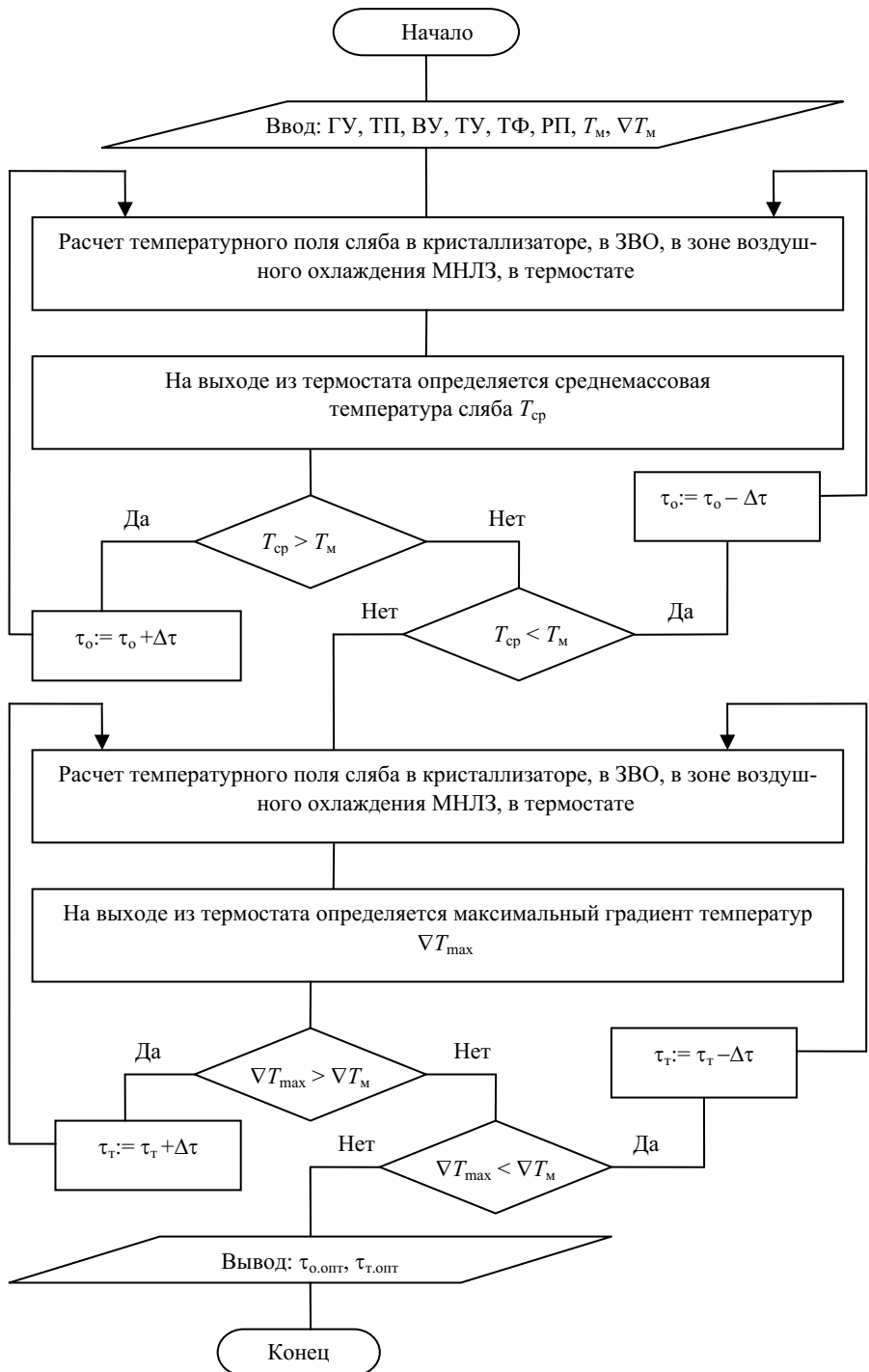


Рис. 2. Алгоритм определения оптимальных длительностей охлаждения сляба в МНЛЗ и термостате

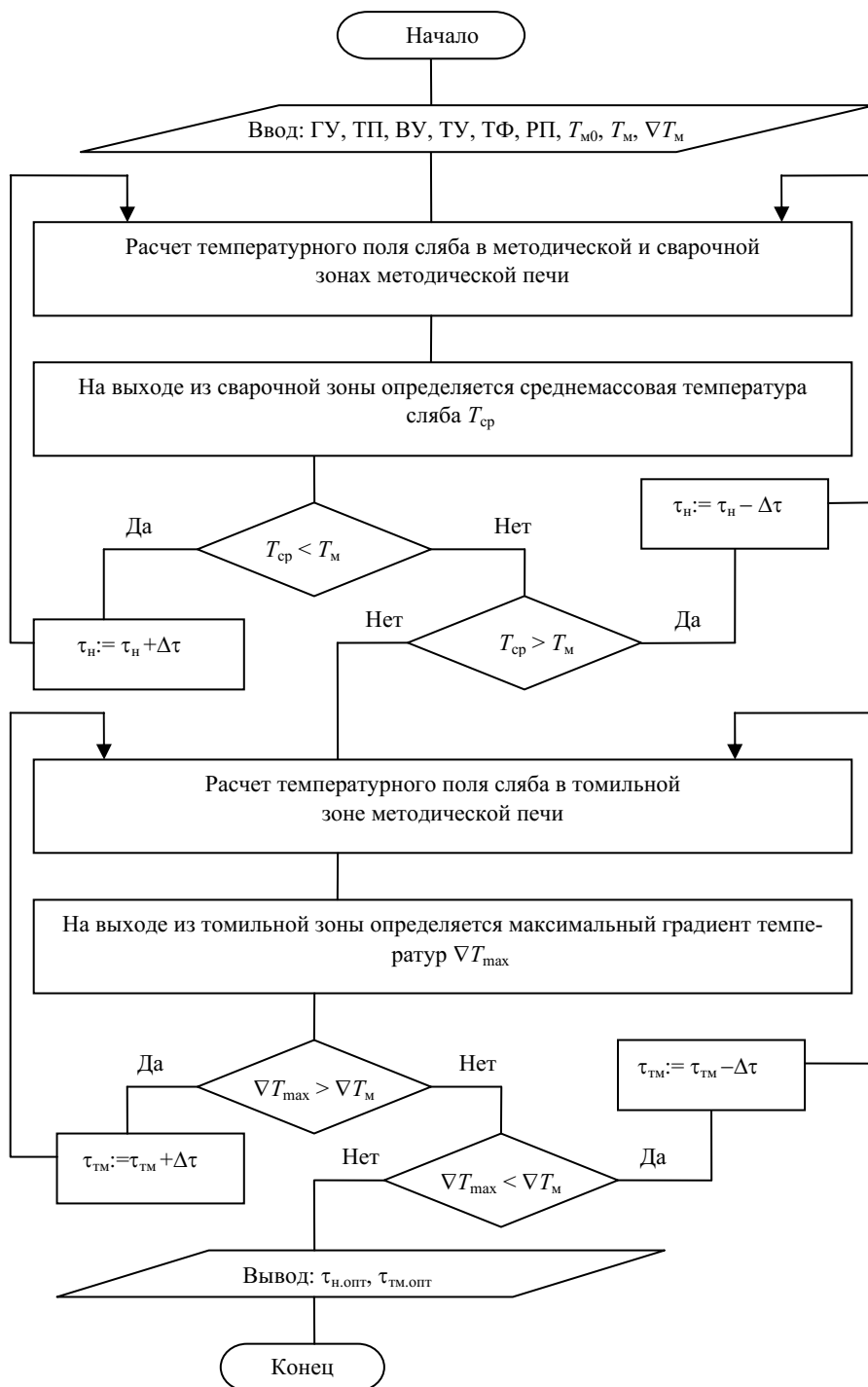


Рис. 3. Алгоритм определения оптимальных длительностей нагрева и томления сляба в методической печи

параметры (ТФ), расчетные параметры (РП), временные условия (ВУ). Кроме того, задаются среднемассовая температура сляба при загрузке в печь $T_{м0}$, требуемая среднемассовая температура металла перед прокаткой T_m , и допустимый градиент температур по сечению сляба перед прокаткой ∇T_m .

Сначала производится расчет температурного поля сляба методической и сварочной зонах методической печи, в результате чего определяется среднемассовая температура сляба на выходе из сварочной зоны $T_{ср}$. Если данная температура превышает требуемую температуру металла перед прокаткой T_m , то длительность нагрева слябов в печи τ_n нужно уменьшить, если $T_{ср}$ меньше T_m , то длительность τ_n нужно увеличить. Если $T_{ср} = T_m$, то τ_n равняется оптимальной длительности нагрева в печи $\tau_{н.опт}$.

Затем производится расчет температурного поля сляба в томильной зоне методической печи, при условии, что $\tau_n = \tau_{н.опт}$, в результате чего определяется максимальный градиент температур по сечению сляба на выходе из томильной зоны печи ∇T_{max} . Если данный градиент превышает допустимый градиент температур ∇T_m , то длительность томления сляба в τ_{tm} нужно увеличить, иначе – величину τ_{tm} нужно уменьшить. Если выполняется $\nabla T_{max} = \nabla T_m$, то длительность томления сляба τ_{tm} равна оптимальному значению $\tau_{tm.опт}$.

Алгоритмы, показанные на рис. 1–3, реализованы в среде алгоритмического языка программирования Visual Basic.

Выводы

В статье рассмотрены алгоритмы оптимизации режимов охлаждения и термостатирования стальных слябов в машине непрерывного литья заготовок, и режимов нагрева и томления слябов в нагревательной методической печи, которые были реализованы на алгоритмическом языке программирования Visual Basic. Оптимизация указанных режимов позволяет значительно сократить удельный расход топлива на нагрев металла в печах (в некоторых случаях, практически до нуля) и повысить их производительность.

Литература

1. Лукин С.В., Игонин В.И., Кочкин А.А., Кибардин А.Н., Мухин В.В., Антонова Ю.В. Оптимальные режимы охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ – прокатный стан» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 6 (75). С. 16–20.
2. Лукин С.В., Кибардин А.Н. Оптимальное использование физической теплоты слябов после МНЛЗ // Металлург. 2016. № 7. С. 38–43.
3. Лукин С.В., Кибардин А.Н., Сидоренкова С.Е., Кочкин А.А. Оптимизация режимов нагрева и термостатирования слябов при горячем посаде в нагревательные печи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2016. № 3 (72). С. 7–11.

References

1. Lukin S.V., Igonin V.I., Kochkin A.A., Kibardin A.N., Muchin V.V., Antonova Iu.V. Optimalnye rezimy ohlazhdeniia, termostatirovaniia i nagreva sliabov na linii “MNLZ – prokatnyi stan” [Optimum modes of cooling, thermostating and heating of slabs on line “continuous casting machine – rolling mill”]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Cherepoves state university bulletin], 2016, no. 6, pp. 16–20.

2. Lukin S.V., Kibardin A.N. Optimal'noe ispol'zovanie physicheskoi teploty sliabov posle MNLZ [Optimal use of physical heat in slabs issuing CCM]. *Metallurg* [Metallurgist], 2016, no. 7, pp. 38–43.

3. Lukin S.V., Kibardin A.N., Sidorenkova S.E., Kochkin A.A. Optimizatsiia rezimov nagreva i termostatirovaniia sliabov pri goriachem posade v nagrevatelnye pechi [Heating and thermostating modes optimization at loading hot slabs in heating stoves]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvenno-universiteta* [Cherepoves state university bulletin], 2016, no. 3 (72), pp. 7–11.

Лукин С.В., Кочкин А.А., Кибардин А.Н., Антонова Ю.В., Мухин В.В., Игонин В.И. Алгоритмы оптимизации режимов охлаждения, термостатирования и нагрева слябов на линии «МНЛЗ – нагревательная печь» // Вестник Череповецкого государственного университета. 2017. №2(77). С. 23–30.

For citation: Lukin S.V., Kochkin A.A., Igonin V.I., Kibardin A.N., Muchin V.V., Antonova Yu.V. Algorithms of optimizing modes of slabs cooling, thermostating and heating on the line “ccm – heating stove”. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2017, no. 2 (77), pp. 23–30.