

УДК 621.746. 27

С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, С.Е. Сидоренкова
Череповецкий государственный университет,
А.А. Кочкин
Вологодский государственный университет

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАГРЕВА И ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ СЛЯБОВ ПРИ ГОРЯЧЕМ ПОСАДЕ В НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПЕЧИ

В статье разработан способ нагрева и термостатирования слэбов, разлитых на машинах непрерывного литья заготовок, при загрузке их в нагревательные печи в горячем состоянии, обеспечивающий наибольшую производительность печей и наименьший угар металла, а также рассмотрена методика расчета длительности нахождения слэбов в печи и термостате.

Нагревательная печь, термостат, слэб, режимы нагрева, горячий посад.

In the paper the method of heating and thermostating slabs after continuous casting machine at loading hot slabs in heating stoves is developed providing the most output and the least oxidation of metal. As well, the method of calculation of duration of slab heating in the stove is considered.

Heating stove, thermostat, slab, heating modes, hot slab loading.

Введение

В настоящее время на металлургических комбинатах жидкая сталь разливается преимущественно на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Высокотемпературные стальные слэбы, выходящие из машины непрерывного литья заготовок, имеют среднемассовую температуру порядка 1000 °С и содержат значительное количество физической теплоты. При отсутствии поверхностных дефектов (трещин и т.п.) горячие слэбы можно сразу загружать в нагревательные печи прокатного производства, осуществляя так называемый горячий посад, тем самым повышая производительность печей и снижая удельный расход топлива в печах [1], [2]. Однако на отечественных комбинатах горячий посад слэбов после МНЛЗ практически не применяется, что связано, в частности, с достаточной удаленностью цехов разливки и прокатки друг от друга. Горячие слэбы, как правило, поступают сначала на холодный склад, где охлаждаются практически до температуры окружающей среды (~ 0 °С). Там же обычно производится диагностика дефектов на поверхности слэбов и их зачистка. В методические печи прокатных станов слэбы поступают в холодном состоянии с температурой ~ 0 °С, где производится их нагрев до температуры 1200÷1250 °С, обеспечивающей необходимую пластичность металла.

Поверхностные дефекты у слэбов возникают при значительном изменении технологии непрерывной разливки (при переходных режимах), когда изменяется скорость разливки, расход жидкого металла в кристаллизатор, расход шлакообразующей смеси, расходы охлаждающей воды на форсунки и т.п. Слэбы, полученные при неизменной технологии разлив-

ки (при стационарных режимах) или при несущественном ее изменении, могут считаться качественными и направляться не на холодный склад, а в термостаты (теплоизолированные боксы с подогревом) для выравнивания температуры по их сечению, а затем в нагревательные печи. После нагрева в печи слэбы целесообразно снова помещать в термостаты для выравнивания температуры по их сечению, после чего их можно направлять на прокатку.

Основная часть

На рис. 1 показана предлагаемая схема движения слэбов, выходящих из МНЛЗ. На выходе из МНЛЗ производится диагностика горячих слэбов, в результате которой выявляются слэбы с дефектами поверхности. Эти слэбы отправляются на холодный склад, или на машину огневой зачистки, где производится зачистка поверхностных дефектов, после чего, с температурой, примерно равной температуре окружающей среды $t_{oc} \approx 0$ °С, они поступают в нагревательные печи прокатного производства. Горячие слэбы после МНЛЗ, не имеющие поверхностных дефектов, направляются сразу в термостаты. Если МНЛЗ и прокатный стан находятся на значительном удалении друг от друга, то термостаты должны быть мобильными (например, термостат может представлять из себя теплоизолированный вагон специальной конструкции). В случае, если МНЛЗ и прокатный стан находятся на одной технологической линии (рольганге), то термостат будет стационарным теплоизолированным боксом. Из термостата слэбы с температурой $t_0 = 800 \div 1100$ °С загружаются в нагревательную печь с постоянной температурой в рабочем пространстве $t_n = 1300 \div 1500$ °С, где нагреваются

до среднемассовой температуры $t_m = 1200 \div 1250$ °С, после чего снова направляются в термостат для выравнивания температуры по их сечению и далее поступают на прокатный стан.

В научно-технической литературе имеется много данных по режимам нагрева стальных слывов и слитков из холодного состояния. В частности, методические нагревательные печи специально спроектированы для нагрева холодных слывов, и температура греющих газов изменяется по длине печи, особенно значительно – в методической зоне, где происходит предварительный нагрев металла. При нагреве слывов, помещаемых в печь в горячем состоянии с температурой $t_0 = 800 \div 1100$ °С, необходимость в методической зоне отпадает, и во всем рабочем пространстве печи для ускорения процесса нагрева целесообразно выдерживать постоянную температуру t_n , которая должна быть выше температуры металла $t_m = 1200 \div 1250$ °С, при которой слыв направляется на прокатку. Если $t_n = t_m$, то необходимая длительность выдержки слыва в печи теоретически становится бесконечной.

На рис. 2 показан предлагаемый режим нагрева и термостатирования слывов, загружаемых в печь в горячем состоянии, который может обеспечить наибольшую производительность печи и наименьший угар металла. При таком режиме слывы из термостата, имеющие температуру T_0 , в момент времени $\tau = 0$ загружаются в печь с постоянной температурой в рабочем пространстве T_n (где $T = t + 273,15$, К) и начинают обогреваться с обеих сторон (двухсторон-

ний нагрев). Температура на поверхности слыва $T_{пов}$ быстро растет, стремясь к температуре в печи T_n , а температура в центре слыва $T_{цен}$ увеличивается медленнее. Среднемассовая температура слыва $T_{ср}$ монотонно возрастает, превышая температуру в центре, оставаясь меньше температуры поверхности ($T_{цен} < T_{ср} < T_{пов}$). После того, как среднемассовая температура слыва в какой-то момент времени $\tau = \tau_n$ достигнет значения T_m (температуры прокатки), слыв необходимо извлечь из печи и поместить в термостат. Если потери теплоты в термостате отсутствуют или компенсируются специальным подогревом, то среднемассовая температура слыва перестанет изменяться, и будет выполняться: $T_{ср} = T_m = \text{const}$. Температура поверхности слыва $T_{пов}$ после его помещения в термостат начнет сразу снижаться, стремясь к значению T_m , а температура центра $T_{цен}$ продолжит увеличиваться, также приближаясь к значению T_m . Через промежуток времени τ_t после помещения слыва в термостат произойдет практическое выравнивание температуры по его сечению.

Необходимая длительность нагрева слыва в печи τ_n зависит от температур T_0 , T_m и T_n , причем, чем больше температура в печи T_n , тем меньше величина τ_n . Значение T_n должно выбираться из условия, чтобы градиент температуры вблизи поверхности слыва был допустимым и не возникало бы пережога поверхности. Длительность выравнивания температуры по сечению слыва в термостате τ_t зависит только от толщины слыва и температуропроводности стали.

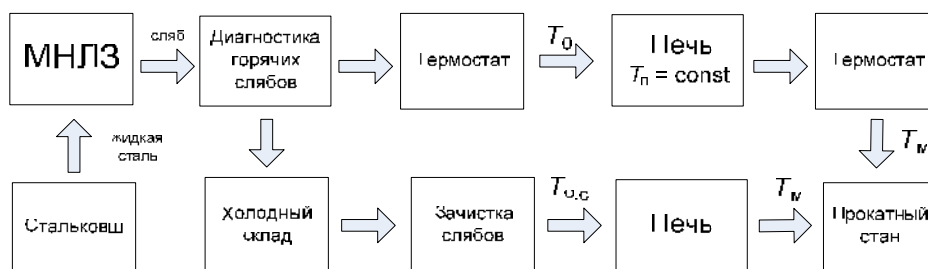


Рис. 1. Схема движения слывов после МНЛЗ

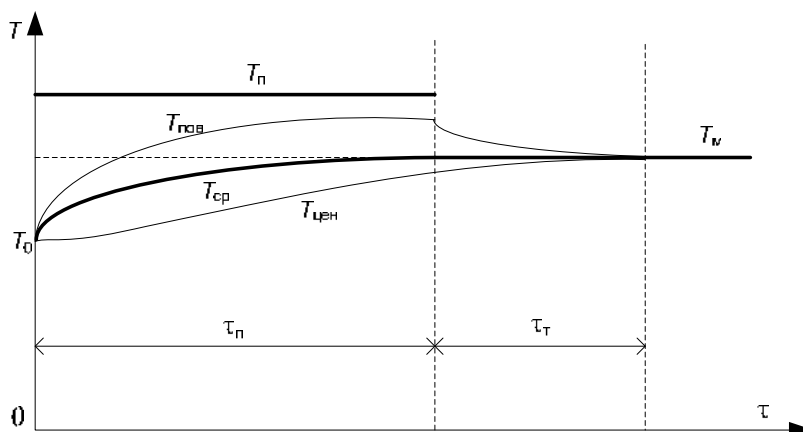


Рис. 2. Режим нагрева и термостатирования горячего слыва

Для инженерных расчетов нагрева слябов в печах с постоянной температурой разработаны номограммы [3], где безразмерная температура металла Θ является функцией чисел Био Bi и Фурье Fo , а также безразмерной координаты X :

$$\Theta = f(X, Bi, Fo), \quad (1)$$

где $\Theta = (T - T_0)/(T_{\pi} - T_0)$; $X = x/\delta$; $Bi = \alpha \cdot \delta/\lambda$; $Fo = a \cdot \tau/\delta^2$; $T = T(x, \tau)$ – текущая температура; T_0 – начальная температура сляба; T_{π} – температура в рабочем пространстве печи; x – размерная координата; τ – текущее время; δ – характерный линейный размер (полутолщина сляба при двухстороннем нагреве); α – коэффициент теплоотдачи на поверхности сляба; λ , a – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали.

Преимуществом номограмм, построенных по уравнению подобия (1) для определенной координаты X (центра или поверхности), является то, что они не зависят от температуры в печи T_{π} и начальной температуры металла T_0 . Недостаток выражения (1) в том, что коэффициент теплоотдачи α , входящий в критерий Bi , при лучистом теплообмене в печи значительно изменяется в процессе нагрева сляба. В высокотемпературных печах, где теплообмен на поверхности слябов протекает в основном за счет излучения, плотность теплового потока на поверхности сляба можно описать выражением:

$$q = C \cdot \left((T_{\pi}/100)^4 - (T_{\text{пов}}/100)^4 \right), \quad (2)$$

где приведенный коэффициент излучения C , обычно находящийся в диапазоне $3 \div 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ [4], можно считать практически постоянным в процессе нагрева, тогда как коэффициент теплоотдачи α , равный

$$\alpha = q/(T_{\pi} - T_{\text{пов}}) = C \cdot (T_{\pi}^2 + T_{\text{пов}}^2)(T_{\pi} + T_{\text{пов}})10^{-8},$$

значительно зависит от температур T_{π} и $T_{\text{пов}}$.

Более точными при инженерном расчете нагрева слябов в печи являются номограммы, построенные по уравнению подобия [4]:

$$\Theta = f(X, Sk, Fo, \Theta_0), \quad (3)$$

где $\Theta = T/T_{\pi}$; $X = x/\delta$; $Sk = (C \cdot \delta/\lambda) \cdot T_{\pi}^3 \cdot 10^{-8}$ – критерий Старка; $Fo = a \cdot \tau/\delta^2$; $\Theta_0 = T_0/T_{\pi}$.

Как следует из (3), безразмерная температура Θ зависит от координаты X , от числа Фурье Fo , от числа Старка Sk , и от величины $\Theta_0 = T_0/T_{\pi}$.

В предлагаемом способе нагрева слябов основной расчетной величиной является среднемассовая температура сляба $T_{\text{ср}}$, которая не зависит от координаты X , и определяется уравнением подобия:

$$\bar{\Theta} = T_{\text{ср}}/T_{\pi} = f(Sk, Fo, \Theta_0). \quad (4)$$

Наибольший интерес представляет момент времени $\tau = \tau_{\pi}$ когда среднемассовая температура $T_{\text{ср}}$ становится равной температуре $T_{\text{м}}$, которому соответствует критерий Фурье $Fo' = a \cdot \tau_{\pi}/\delta^2$. Тогда из уравнения (4) можно получить такое уравнение подобия:

$$Fo' = f'(T_{\text{м}}/T_{\pi}, T_0/T_{\pi}, Sk). \quad (5)$$

В работе [4] выражение (5) представлено в виде:

$$Fo' = \frac{\Psi_{\text{м}} - \Psi_0}{Sk}, \quad (6)$$

где $\Psi_{\text{м}} = \psi(T_{\text{м}}/T_{\pi}, Sk)$; $\Psi_0 = \psi(T_0/T_{\pi}, Sk)$. В [4] приведена номограмма, построенная Д.В. Будриным, позволяющая определять функцию ψ в зависимости от $\Theta = T/T_{\pi}$ и числа Старка Sk .

На основе выражения (6) и номограммы $\psi(\Theta, Sk)$ рассчитана необходимая длительность нагрева τ_{π} слябов толщиной $2\delta = 250 \text{ мм}$ для марки стали 30Х до среднемассовой температуры $t_{\text{м}} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в зависимости от температуры загрузки слябов в печь t_0 при температуре в печи $t_{\pi} = 1350; 1400; 1450 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При расчете приняты значения: $C = 3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\lambda = 28 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $a = 5,87 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Полученные зависимости приведены на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что при увеличении температуры загрузки t_0 при $t_{\pi} = \text{const}$ необходимая длительность нагрева τ_{π} значительно уменьшается. Так, при температуре в печи $t_{\pi} = 1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ при увеличении t_0 от 500 до 1100 $^{\circ}\text{C}$ длительность нагрева снижается от 59 до 22,5 мин, т.е. более, чем в 2,5 раза. Во столько же раз возрастет производительность печи. Отметим, что при нагреве из холодного состояния ($t_0 = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$) до той же среднемассовой температуры $t_{\text{м}} = 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ длительность нагрева сляба составит 82 мин.

При увеличении температуры в рабочем пространстве печи длительность нагрева существенно уменьшается. Так, при $t_0 = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и увеличении t_{π} от 1400 до 1450 $^{\circ}\text{C}$ длительность нагрева снижается с 22,5 до 18,9 мин, т.е. на 16 %.

Рассмотрим теперь режим термостатирования слябов после печи, когда потери теплоты с поверхности сляба в термостате отсутствуют. Для компенсации потерь стенки термостата могут иметь внутренний обогрев. Рабочее пространство термостата может быть заполнено инертным газом (азотом и др.) для исключения окисления поверхности сляба.

В конце процесса двухстороннего нагрева в печи температурное поле по сечению сляба описывается приближенно уравнением параболы [3]:

$$\theta = \theta_0 \cdot (x/\delta)^2,$$

где $\theta = t - t'_{\text{цен}}$; $\theta_0 = t'_{\text{пов}} - t'_{\text{цен}}$; t – температура в точке с координатой x ; $t'_{\text{пов}}$, $t'_{\text{цен}}$ – температуры на поверхности ($x = \delta$) и в середине ($x = 0$) сляба в конце процесса нагрева; координата x направлена перпендикулярно поверхности сляба и отсчитывается от его

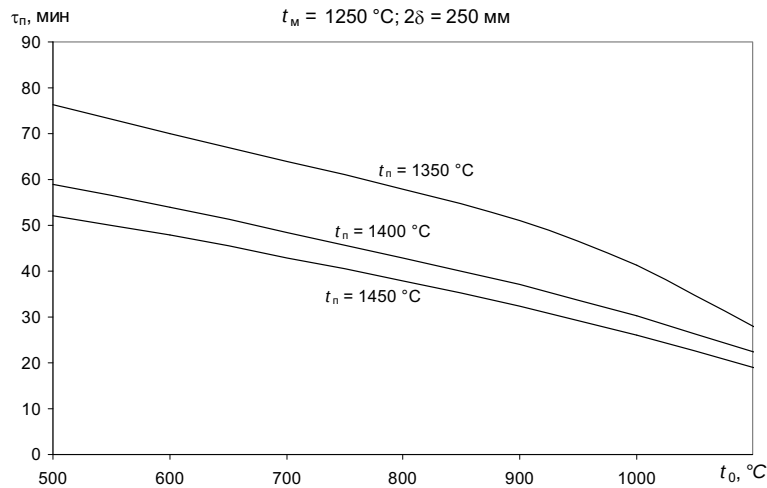


Рис. 3. Зависимость τ_n от t_0 при различных t_n

середины. Величина θ_0 связана с плотностью теплового потока q на поверхности сляба так:

$$\theta_0 = 0,5 \cdot q \cdot \delta / \lambda, \quad (7)$$

где q определяется, с учетом формулы (2), по формуле:

$$q = C \cdot \left((T_n / 100)^4 - ((T_m + 2\theta_0 / 3) / 100)^4 \right). \quad (8)$$

где $T_{\text{пов}} = T_m + 2\theta_0 / 3$; $T_m = t_m + 273$.

На основе выражений (7) и (8) методом последовательных приближений определяется величина θ_0 , после чего определяются температуры на поверхности и в центре сляба в конце процесса нагрева: $t'_{\text{пов}} = t_m + 2\theta_0 / 3$; $t'_{\text{цен}} = t_m - \theta_0 / 3$.

Например, примем следующие значения $t_m = 1250$ °C, $t_n = 1400$ °C, $C = 3,5$ Вт/(м²·К⁴), $\lambda = 28$ Вт/(м·К); $\delta = 0,125$ м. Расчет по формулам (7) и (8) дает: $q = 48008$ Вт/м²; $\theta_0 = 107$ °C; $t'_{\text{пов}} = 1321$ °C; $t'_{\text{цен}} = 1214$ °C.

В точке с координатой $x = \delta / \sqrt{3} \approx 0,577 \cdot \delta$ температура сляба t равняется среднемассовой температуре t_m . После извлечения сляба из печи и помещения его в термостат, в котором плотность теплового потока на обеих поверхностях сляба равняется нулю, будут выполняться следующие граничные условия:

$$\partial t / \partial x|_{x=0} = \partial t / \partial x|_{x=\delta} = 0.$$

В процессе выравнивания температуры по сечению сляба в термостате в точке $x \approx 0,577 \cdot \delta$ будет приближенно выполняться условие: $t \approx t_m$, поскольку температура во всех точках сляба будет стремиться к значению t_m . Данная задача теплопроводности имеет аналитическое решение, приведенное в [5]. Наиболее быстро температура сляба выравнивается в точках с координатами: $0,577 \cdot \delta < x < \delta$. Медленнее будет выравниваться температура в точках с координатами: $0 < x < 0,577 \cdot \delta$, т.е. в центральной части сляба.

Если ввести безразмерную температуру $\Theta_{\text{цен}} = (t_m - t_{\text{цен}}) / (t_m - t'_{\text{цен}})$, то при $Fo_T = 1,5$ (где $Fo_T = a \cdot \tau_T / (\delta')^2$; $\delta' = \delta / \sqrt{3}$; τ_T – время, проведенное в термостате) величина $\Theta_{\text{цен}}$ будет равняться 0,025, т.е. неравномерность температурного поля внутри сляба не будет превышать 2,5 % от первоначальной в момент загрузки в термостат. При $Fo_m = 1,2$ величина $\Theta_{\text{цен}} \approx 0,055$, т.е. более, чем в 2 раза выше, чем при $Fo_m = 1,5$. При $Fo_m = 1$ величина $\Theta_{\text{цен}} \approx 0,09$; при $Fo_m = 0,7$ величина $\Theta_{\text{цен}} \approx 0,18$.

Учитывая это, длительность выдержки сляба в термостате можно определять из условия:

$$\tau_T = Fo_T \cdot (\delta')^2 / a = Fo_T \cdot \delta^2 / (3a). \quad (9)$$

Так, при $\delta = 0,125$ м ($2\delta = 250$ мм), $a = 5,87 \cdot 10^{-6}$ м²/с, длительность выдержки сляба в термостате, обеспечивающую неравномерность температурного поля, не превышающую 2,5 % от неравномерности в момент загрузки в термостат ($Fo_T = 1,5$), рассчитанная по формуле (9), составит $\tau_T = 22,2$ мин.

Если $t_m = 1250$ °C, $t'_{\text{цен}} = 1214$ °C, то при $\Theta_{\text{цен}} \approx 0,025$, на выходе из термостата максимальная разность температур по сечению сляба составит $t_m - t_{\text{цен}} = 0,9$ °C.

При $Fo_m = 0,7$, когда $\Theta_{\text{цен}} \approx 0,18$, длительность выдержки сляба в термостате составит 10,4 мин., а максимальная разность температур по сечению сляба на выходе из термостата – $t_m - t_{\text{цен}} = 6,5$ °C, что обеспечивает градиент температуры по сечению сляба менее 1 °C/см, что является допустимым перед прокаткой [3].

Для более точного расчета режимов нагрева и термостатирования слябов можно использовать численный метод расчета температурного поля сляба, позволяющий учесть зависимость теплофизических параметров стали (λ , a) от температуры. При горячем посаде в печи твердых стальных слябов с температурой выше 900 °C и нагреве до 1200÷1250 °C параметры λ и a изменяются незначительно, так что их

можно полагать постоянными, поэтому рассмотренная в данной работе инженерная методика расчета является достаточно точной.

Выводы

В статье разработана инженерная методика расчета оптимальной длительности нагрева и термостатирования слывов, разлитых на машинах непрерывного литья заготовок, при загрузке их в нагревательные печи в горячем состоянии. При реализации предлагаемого способа горячего посада может быть достигнута значительная экономия топлива в нагревательных печах прокатного производства, увеличение производительности печей и снижение угара металла в печах.

Литература

1. Лукин С.В., Шестаков Н.И., Антонова Ю.В. Совершенствование режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков при использовании моделирования // *Металлург*. 2014. № 9. С. 107–110.
2. Лукин С.В., Шестаков Н.И., Антонова Ю.В. Энергосбережение в нагревательных печах за счет оптимизации режимов разлива, охлаждения и нагрева стальных слитков // *Промышленная энергетика*. 2013. № 10. С. 26–30.
3. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. М., 1975.

4. Шукин А.А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов. М., 1973.

5. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. М., 1976. 351 с.

References

1. Lukin S.V., Shestakov N.I., Antonova Ju.V. Sovershenstvovanie rezhimov zatverdevaniia, ohlazhdeniia i nagreva stal'nykh slitkov pri ispol'zovanii modelirovaniia [Improving solidification modes, cooling and heating of steel ingots using simulation]. *Metallurg* [Metallurgist], 2014, № 9, pp. 107–110.
2. Lukin S.V., Shestakov N.I., Antonova Ju.V. Energosberezhenie v nagrevatel'nykh pechakh za schet optimizatsii rezhimov razlivki, ohlazhdeniia i nagreva stal'nykh slitkov [Energy saving in heating furnaces by optimizing the casting, cooling and heating of steel ingots]. *Promyshlennaiia energetika* [Industrial power], 2013, №10, pp. 26–30.
3. Kazancev E.I. *Promyshlennye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlia raschetov i proektirovaniia* [Industrial furnaces. Reference Manual for calculation and design]. Moscow, 1975.
4. Shhukin A.A. *Promyshlennye pechi i gazovoe hozjaistvo zavodov* [Industrial furnaces and gas supply plants]. Moscow, 1973.
5. Pehovich A.I., Zhidkih V.M. *Raschety teplovogo rezhima tverdykh tel* [Calculations of the thermal regime of solids]. Moscow, 1976. 351 p.

УДК 536.2

Н.Н. Монаркин, А.А. Синицын, А.Н. Наимов
Вологодский государственный университет

ПОСТРОЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТЕЙШЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

В работе построена и исследована простейшая математическая модель процесса аккумуляции и регенерации тепловой энергии в регенеративном теплообменнике. Математическая модель построена в виде линейного обыкновенного дифференциального уравнения первого порядка для функции изменения температуры насадки во времени. В процессе исследования решения дифференциального уравнения доказано существование единственного периодического режима и приближения других режимов к периодическому при возрастании времени. На основе максимума и минимума периодического режима выведены формулы для нахождения коэффициентов энергоэффективности насадки. Приведено сравнение расчетных данных с экспериментальными.

Регенеративный теплообменник, процесс аккумуляции и регенерации тепла, температурный режим, коэффициенты энергоэффективности.

The simplest mathematical model of accumulation and regeneration of heat energy in a regenerative heat exchanger is constructed and investigated in this work. The mathematical model is constructed as a linear ordinary differential first-order equation. The mathematical model describes the function of change of filling temperature over time. For this mathematical model the existence of the only periodic regime and the approximation other regimes to the periodic with increasing time are proven. To find the energy efficiency coefficients of the filling are derived on the basis of the maximum and minimum of periodic regime. Comparison of calculated and experimental data is shown.

The regenerative heat exchanger, the process of accumulation and regeneration of heat, temperature regime, the energy efficiency coefficients.

Введение

В статье рассматривается вопрос о построении и исследовании простейшей математической модели процесса аккумуляции и регенерации тепловой энергии в регенеративном теплообменнике. Рассматриваемый теплообменник по конструкции относится к

типу стационарных переключающихся регенеративных теплоутилизаторов (СПРТ) [1]. В них теплообменным элементом является регенеративная насадка: насадка попеременно нагревается потоком горячего воздуха и охлаждается потоком холодного воздуха. На этапе нагрева происходит аккумуляция (накопле-