

УДК 669.041:621.31

## АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕТОДИЧЕСКИХ МНОГОЗОННЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ НАГРЕВА СЛЯБОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

**Жильцов А.П., Харитonenко А.А., Бочаров А.В., Челябинина А.Л.**

*ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», Липецк,*

*e-mail: kaf-mo@stu.lipetsk.ru*

Рассмотрены конструктивно-технологические особенности методических многозонных печей для нагрева слябов перед прокаткой на широкополосном стане. Выделены основные показатели при эксплуатации печей: температура нагрева слябов, интенсивность нагрева, расход газа и воздуха, типы и расположение горелок, схема нагрева, теплопроизводительность. Проведен сравнительный анализ показателей расхода газа и воздуха по печам в технологической линии участка нагрева. Установлен различный характер схем нагрева в различных печах. Получены области и тренды теплопроизводительности при сравнительном анализе печей. Получены результаты проведенного пассивного эксперимента, на основании которых построены статистические модели зависимости величины теплопроизводительности от расхода газа и воздуха для различных печей. Проведенные оценки по F-критерию и t-критерию свидетельствуют о значимости коэффициентов моделей. Полученные коэффициенты множественной корреляции свидетельствуют о тесной взаимосвязи исследуемых зависимых и независимых факторов. Полученные модели позволяют прогнозировать величину получаемой теплопроизводительности в зависимости от расхода газа и воздуха. Установлено, что оценка энергоэффективности по параметру теплопроизводительности является эффективным инструментом для сравнительного анализа как при эксплуатации печей, так и при использовании конструктивно-технологических показателей анализируемых печей в процессе реконструкции.

**Ключевые слова:** широкополосовой стан, нагревательная печь, расход газа, расход воздуха, теплопроизводительность, энергоэффективность

## ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY IN THE OPERATION OF METHODOICAL MULTI-ZONE FURNACES FOR HEATING SLABS IN TERMS OF HEATING CAPACITY

**Zhiltsov A.P., Kharitonenko A.A., Bocharov A.V., Chelyadina A.L.**

*Lipetsk State Technical University, Lipetsk, e-mail: kaf-mo@stu.lipetsk.ru*

The design and technological features of methodical multi-zone furnaces for heating slabs before rolling on a broadband mill are considered. The main indicators for the operation of furnaces are highlighted: temperature of slab heating, heating intensity, gas and air consumption, types and location of burners, heating scheme, heating capacity. A comparative analysis of gas and air consumption indicators for furnaces in the technological line of the heating section is carried out. The different nature of heating schemes in different furnaces has been established. The areas and trends of heating capacity in the comparative analysis of furnaces are obtained. The results of the conducted passive experiment are obtained, on the basis of which statistical models of the dependence of the heating capacity on the gas and air consumption for various furnaces are constructed. The evaluation carried out by the F-criterion and t-criterion indicate the significance of the coefficients of the models. The obtained multiple correlation coefficients indicate a close relationship between the studied dependent and independent factors. The obtained models make it possible to predict the value of the resulting heating capacity depending on the gas and air consumption. It is established that the assessment of energy efficiency by the heating capacity parameter is an effective tool for comparative analysis both during the operation of furnaces and when using structural and technological indicators of the analyzed furnaces during reconstruction.

**Keywords:** broadband mill, heating furnace, gas consumption, air consumption, heating capacity, energy efficiency

В листопрокатном производстве методические печи используются для нагрева слябов перед прокаткой, что является неотъемлемой и важнейшей составляющей технологического процесса, определяющей наряду с другими технологическими операциями качество и себестоимость продукции. При этом в условиях переменных геометрических и физических параметров слябов, ритма прокатки, а также технологических ограничений получение требуемых показателей качества нагрева возможно при реализации режима автоматического управления работой печей, что позволяет стабилизиро-

вать температуру нагрева, обеспечить рациональный режим расхода газа и воздуха.

Эксплуатация современных методических печей с шагающими балками связана с существенными энергетическими затратами как для нагрева заготовок, так и для обеспечения их перемещения по поду печи за счет применения приводов «шагающих» подов или балок. Поэтому актуальным является применение энергосберегающих технологий нагрева [1, 2], математического моделирования при исследовании теплового состояния и управления тепловыми процессами [3], исследования технологических

методов для повышения энергоэффективности при нагреве слябов [4–6].

Нагревательные многозонные печи в технологической линии стана с выполнением общей основной функции – нагрев слябов до необходимой температуры пластичности – могут различаться по ряду конструктивных и технологических параметров. Это связано с тем, что печи подвергаются модернизации и реконструкции в различные периоды времени с учетом достигнутого на данный период времени уровня техники и технологии.

Дальнейший анализ энергоэффективности связан с эксплуатацией печей № 2–5 непрерывного широкополосного стана (НШС) 2000 горячей прокатки. Печь № 1 находится на реконструкции (выведена из эксплуатации), печь № 2 и печи № 3–5 реконструированы в различное время и отличаются по конструктивным и технологическим параметрам.

Следует отметить, что расход энергии на нагрев слябов в печах имеет преимущественное значение среди других показателей по участкам стана, поэтому необходим сравнительный анализ энергоэффективности по печам № 2 и № 3–5. Проведение данного анализа обусловлено также необходимостью оценки применения конструктивно-технологических решений для рассматриваемых печей при реконструкции печи № 1.

К основным показателям печей следует отнести: температуру нагрева, интенсивность нагрева, расход газа и воздуха, количество, типы и особенности расположения горелок, теплопроизводительность. Для печей характерно применение позонного нагрева слябов путем предварительного нагрева,

основного нагрева и томления для достижения температуры по сечению слябов, необходимой и достаточной для обеспечения пластической деформации при прокатке. Основным показателем является теплопроизводительность печи, которая зависит от интенсивности нагрева, расхода газа и воздуха.

С учетом вышеизложенного целью исследования является анализ влияния показателей расхода газа и воздуха на величину теплопроизводительности печей № 2 и № 3–5, определяющей их энергоэффективность.

#### *Исследование показателей теплопроизводительности печей*

Как отмечено выше, теплопроизводительность, характеризующая энергоэффективность печей, определяется как величиной расхода газа и воздуха, так и расположением форсунок. Так, для печи № 2 характерно расположение форсунок на боковых стенках внутреннего пространства печи, для печей № 3–5 – на боковых стенках и в верхней зоне. На рис. 1 и 2 приведено сравнение расхода газа и воздуха для печи № 2 и № 3–5, а на рис. 3 и 4 – сравнение теплопроизводительности  $Q$  в ккал/ч печей № 2 и № 3–5.

Так, для печи № 2 распределение расхода воздуха и газа по зонам имеет убывающий характер с постепенным уменьшением расхода в относительно ступенчатом режиме (рис. 1). Для печей № 3–5 в отличие от печи № 2 при переходе от нагревательной верхней и нижней зон к зонам выравнивания интенсивность расхода воздуха и газа резко уменьшается (рис. 2), что приводит к скачкообразному характеру распределения теплопроизводительности.

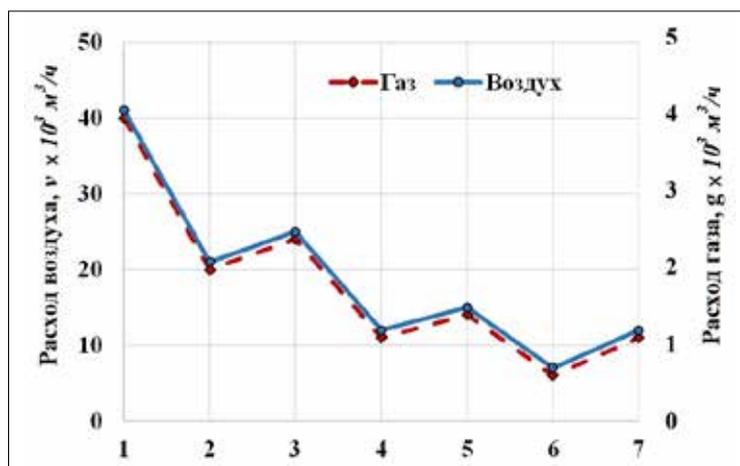


Рис. 1. Распределение расхода газа и воздуха по зонам для печи № 2:

1 – зона предварительного нагрева; 2 – верхняя зона нагрева № 1;

3 – нижняя зона нагрева № 1; 4 – верхняя зона нагрева № 2;

5 – нижняя зона нагрева № 2; 6 – верхняя зона томления; 7 – нижняя зона томления

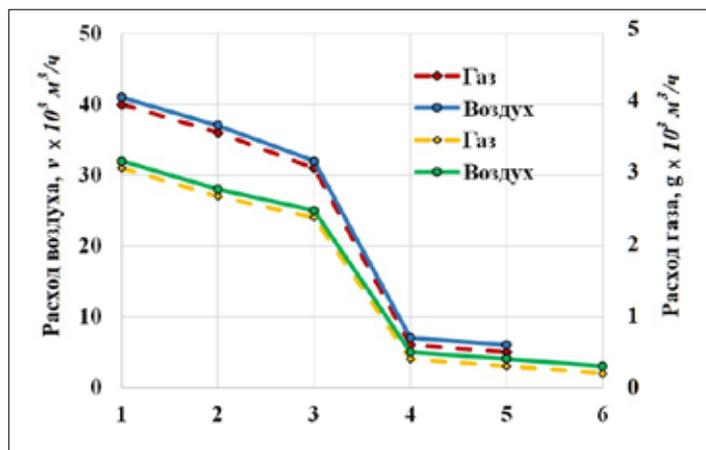


Рис. 2. Распределение расхода газа и воздуха по зонам для печей № 3–5: 1 – зона предварительного нагрева; 2 – нагревательная зона № 1; 3 – нагревательная зона № 2; 4 – левая зона выравнивания (центральная для нижней зоны); 5 – правая зона выравнивания (периферийная для нижней зоны); 6 – экран

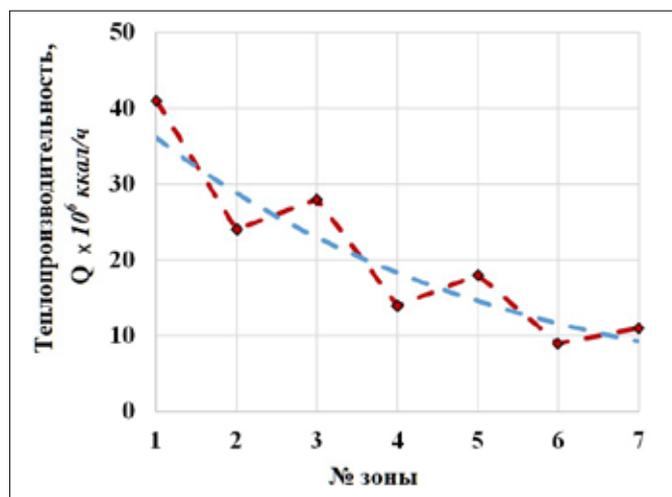


Рис. 3. Интервалы и тренд теплопроизводительности печи № 2 по зонам нагрева

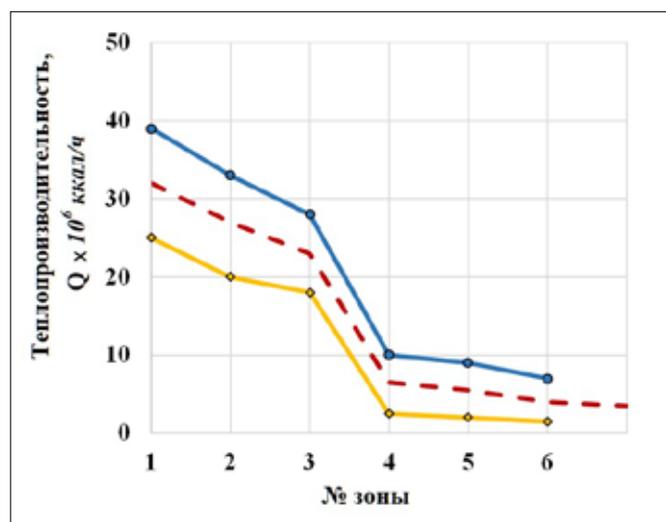


Рис. 4. Интервалы и тренд теплопроизводительности печей № 3–5 по зонам нагрева

Анализ показывает, что теплопроизводительность  $Q$  для печи № 2 превышает соответствующий показатель для печей № 3–5 на 8,1%. Это связано с принятой схемой нагрева в печи № 2 и в печах № 3–5.

На рис. 3 и 4 приведены области и тренды теплопроизводительности для печей № 2 и № 3–5. Для печи № 2 характерным является пологий тренд изменения теплопроизводительности по зонам с максимальной величиной в 1 и 2 зонах нагрева. Для печей № 3–5 характерна ступенчатая с резким переходом схема нагрева с максимальной интенсивностью в первых зонах нагрева.

С целью определения влияния величин расхода газа и воздуха на величину теплопроизводительности проведен пассивный эксперимент с фиксацией независимых переменных в виде расхода газа  $g$  и воздуха  $v$  и достигнутой величины теплопроизводительности  $Q$  по зонам нагрева печей № 2 и № 3–5. На основе полученного массива экспериментальных данных построены статистические модели для печи № 2 и печей № 3–5 вида

$$Q = a_0 + a_1v + a_2g + a_3vg.$$

Статистическая модель для печи № 2 имеет вид

$$Q = 0,38 \cdot 10^6 - 10,7v + 10,9g \cdot 10^3 + 2,1vg \cdot 10^{-5}, \tag{1}$$

для печей № 3–5:

$$Q = \begin{cases} -0,19v + 8,2g \cdot 10^3 + 1,8vg \cdot 10^{-5} & \left\{ \begin{array}{l} \text{при } 45 \cdot 10^3 > v > 25 \cdot 10^3 \\ \text{при } 4,5 \cdot 10^3 > g > 2,2 \cdot 10^3 \end{array} \right. \\ -0,22v + 9,3g \cdot 10^3 + 1,9vg \cdot 10^{-5} & \left\{ \begin{array}{l} \text{при } 25 \cdot 10^3 > v > 6,0 \cdot 10^3 \\ \text{при } 2,2 \cdot 10^3 > g > 0,5 \cdot 10^3 \end{array} \right. \\ -0,19v + 8,1g \cdot 10^3 + 1,6vg \cdot 10^{-5} & \left\{ \begin{array}{l} \text{при } 6,0 \cdot 10^3 > v > 3,0 \cdot 10^3 \\ \text{при } 0,5 \cdot 10^3 > g > 0,2 \cdot 10^3 \end{array} \right. \end{cases} \tag{2}$$

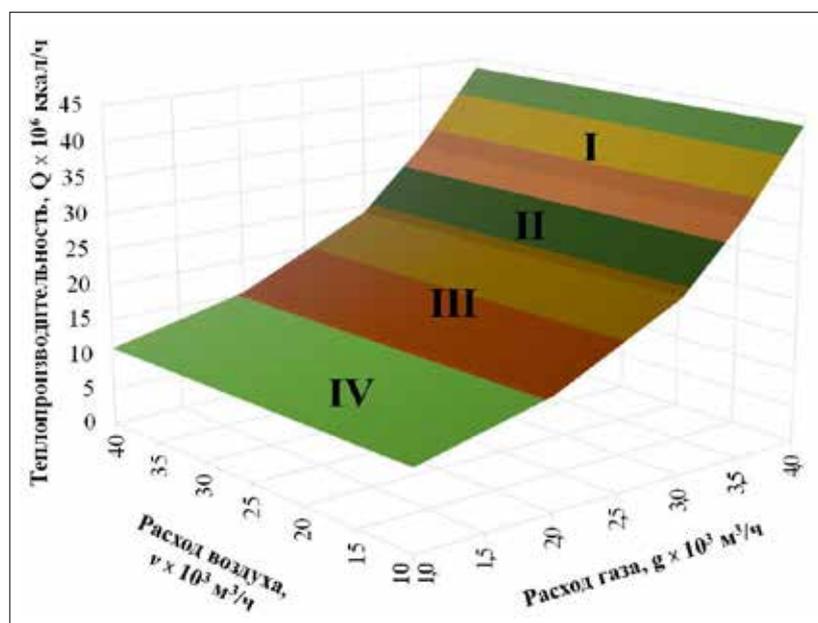


Рис. 5. Области теплопроизводительности по зонам нагрева для печи № 2: I – зона предварительного нагрева; II, III – зоны основного нагрева; IV – зона томления

Проверка моделей по F-критерию и t-критерию свидетельствует о значимости коэффициентов модели, при этом коэффициенты множественной корреляции для моделей (1) и (2) составили соответственно  $R_1 = 0,865$ ,  $R_2 = 0,784$ , что свидетельствует о тесной взаимосвязи исследуемых параметров.

На рис. 5 в качестве примера приведена визуализация модели для печи № 2. Данная визуализация представляет собой поверхность с плавным переходом по зонам нагрева величины теплопроизводительности в зависимости от расхода газа и воздуха.

Обеспечение равномерного нагрева по основным зонам (рис. 5) и снижение интенсивности в завершающей зоне (зона томления) является характерной особенностью для печи № 2. Это обеспечивается особенностями расположения горелок в верхних и нижних зонах и типами применяемых горелок: TSX-16, TSX-14, TSX-12, TSX-10. Повышение энергоэффективности обеспечивается также работой рекуператора в режиме противотока.

Данные горелки являются беспламенными с возможностью применения импульсного режима нагрева. В беспламенной горелке, за счет особой организации подачи газа и воздуха, практически полностью отсутствует видимый факел, что позволяет достигнуть равномерного теплового потока на металл и снизить вредные выбросы. Импульсный режим, в отличие от традиционного пропорционального, позволяет работать только со стабильным режимом, избегая переходных процессов, когда регулирование качества сжигания топлива неэффективно. Это положительно сказывается как на качестве нагрева, так и на экологичности процесса производства проката [7].

При этом, в отличие от печи № 2, в печах № 3–5 наблюдается ступенчатое с резким переходом по зонам изменение величины достигаемой теплопроизводительности (рис. 4), что негативно влияет на снижение энергоэффективности по параметру теплопроизводительности.

## Выводы

1. Оценка энергоэффективности печей по параметру теплопроизводительности является достаточно эффективным инструментом, позволяющим проводить сравнительный анализ технологических и эксплуатационных параметров печей при их эксплуатации.

2. Установлено, что повышение энергоэффективности по параметрам теплопроизводительности печи № 2 по сравнению с печами № 3–5 обусловлено:

– характером расположения и типами применяемых горелок;

– обеспечением режима нагрева слябов с равномерным переходом по зонам нагрева.

3. Рекомендовано при проведении реконструкции печи № 1 учитывать конструктивно-технологические параметры для печи № 2, что позволяет повысить энергоэффективность реконструируемой печи.

## Список литературы

1. Казанцев Е.И., Котляревский Е.М., Баженов А.В., Заварова И.С. Энергосберегающая технология нагрева слитков. М.: Metallurgy, 1992. 176 с.

2. Чмырев И.Н., Башкатов Э.А., Дождиков В.И., Мордовкин Д.С. Влияние опорной системы печей с шагающими балками на особенности теплового состояния нагреваемых слябов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. М., 2016. Вып. 11 (1403). С. 63–66.

3. Логунова О.С., Агапитов Е.Б., Баранкова И.И., Андреев С.М., Чусавитина Г.Н. Математические модели для исследования теплового состояния тел и управления тепловыми процессами // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2 (43). С. 25–34.

4. Ткаченко И.М. Повышение энергоэффективности комплекса для нагрева непрерывнолитых слябов перед прокаткой // Международный научно-исследовательский журнал. 2012. № 6 (6). С. 16–18.

5. Беленький А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А., Чибизова С.И. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей станков горячей прокатки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. 2015. № 2. С. 62–69.

6. Мордовкин Д.С., Дождиков В.И., Беленький А.М., Чмырев И.Н., Башкатов Д.А. Современные средства исследований процесса нагрева металла в методических печах станков горячей прокатки // Труды 10-го Международного конгресса прокатчиков (Липецк, 14–16 апреля 2015 г.). Липецк: Издательство ЛГТУ, 2015. С. 48–53.

7. Мешкова О.В., Фаустов В.В., Правдин А.М. Эффективная технология и качество готового проката – неразрывные понятия // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2021. № 2 (45). С. 87–91.