

УДК 66.041.51

## РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ ПАО «ЧЕЛЯБИНСКИЙ ТРУБОПРОКАТНЫЙ ЗАВОД» ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕЕ РАБОТЫ

*Щукина Н.В.<sup>1</sup>, магистрант кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (n.v.shchukina@urfu.ru)*

*Черемискина Н.А.<sup>1</sup>, магистрант кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (n.a.cheremiskina@urfu.ru)*

*Лошкарев Н.Б.<sup>1,2</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (nb.loshkarev@urfu.ru)*

*Лавров В.В.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (v.v.lavrov@urfu.ru)*

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

<sup>2</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»)  
(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

**Аннотация.** Высокую производительность прокатных и трубопрокатных станов, хорошее качество готовой металлопродукции возможно получить путем подогрева металлических заготовок с минимальным окислением и обезуглероживанием в нагревательных печах. Такие условия обеспечивают кольцевые печи, которые широко используют в прокатном производстве труб, железнодорожных колес и бандажей. Качественный нагрев позволяет получить структуру металлоизделий с заданными теплофизическими и рабочими свойствами, а также пластичность, необходимую для последующей механической обработки. В настоящей работе рассмотрены теплотехнические особенности работы кольцевой печи для нагрева трубных заготовок перед прокаткой на ПАО «Челябинский трубопрокатный завод» (ЧТПЗ). Проанализированы проблемы, возникающие при работе теплового агрегата: высокие удельный расход топлива на нагрев заготовок и температуры наружных поверхностей стен и свода; низкая скорость нагрева заготовки; большой объем подсосов воздуха в рабочее пространство печи; конструкция газогорелочных устройств не предусматривает возможности регулирования подачи газа в большом диапазоне нагрузок, вплоть до периодического полного отключения; тепловая энергия отходящих газов практически не используется. Проведен расчет нагрева металла и составлен тепловой баланс кольцевой печи. В ходе анализа результатов расчетных исследований выявлены факторы, снижающие энергоэффективность существующей конструкции печи. Предложены мероприятия по ее модернизации с целью уменьшения расхода топлива и увеличения производительности (применение волокнистых огнеупорных материалов, регенеративных горелочных устройств, не водоохлаждаемых перегородок и др.). Для оценки влияния предложенных мероприятий составлен тепловой баланс печи после проведения реконструкции печных систем и узлов, определены основные показатели тепловой работы печи. При реализации предложенных мероприятий ожидается существенный экономический эффект, улучшение качества нагрева металла при сокращении расхода топлива и увеличении производительности агрегата. В частности, после проведения реконструкции печи ожидается повышение суммарного (на 18,1 %) и теплового (на 31,0 %) КПД печи, а также снижение (на 48,3 кг ут/т) удельного расхода топлива.

**Ключевые слова:** кольцевая печь, тепловой баланс, ресурсосбережение, реконструкция, техническое перевооружение, тепловой КПД, экономия топлива.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-6-431-437

### ВВЕДЕНИЕ

Высокую производительность прокатных и трубопрокатных станов, хорошее качество готовой металлопродукции возможно получить путем подогрева металлических заготовок с минимальным окислением и обезуглероживанием в кольцевых нагревательных печах. В настоящее время такие печи широко применяют в прокатном производстве труб, железнодорожных колес и бандажей, где необходимо обеспечить получение структуры металлоизделий с заданными теплофизичес-

кими и рабочими свойствами, а также пластичность, необходимую для последующей механической обработки [1 – 13].

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И АНАЛИЗ

#### ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ

В трубопрокатном цехе № 2 ЧТПЗ эксплуатируется печь ТПЦ-2 с кольцевым подом для нагрева перед раскромом трубной заготовки из углеродистых и низколегированных марок сталей при температурах до 1265 °С.

Кольцевая печь представляет собой металлический сварной каркас диам. 18 м, шириной вращающегося пода 4,05 м. Заготовки периодически через окно загрузки в наружной стене печи укладывают загрузочной машиной на подину печи, которая непрерывно вращается. Заготовки, размещенные неподвижно на вращающемся поду, последовательно проходят все теплотехнические зоны нагрева за счет вращения подины. Выдача заготовок осуществляется в отдельном окне, расположенном рядом с окном загрузки (рис. 1). Окна загрузки и выгрузки отделены от печи с двух сторон специальными перегородками. Свод печи ТПЦ-2 комбинированный, выполнен из сводовых плит и подвесного огнеупорного кирпича.

С теплотехнической точки зрения и условий эксплуатации кольцевая печь относится к классу методических топливных нагревательных печей, поэтому в ней выделены все традиционные теплотехнические зоны и режимы нагрева металла, присущие тепловым агрегатам рассматриваемого класса. Методическая зона предназначена для нагрева металла газами, обладающими только физическим теплом. Сварочная – зона интенсивного нагрева, в которой используется как физическое тепло подогретого на горение воздуха, так и химическое тепло, выделяемое при горении газовой смеси. В сварочной зоне на поверхности нагреваемого материала достигается максимальная

температура. Томильная зона предназначена для снижения перепада температур по сечению нагреваемой заготовки, так называемая зона выдержки [14 – 18]. Установлено распределение температур внутри каждой из зон: первая (методическая) – 1150 – 900 °С; вторая (сварочная) – 1300 – 1350 °С; третья (томильная) – 1200 – 1250 °С.

Отопление производится при использовании в качестве топлива природного газа. Печь оборудована горелочными устройствами двух типов: двухпроводные турбулентные вихревые горелки (конструкции «Укргипромет») располагаются в сварочной зоне, в томильной – двухпроводные горелки типа «труба в трубе». Подача заготовок в рабочее пространство печи осуществляется через окно, закрытое футерованной заслонкой. Футеровка боковых стен печи выполнена из огнеупорного кирпича со слоем теплоизоляции из шамота легковеса.

Краткая характеристика печи представлена в табл. 1.

В ходе эксплуатации такой печи были выявлены следующие недостатки: повышенный (60 кг.у.т./т) удельный расход топлива на нагрев заготовок; высокие температуры наружных поверхностей свода и боковых стен, что связано с неудовлетворительным состоянием футеровки. В печи нагреваются достаточно массивные (диам. 420–650 мм) заготовки, поэтому время их нагрева составляет 3,5–4,0 ч. Низкая скорость нагре-

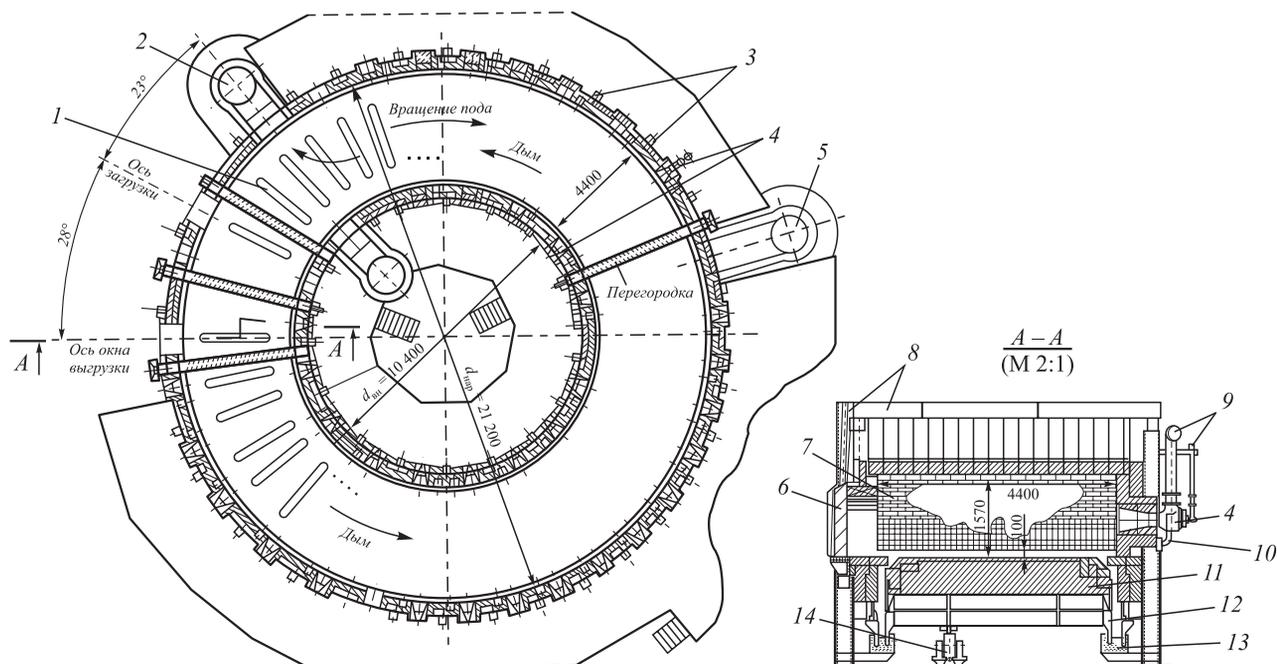


Рис. 1. Схема кольцевой печи:

- 1 – заготовки; 2 – дымоотбор; 3 – стойки каркаса; 4 – горелки; 5 – промежуточный дымоотбор; 6 – заслонка; 7 – перегородка; 8 – каркас; 9 – воздухо- и газопроводы; 10 – водоохлаждаемые трубы, поддерживающие перегородку; 11 – вращающаяся подина; 12 – опорная рама подины; 13 – водяной затвор; 14 – механизм перемещения подины

Fig. 1. Scheme of the annular furnace:

- 1 – billets; 2 – smoke extraction; 3 – frame racks; 4 – burners; 5 – intermediate smoke extraction; 6 – damper; 7 – partition; 8 – frame; 9 – air and gas pipelines; 10 – water cooled pipes supporting the partition; 11 – rotating hearth; 12 – hearth support frame; 13 – water seal; 14 – hearth movement mechanism

Т а б л и ц а 1

## Краткая характеристика нагревательной печи

Table 1. Brief description of the heating furnace

Наименование	Величина
Тип	Методическая
Режим работы	Непрерывный
Габаритные размеры, мм:	
– длина	34 300
– ширина	4800
Длина рабочего пространства по зонам, мм:	
– методической	16 465
– сварочной	9600
– томильной	8235
Площадь (рабочая) пода, м <sup>2</sup>	91,5
Производительность (максимальная), т/ч	36,0
Тепловая (номинальная) мощность, 4,2 · 10 <sup>3</sup> МДж/ч	2500 · 8150 = 20 375
Топливо	Природный газ
Максимальный расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч	3100
Материал заготовок	Углеродистые и низколегированные стали
Размер заготовок, мм:	
– диаметр	420 – 650
– длина	1100 – 4100
Температура (максимальная) по зонам печи, °С:	
– томильной	1300
– сварочной	1350
Температура нагреваемого металла, °С:	
– при посадке	20
– при выдаче	1250 – 1800

ва заготовки связана еще и с захлаживанием металла подсосами больших объемов наружного воздуха в рабочее пространство печи через гидрозатворы, находящиеся в неудовлетворительном состоянии. Кроме того, в конструкции газогорелочных топливосжигающих устройств не предусмотрены возможности регулирования подачи газа и воздуха в большом диапазоне тепловых нагрузок вплоть до полного отключения горелок. Тепловая энергия отходящих газов практически не используется по причине износа установленного на печи рекуператора.

Для действующей конструкции кольцевой нагревательной печи сотрудниками ОАО «Уралэнергочермет» были проведены балансовые испытания, на основе которых был составлен тепловой баланс, представленный в табл. 2 [19].

На основе анализа статей теплового баланса (табл. 2) были сделаны следующие выводы:

– система отопления печи в действующем состоянии функционирует неэффективно, поэтому необходимо проведение реконструкции;

– отсутствие требуемой герметичности рабочего пространства в процессе загрузки и выдачи заготовок приводит к повышенному подосу воздуха в рабочее пространство, поэтому для поддержания необходимого температурного режима требуется повышенный расход топлива, чтобы компенсировать потери тепла от подсосов холодного воздуха;

– периодически из-за негерметичности рабочего пространства печи заготовки на выдаче интенсивно охлаждаются, что вызывает необходимость их нагрева в рабочем пространстве печи до более высоких температур, чтобы они попали в обработку давлением с требуемым перепадом температур по сечению; необходимость держать в рабочем пространстве неоправданно высокие температуры вызывает повышенный угар металла;

– исследования процесса нагрева металла, проведенные сотрудниками ОАО «Уралэнергочермет», показали, что металлические заготовки в конце сварочной зоны уже готовы к выдаче, а значит в томильной зоне металл практически не получает тепла, а только дополнительно окисляется;

– вследствие неудовлетворительного состояния футеровки наружные поверхности стен печи имеют очень

Т а б л и ц а 2

## Тепловой баланс существующей конструкции печи ТПЦ-2 ПАО «ЧТПЗ»

Table 2. Heat balance of the existing furnace design for Pipe Rolling Shop no. 2 of “ChTPZ” PJSC

Статья	кВт	%
Приход		
Химическая теплота топлива	17 513,60	95,58
Физическая теплота подогретого воздуха	287,18	1,56
Тепло окисления металла	523,90	2,86
Итого	18 324	100
Расход		
Полезно затраченная теплота	4679,9	25,54
Потеря теплоты с уходящими газами	9218,8	50,31
Потеря теплопроводностью через под, свод, стенки печи	2867,7	15,65
Потеря излучением через окна загрузки и выдачи	1028,1	5,60
Потери тепла с окалиной	163,0	0,89
Неучтенные потери	386,5	2,01
Итого	18 324	100

высокие температуры, местами достигающие до 600 °С (данные ОАО «Уралэнергочермет»);

- заготовки прогреваются неравномерно по ширине печи;

- во время вынужденных простоев не удается снизить окисление металла корректировкой температурно-го режима.

### **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РЕКОНСТРУКЦИИ КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ И ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ**

На основании отмеченных выше недостатков в работе кольцевой нагревательной печи принято решение провести реконструкцию ее отдельных систем и узлов, что позволит добиться следующих преимуществ:

- улучшить качество нагрева заготовки, в частности, обеспечить перепад температур вдоль поверхности заготовки не более 5 °С, а по сечению – не более 10 °С, а также снизить количество брака, связанного с недогревом заготовки;

- снизить удельный расход топлива на нагрев заготовок;

- уменьшить потери металла от повышенного окисления за счет снижения угара металла (на всем сортаменте заготовок);

- обеспечить механизацию процесса удаления окалины из рабочего пространства для ее максимального извлечения из печи;

- отказаться от водяного охлаждения элементов печи при наличии технической возможности;

- уменьшить температуры наружных поверхностей стен до величины не более 70 °С, свода – не более 100 °С;

- обеспечить отслеживание изменения сортамента заготовок, находящихся в печи, за счет ввода системы позиционирования подины печи;

- выполнить модернизацию привода вращения подины и гидрозатвора;

- предусмотреть ограничители, препятствующие разрушению футеровки стен при перекосе заготовки;

- предусмотреть возможности регулирования газогорелочных устройств в большом диапазоне тепловых нагрузок вплоть до периодического полного отключения;

- уменьшить величину подсосов окружающего воздуха в рабочее пространство печи.

Проект реконструкции должен предусматривать модернизацию всей печи с применением современных огнеупорных материалов, несущих металлических конструкций и элементов с длительным сроком службы, а также применение современных контрольно-измерительных приборов, систем автоматического регулирования температуры, расхода газа и воздуха,

переоборудование системы отопления, в том числе замену существующих горелочных устройств на регенеративные.

Одной из основных проблем эксплуатации нагревательной печи является потеря тепловой энергии, поэтому потенциал энергосбережения в этом случае может быть очень велик и его использование существенно сократит издержки предприятия. Для повышения показателей энергетической эффективности печи предложено использовать регенеративные горелочные устройства, трехмерная модель которых представлена на рис. 2.

Особенностью регенеративной горелки является очень высокий подогрев воздуха на горение, благодаря чему достигается повышенный (до 80%) коэффициент использования тепла (КИТ). При температуре отходящих из печи газов около 1000 °С величина  $\text{NO}_x$  составит порядка 125 ppm, т.е. лишь десятую часть законодательно допустимого значения.

Оценку энергоэффективности предложенных мероприятий провели путем расчета теплового баланса печи после ее реконструкции [14 – 18, 20, 21] (табл. 3).

Анализ приведенных в табл. 3 данных показал, что при осуществлении мер технического перевооружения печи можно добиться следующих положительных результатов:

- увеличение температуры подогрева воздуха за счет использования регенеративных горелок приводит

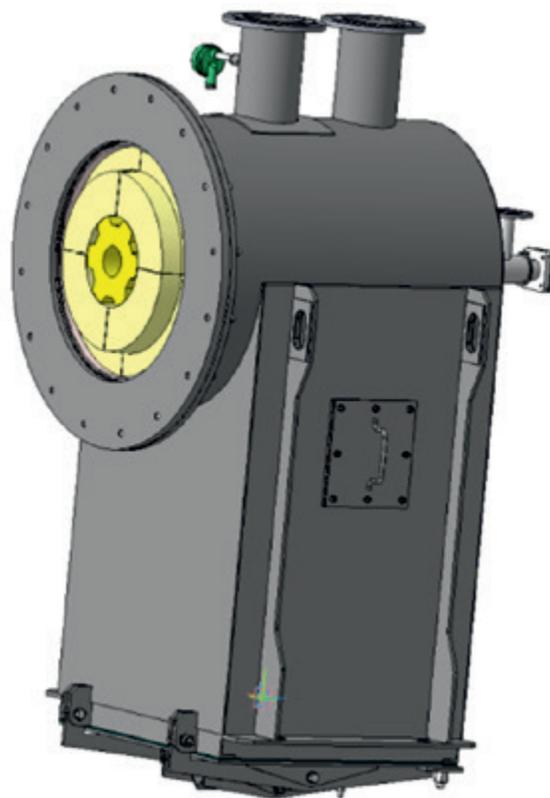


Рис. 2. Трехмерная модель регенеративной горелки РГУ-0,5

Fig. 2. 3D-model of the RGU-0.5 regenerative burner

Т а б л и ц а 3

**Тепловой баланс после реконструкции печи  
ТПЦ-2 ПАО «ЧТПЗ»**

**Table 3. Heat balance after furnace reconstruction  
for Pipe Rolling Shop no. 2 of “ChTPZ” PJSC**

Статья	кВт	%
<b>Приход</b>		
Химическая теплота топлива	13 200	75,4
Физическая теплота подогретого воздуха	5268	24,6
<b>Итого</b>	<b>18 468</b>	<b>100</b>
<b>Расход</b>		
Полезно затраченная теплота	8052	43,6
Потеря теплоты с уходящими газами	8440	45,7
Потери в окружающую среду, в том числе:	1976	10,7
теплопроводностью через под, свод, стенки печи	1200	6,5
излучением через окна загрузки и выдачи	776	2,2
<b>Итого</b>	<b>18 468</b>	<b>100</b>

к повышению второй статьи теплового баланса (физической теплоты подогретого воздуха), что обеспечит снижение расхода топлива;

– в случае замены кирпичной футеровки на волокнистые огнеупорные материалы значительно снижаются потери тепла через основные конструктивные элементы (под, свод и стены) печи;

– отсутствие потерь тепла с охлаждающей водой при использовании не водоохлаждаемых перегородок дает положительный эффект в тепловой работе;

– после проведения реконструкции печи повышается суммарный (на 18,1 %) и тепловой (на 31,0 %) КПД печи, а также снижается (до 48,3 кг усл. т/т) удельный расход топлива.

### Выводы

На основании анализа результатов расчетных исследований можно констатировать, что предложенные мероприятия по реконструкции печи ТПЦ-2 ОАО «ЧТПЗ» позволят повысить технико-экономические показатели ее работы, в частности, сократить расход топлива и увеличить тепловой КПД.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружинин Г.М., Дистергефт И.М., Леонтьев В.А. и др. Основные направления реконструкции кольцевой печи для нагрева заготовок // *Сталь*. 2005. № 3. С. 65 – 67.
2. Andreev S.M., Parsunkin B.N. Billet heating control fuel-saving solution in the rolling mill furnace // 2017 International Conference

- on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings, 19 October 2017, article No. 8076167.
3. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бушманова М.В. Оптимизация управления тепловым режимом нагревательных печей // *Сталь*. 2003. № 9. С. 65 – 67.
4. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Nuzhin D.V., Volkov A.V. Information employed in fuel-conserving control of metal heating // *Steel in Translation*. 2007. Vol. 37. No. 9. P. 792 – 796.
5. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinskii D.Yu. Energy-saving heating of continuous-cast billet // *Steel in Translation*. 2007. Vol. 37. No. 4. P. 384 – 387.
6. Parsunkin B.N., Andreev S.M. Requirements in energy-saving metal heating // *Steel in Translation*. 2002. Vol. 32. No. 2. P. 37 – 41.
7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov T.U. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79. No. 9-12. P. 1797 – 1803.
8. Andreev S.M., Bushmanova M.V., Parsunkin B.N. Optimal thermal-load distribution over the zones of a continuous furnace to minimize fuel costs // *Electrical-engineering Systems: An Interuniversity Collection*. MG TU, Magnitogorsk. 2000. No. 5. P. 301 – 307.
9. Chen D., Lu B., Dai F., Chen G., Yu W. Variations on billet gas consumption intensity of reheating furnace in different production states // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 129. P. 1058 – 1067.
10. Guangjun C. The problem and energy-saving of reheating furnace // *Energy Metall. Indust.* 2008. No. 27. P. 32 – 35.
11. Steinboeck A., Wild D., Kugi A. Energy-efficient control of continuous reheating furnaces // *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 2013. Vol. 15. No. 1. P. 359 – 364.
12. Lu B., Chen D., Chen G., Yu W. An energy apportionment model for a reheating furnace in a hot rolling mill – A case study // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 112. P. 174 – 183.
13. Dong W., Chen H. Strategy of rolling delay on reheating furnace // *Kang T'ieh / Iron and Steel (Peking)*. 2004. Vol. 39. No. 1. P. 55 – 58.
14. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.И. Китаев, Б.Ф. Зобнин, В.Ф. Ратников и др.; под общ. ред. А.С. Телегина. – М.: Металлургия, 1970. – 528 с.
15. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Учеб. пособие для вузов / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев, В.Г. Лисиенко, А.С. Телегин, Ю.Г. Ярошенко. 2-е изд. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
16. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Учебник для вузов / Я.М. Гордон, Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев и др. 3-е изд. – М.: Металлургия, 1993. – 368 с.
17. Теория и практика теплогенерации. Учебник / Под ред. В.И. Лобанова, С.Н. Гущина. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2005. – 379 с.
18. Топливо и расчеты его горения. Учеб. пособие / С.Н. Гущин, Л.А. Зайнуллин, М.Д. Казяев, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: изд. УГТУ-УПИ, 2007. – 105 с.
19. Технический отчет по работе «Проведение балансовых испытаний методической печи ТПЦ № 1 для нагрева заготовок из стали 09Г2С». – Екатеринбург: ОАО «Уралэнергочермет», 2014. – 42 с.
20. Расчет нагревательных и термических печей. Справочник / С.Б. Василькова, М.М. Генкина, В.Л. Гусовский и др. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
21. Дружинин Г.М., Лошкарев Н.Б., Ашихмин А.А., Барташ М.Р., Нелюбин С.А., Коробейников А.В. Эффективность регенеративной системы отопления нагревательной печи // *Сталь*. 2010. № 3. С. 71 – 75.

Поступила в редакцию 16 мая 2018 г.

После доработки 19 ноября 2018 г.

Принята к публикации 19 ноября 2018 г.

## INVESTIGATING THE THERMAL WORK AND CONSTRUCTION OF ANNULAR FURNACE ON “CHELYABINSK PIPE-ROLLING PLANT” PJSC TO IMPROVE HEAT TECHNICAL INDICATORS OF ITS WORK

*N.V. Shchukina*<sup>1</sup>, *N.A. Cheremiskina*<sup>1</sup>, *N.B. Loshkarev*<sup>1,2</sup>,  
*V.V. Lavrov*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”), Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** High performance of rolling and tube rolling mills, good quality of finished metal products can be obtained by heating metal billets with minimal oxidation and decarburization in heating furnaces. Such conditions can be provided by annular furnaces, which are widely used in the rolling production of pipes, railway wheels and tires. High-quality heating allows us to obtain the structure of metal products with given thermal and working properties, as well as the plasticity necessary for subsequent mechanical processing. In this paper, we consider thermal engineering features of the operation of an annular furnace for heating billets before rolling at “Chelyabinsk Tube Rolling Plant” PJSC (ChTPZ). The problems arising during the operation of thermal unit were analyzed: high specific fuel consumption for billets heating; high temperatures of walls external surfaces and roof external surfaces; low heating rate of the billet; large amount of air leaks into the furnace working space. Also design of gas-burning devices does not provide the possibility of regulating gas supply in a large range of loads, up to a periodic complete shutdown. And thermal energy of waste gases is practically not used. Metal heating has been analyzed and annular furnace heat balance has been compiled. Analysis of the results of computational studies has revealed factors that reduce energy efficiency of the existing furnace design. The measures were proposed for its modernization in order to reduce fuel consumption and to increase productivity (use of fibrous refractory materials, regenerative burners, non-water-cooled partitions, etc.). To assess impact of the proposed measures, the furnace heat balance after its systems reconstruction and assembly has been compiled, the main indicators of the furnace heat operation have been determined. When implementing proposed measures, significant economic effect is expected, including improvement in quality of metal heating while reducing fuel consumption and increasing productivity of the unit. In particular, after furnace reconstruction it is expected to increase the total (by 18.1 %) and heat (by 31.0 %) efficiency of the furnace, and to decrease (to 48.3 kg conditional fuel/ton) specific fuel consumption.

**Keywords:** annular furnace; heat balance; resource saving; reconstruction, technical re-equipment, thermal efficiency, fuel saving.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-6-431-437

### REFERENCES

1. Druzhinin G.M., Distergeft I.M., Leont'ev V.A., Maslov P.V., Lobanov V.I. Reconstruction of annular furnace for billet heating. *Steel in Translation*. 2005, vol. 35, no. 3, pp. 45–48.
2. Andreev S.M., Parsunkin B.N. Billet heating control fuel-saving solution in the rolling mill furnace. *2017 Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings, 19 October 2017*, article no. 8076167.
3. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bushmanova M.V. Optimization of controlling the thermal conditions of heating furnaces. *Stal'*. 2003, no. 9, pp. 65–67. (In Russ.).
4. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Nuzhin D.V., Volkov A.V. Information employed in fuel-conserving control of metal heating. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 9, pp. 792–796.
5. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinskii D.Yu. Energy-saving heating of continuous-cast billet. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 4, pp. 384–387.
6. Parsunkin B.N., Andreev S.M. Requirements in energy-saving metal heating. *Steel in Translation*. 2002, vol. 32, no. 2, pp. 37–41.
7. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S., Akhmetov T.U. Energy-saving optimal control over heating of continuous cast billets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 79, no. 9-12, pp. 1797–1803.
8. Andreev S.M., Bushmanova M.V., Parsunkin B.N. Optimal thermal-load distribution over the zones of a continuous furnace to minimize fuel costs. *Electrical-engineering Systems: An Interuniversity Collection*. Magnitogorsk: MGTU, 2000, no. 5, pp. 301–307.
9. Chen D., Lu B., Dai F., Chen G., Yu W. Variations on billet gas consumption intensity of reheating furnace in different production states. *Applied Thermal Engineering*. 2018, vol. 129, pp. 1058–1067.
10. Guangjun C. The problem and energy-saving of reheating furnace. *Energy Metall. Indust.* 2008, no. 27, pp. 32–35.
11. Steinboeck A., Wild D., Kugi A. Energy-efficient control of continuous reheating furnaces. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 2013, vol. 15, no. 1, pp. 359–364.
12. Lu B., Chen D., Chen G., Yu W. An energy apportionment model for a reheating furnace in a hot rolling mill – A case study. *Applied Thermal Engineering*. 2017, vol. 112, pp. 174–183.
13. Dong W., Chen H. Strategy of rolling delay on reheating furnace. *Kang T'ieh / Iron and Steel (Peking)*. 2004, vol. 39, no. 1, pp. 55–58.
14. Kitaev B.I., Zobnin B.F., Ratnikov V.F. etc. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei* [Heat engineering calculations of metallurgical furnaces]. Telegin A.S. ed. Moscow: Metallurgiya, 1970, 528 p. (In Russ.).
15. Zobnin B.F., Kazyayev M.D., Kitaev B.I., Lisienko V.G., Telegin A.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei. Ucheb. posobie dlya vuzov* [Thermal calculations of metallurgical furnaces. University manual]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 360 p. (In Russ.).
16. Gordon Ya.M., Zobnin B.F., Kazyayev M.D., Kitaev B.I. etc. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei. Uchebnyk dlya studentov vuzov* [Thermal calculations of metallurgical furnaces. Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1993, 368 p. (In Russ.).
17. *Teoriya i praktika teplogeneratsii: uchebnyk* [Theory and practice of heat generation: Textbook]. Lobanov V.I., Gushchin S.N. eds. Ekaterinburg: izd. UGTU-UPI, 2005, 379 p. (In Russ.).
18. Gushchin S.N., Zainullin L.A., Kazyayev M.D., Yur'ev B.P., Yaroshenko Yu.G. *Toplivo i raschety ego goreniya: uchebnoe posobie* [Fuel and burning calculations: Manual]. Ekaterinburg: izd. UGTU-UPI, 2007, 105 p. (In Russ.).
19. *Tekhnicheskii otchet po rabote “Provedenie balansovykh ispytaniy metodicheskoi pechi TPTs № 1 dlya nagreva zagotovok iz stali 09G2S”* [Technical report on “Balance tests of continuous furnace Pipe Rolling Shop no. 1 for 09G2S steel billets heating”]. Ekaterinburg: OAO “Uralenergochermet”, 2014, 42 p. (In Russ.).
20. Vasil'kova S.B., Genkina M.M., Gusovskii V.L., Lifshits A.E., Masalovich V.G., Perimov A.A., Spivak E.I., Tymchak V.M. *Raschet nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei: Sprav. izd.* [Calculation of

heating and thermal furnaces: Ref. guide]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 480 p. (In Russ.).

21. Druzhinin G.M., Loshkarev N.B., Ashikhmin A.A., Bartash M.R., Nelyubin S.A., Korobeinikov A.V. Efficiency of regenerative heating in furnaces. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 277–280.

**Information about the authors:**

*N.V. Schukina*, MA Student of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (n.v.shchukina@urfu.ru)

*N.A. Cheremiskina*, MA Student of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (n.a.cheremiskina@urfu.ru)

*N.B. Loshkarev*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

(nb.loshkarev@urfu.ru)

*V.V. Lavrov*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (v.v.lavrov@urfu.ru)

Received May 16, 2018

Revised November 19, 2018

Accepted November 19, 2018