

14. Г р е ч и х и н, Л. И. Современная энергетика. Пути и методы развития и применение на транспорте / Л. И. Гречихин, Н. Г. Куць // Наукові нотаткі. – 2010. – Вып. 28. – С. 162–165.

15. Г р е ч и х и н, Л. И. Современная аэродинамика полета летательных аппаратов и возможности компьютерного моделирования / Л. И. Гречихин // АВИА-2007: материалы VIII междунар. науч.-техн. конф. – Киев: НАУ, 2007. – Т. 2. – С. 33–95.

16. Л и г у м, Т. И. Аэродинамика самолета ТУ-134А / Т. И. Лигум. – М.: Транспорт, 1975. – 320 с.

17. К р ю к о в, А. М. Конструкция и летная эксплуатация двигателя D-30 2 сер. / А. М. Крюков. – М.: Воздушный транспорт, 1975. – 198 с.

Представлена кафедрой  
технологии и методики преподавания

Поступила 18.01.2011

УДК 539.3:669.046

## **МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО И МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВ**

**Канд. физ.-мат. наук ГЕРМАН М. Л., канд. техн. наук КАБИШОВ С. М.,  
инж. ОЗНОБИШИН А. А.**

*РУП «БЕЛТЭИ»*

В настоящее время перед белорусскими предприятиями стоит задача модернизации печного парка. Способы повышения эффективности использования топлива и электроэнергии в процессах тепловой обработки различных изделий и материалов неоднократно обсуждались на страницах ведущих изданий республики, а также за рубежом [1, 2 и др.]. Вместе с тем, опыт эксплуатации нагревательных устройств различной конструкции, а также результаты экспериментальных исследований, полученные в условиях действующего производства, показывают, что не всегда за счет использования современного оборудования и материалов можно добиться желаемого результата в плане сокращения энергозатрат.

В работе выполнен анализ энерготехнологических характеристик двух нагревательных печей: печи с комбинированным подом стана 320 ПО «Белорусский металлургический завод» и проходной толкательной печи для нагрева заготовок перед штамповкой ПНП-300, установленной в кузнечном цехе ОАО «МАЗ».

Конструктивные и технологические параметры печи с комбинированным подом стана 320 приведены в табл. 1, аналогичные характеристики проходной печи ПНП-300 – в табл. 2.

Таблица 1

## Техническая характеристика нагревательной печи стана 320 ПО «БМЗ»

Наименование	Характеристика
1. Назначение печи	Нагрев заготовок перед прокаткой
2. Тип печи	Печь с комбинированным подом (шагающие балки, шагающий под)
3. Размер нагреваемых заготовок: • сечение, мм <sup>2</sup> ; • длина, м	125×125 До 12
4. Температура металла: • перед загрузкой, °С; • перед выдачей, °С	20 150–1200
5. Длина пода, м	29,3
6. Максимальная производительность печи, т/ч	2500
7. Топливо, низшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup> (ккал/м <sup>3</sup> )	Газ природный, $Q = 33,5$ МДж/м <sup>3</sup> (8000 ккал/м <sup>3</sup> )
8. Номинальный расход газа на печь, м <sup>3</sup> /ч	7000
9. Номинальная тепловая мощность печи, МВт	67
10. Расход воздуха для горения, м <sup>3</sup> /ч	77000
11. Максимальная температура подогрева воздуха, °С	450
12. Тип и количество горелок, шт.	Дутьевые с регулируемой длиной факела – 6 шт.; плоскопламенные – 96 шт.
13. Тип рекуператора нагрева воздуха	Трубчатый

Таблица 2

## Техническая характеристика нагревательной печи ПНП-300 ОАО «МАЗ»

Наименование	Характеристика
1. Назначение печи	Нагрев заготовок перед штамповкой
2. Обрабатываемый материал	Сталь 35, 40, 45, 40Х, 40ХН, 12ХНЗА, 18ХГТ, 12ХГТ и др.
3. Размер заготовок: • диаметр, мм; • длина, мм	50–150 170–900
4. Температура металла: • перед загрузкой, °С; • перед выдачей, °С	20–200 (после разлива на МНЛЗ) 1250 ± 10
5. Площадь полезного пода, м <sup>2</sup>	4,75
6. Расчетная максимальная производительность печи, кг/ч	2500
7. Топливо, низшая теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup> (ккал/м <sup>3</sup> )	Газ природный, $Q = 33,5$ МДж/м <sup>3</sup> (8000 ккал/м <sup>3</sup> )
8. Номинальный расход газа на печь, м <sup>3</sup> /ч	110
9. Номинальная тепловая мощность печи, МВт	1,0
10. Давление газа, кПа: • в подводящем газопроводе; • перед горелками	40 3–6
11. Расход воздуха для горения, м <sup>3</sup> /ч	1100
12. Давление воздуха перед печью, кПа	5–6
13. Давление (разрежение) в печи, Па	1–(-2)
14. Максимальная температура подогрева воздуха, °С	400
15. Тип и количество горелок (фирма «Кромшредер», Германия), шт.	Плоскопламенные ВЮ 140 (2 шт.), ВЮ 100 (1 шт.)
16. Тип рекуператора нагрева воздуха	Радиационно-конвективный

Предметом анализа в данной работе является сравнение коэффициента полезного действия указанных печей при изменении производительности. Вопрос влияния производительности на КПД проходных пламенных печей неоднократно обсуждался в технической литературе [3–8]. Но фактические данные, полученные в условиях действующего производства на современных печах, на наш взгляд, по-прежнему представляют как практический, так и научный интерес. С одной стороны, детальный анализ этих данных позволит разработать организационные и технологические мероприятия, обеспечивающие реальную экономию топлива, а с другой – даст возможность исследователям и конструкторам оборудования, а также руководству промышленных предприятий сформулировать требования, предъявляемые к новому оборудованию.

Данные, представленные ниже, в первом случае получены в процессе экспериментальных исследований на печи стана 320, а во втором – при проведении пусконаладочных работ нагревательной печи ПНП-300.

С целью уменьшения погрешности при определении реального КПД печей в процессе анализа результатов рассматривались показатели, соответствующие периодам стабильной работы оборудования в течение не менее одного часа. Добиться таких условий при эксплуатации печи ПНП-300 в кузнечном цехе ОАО «МАЗ» сложно, так как производительность печи напрямую зависит от производительности кузнеца, осуществляющего операцию штамповки, и другого технического персонала, а также от стабильности работы прочего оборудования, работающего в одной технологической цепи с печью (пресс для обрезки облоя, раскатной станок).

По результатам проведения пусконаладочных работ печи ПНП-300 были выполнены расчеты теплового баланса. На рис. 1 приведены зависимости часового расхода топлива и КПД от производительности печи.

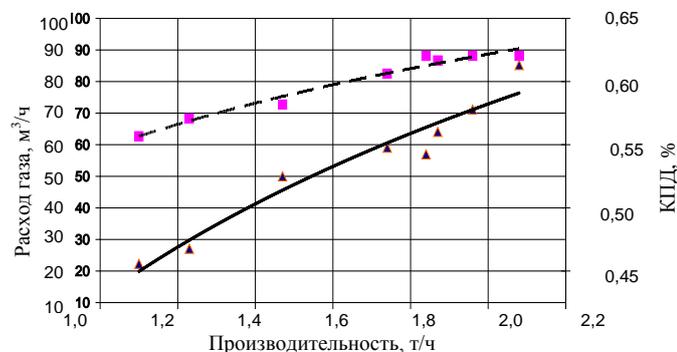


Рис. 1. Зависимость часового расхода природного газа и КПД от производительности печи ПНП-300 по результатам пусконаладочных работ

Анализ зависимостей, представленных на рис. 1, показывает, что КПД печи по мере роста производительности повышается. Причем при увеличении производительности от 1,1 до 2,1 т/ч рост составляет более 15%. Очевидно, что с целью повышения эффективности использования топлива целесообразно эксплуатировать нагревательное оборудование с производительностью, максимально близкой к номинальному значению.

В процессе выполнения балансовых испытаний нагревательной печи стана 320 РУП «БМЗ» также были получены данные о расходе топлива

и определен КПД печи при работе в различных режимах. Зависимость удельного расхода природного газа на нагрев заготовок сечением 125×125 мм из стали ст. 3 от производительности представлена на рис. 2.

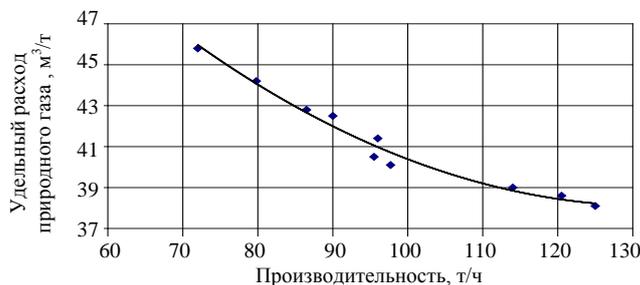


Рис. 2. Зависимость удельного расхода природного газа от производительности нагревательной печи стана 320

С целью сравнения показателей двух печей различных типов, мощности и размеров построим зависимости КПД исследуемых агрегатов от их относительной производительности (отношение фактической производительности к номинальной). Результаты для печи стана 320 и ПНП-300 представлены на рис. 3.

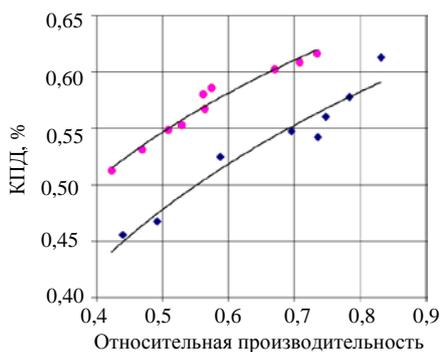


Рис. 3. Зависимость КПД нагревательных печей стана 320 (РУП «БМЗ») и ПНП-300 (ОАО «МАЗ») от производительности ( $p/p_{ном}$ )

Обе зависимости имеют почти линейный характер. При этом очевидно, что производительность нагревательной печи стана 320 оказывает практически такое же влияние на ее КПД, как и печи ПНП-300. При минимальной зафиксированной в процессе исследований производительности (0,42 от номинальной 170 т/ч) КПД печи стана 320 составил 51,3 %, а при максимальной (0,74 от номинальной) – 61,6 %. То есть при увеличении производительности на  $0,32p_{ном}$  КПД печи вырос на 10,3 %.

У печи ПНП-300 при повышении относительной производительности от  $0,44p_{ном}$  до  $0,75p_{ном}$  КПД возрастает от 45,6 до 56 %. Фактический рост КПД составляет 10,4 % при изменении производительности на  $0,31p_{ном}$ . Как видим, степень зависимости КПД от производительности у исследуемых печей практически одинакова.

Вместе с тем, представляет интерес выявление причин существенных различий между уровнем КПД данных печей. Как видно из рис. 3, практи-

чески во всем диапазоне наблюдаемых режимов работы КПД печи стана 320 в среднем на 5,5–6,0 % больше, чем у печи ПНП-300.

С целью решения данной задачи рассмотрим сравнительную диаграмму основных статей расхода тепловых балансов исследуемых печей (рис. 4).

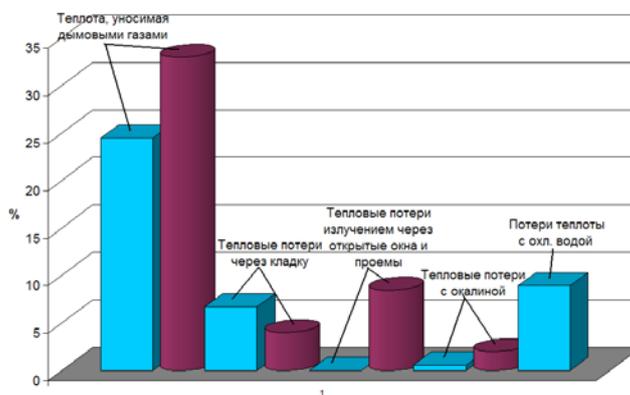


Рис. 4. Сравнительная диаграмма статей расхода тепловых балансов нагревательной печи стана 320 (прямоугольная призма) и печи ПНП-300 (цилиндрическая призма)

В результате анализа технических характеристик исследуемых печей и данных, представленных на рис. 4, причины, приводящие к снижению энергоэффективности нагревательного оборудования, а также методы их устранения условно подразделим на три группы:

- конструктивные;
- технологические;
- организационные.

На примере объектов нашего исследования выделим причины более высокого КПД нагревательной печи стана 320 по сравнению с печью ПНП-300.

1. Как видно из рис. 4, в нагревательной печи ПНП-300 значительно выше потери теплоты с уходящими газами (до 35–36 %). Это объясняется двумя причинами: небольшой длиной методической зоны и высокими температурами в рабочем пространстве печи. Общая длина печи ПНП-300 и, как следствие, длина методической зоны ограничены габаритами рабочей площадки и расположением другого технологического оборудования в кузнечном цеху ОАО «МАЗ». Температурный режим согласно действующей технологии должен обеспечивать температуру нагрева заготовок перед штамповкой до 1250 °С (и более), для чего в сварочной и томильной зонах необходимо поддерживать температуру на уровне 1320–1350 °С.

С одной стороны, в печи стана 320 длина методической зоны составляет около 9 м (30,7 % от общей длины пода). Это позволяет более эффективно использовать теплоту дымовых газов на подогрев металла и тем самым улучшить энерготехнологические параметры печи. С другой стороны, максимальная температура в сварочной и томильной зонах печи стана 320 не превышает 1220 °С. Это способствует тому, что на выходе из рабочего пространства дымовые газы имеют более низкую температуру.

Для того чтобы оценить, насколько сильно на величину КПД печи ПНП-300 влияет температурный режим нагрева заготовок, были выполнены дополнительные расчеты. В них принимали, что температура нагрева

металла понижена в среднем до 1170 °С, т. е. до средней температуры нагрева металла в печи стана 320. В результате было установлено, что в абсолютном выражении расходные статьи теплового баланса уменьшились, а в относительном выражении «полезная» доля теплоты возросла приблизительно на 1,5 %, т. е. КПД составил около 53,5 % при производительности 1,5 т/ч ( $0,6\rho_{\text{ном}}$ ).

На основании сказанного можно сделать вывод о том, что при существующей конструкции печи понижение температуры нагрева незначительно повлияет на энерготехнологические характеристики печи ПНП-300. Тем не менее следует отметить, что более низкая температура положительно отразится на долговечности футеровки и прочего оборудования печи, а также позволит значительно уменьшить потери металла с окалиной.

2. Согласно результатам, представленным на диаграмме (рис. 4), печь ПНП-300 отличается от печи стана 320 значительными потерями теплоты излучением через открытое торцевое окно выгрузки (около 8,5 % от общего объема тепловых затрат). С одной стороны, это обусловлено особенностями технологии (ручная выгрузка заготовок из печи), с другой – высокой температурой в томильной зоне печи (1330–1350 °С).

Печь стана 320 имеет боковые окна погрузки и выдачи заготовок. Эти операции на стане 320 механизированы, и в процессе погрузки и выдачи заготовка перекрывает собой значительную часть окна, что уменьшает тепловые потери.

3. Еще одной причиной более эффективного использования топлива в нагревательной печи стана 320 является полная автоматизация процессов загрузки, нагрева, выгрузки из печи и пластической деформации заготовок на стане 320. Печь в течение длительных периодов времени (смена и более) работает в стационарном режиме. В условиях кузнечного производства такую стабильность эксплуатации обеспечить весьма сложно. Во-первых, значительное влияние на величину производительности оказывают физическое состояние и квалификация кузнеца, а во-вторых, в работе периодически возникают незапланированные остановки при необходимости наладки штампа, пресса для обрезки облоя, раскатного станка, т. е. оборудования, которое работает с печью в одной технологической цепи. Это приводит к перегреву металла, увеличению потерь металла с окалиной и перерасходу топлива.

Таким образом, анализ представленной информации позволил установить основные причины перерасхода топлива при нагреве заготовок перед штамповкой в проходной печи толкательного типа в условиях кузнечного производства ОАО «МАЗ» по сравнению с методической печью с комбинированным подом прокатного стана 320 ПО «БМЗ».

## ВЫВОДЫ

Анализ представленной информации позволяет сформулировать ряд рекомендаций, направленных на снижение топливопотребления и актуальных как для новых, так и для действующих нагревательных печей.

1. При строительстве новых и модернизации действующих печей кузнечного и металлургического производств целесообразно увеличивать

длину методической зоны (конструктивный метод). Данный вывод неоднократно делался другими исследователями на основании теоретических изысканий и подтверждается нашими экспериментальными и расчетными данными.

2. В небольших нагревательных печах с короткой методической зоной и нестабильным режимом работы необходимо управлять процессом нагрева с помощью современных АСУ ТП. В случае неплановых остановок следует автоматически снижать мощность горелочных устройств в отапливаемых зонах до необходимого минимума либо вообще их отключать, а также закрывать заслонки окна погрузки и выдачи заготовок. В методических печах металлургического производства, имеющих большую длину и работающих практически в стационарном режиме, как показывает опыт наших исследований, весьма эффективных результатов позволяет добиться совершенствование температурных режимов нагрева [9, 10]. Основной эффект при этом достигается за счет перераспределения тепловой мощности между зонами по длине печи: в первых по ходу металла зонах мощность (температура) понижается, а в последних – повышается. Ограничением скорости «форсированного» этапа нагрева служит допустимый уровень деформаций и термонапряжений, который определяется расчетным путем [6]. Данные рекомендации относятся к технологическим мероприятиям.

3. На предприятиях с крупными объемами производства целесообразно подбирать номенклатуру продукции и оборудование, работающее в одной технологической цепи с нагревательной печью таким образом, чтобы сократить диапазон снижения производительности относительно номинального значения (организационные мероприятия). Это обеспечит высокую эффективность использования топлива и высокий КПД нагревательного оборудования.

4. Наибольший эффект от обновления парка нагревательного оборудования на действующих предприятиях машиностроительного и металлургического производств может быть получен в случае комплексной модернизации всего производства, включающей замену и автоматизацию прочего технологического оборудования, работающего с печью в одной технологической цепи. Замена только нагревательных печей может не дать ожидаемого эффекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман, М. Л. Перспективы и методы повышения энергоэффективности машиностроительного производства за счет модернизации газовых печей / М. Л. Герман, С. М. Кабишов // Энергия и Менеджмент. – 2009. – № 2. – С. 16–19.
2. Тимошпольский, В. И. Концепция реконструкции и модернизации парка нагревательных печей металлургических и машиностроительных предприятий Республики Беларусь: от теории к практике / В. И. Тимошпольский, М. Л. Герман // Литье и металлургия. – 2007. – № 2. – С. 21–28.
3. Глинков, М. А. Основы общей теории печей / М. А. Глинков. – М.: Металлургия, 1962. – 575 с.
4. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В. И. Тимошпольский [и др.]. – Минск: Вышэйш. шк., 1992. – 217 с.
5. Спивак, Э. И. Нагревательные печи с шагающим подом и балками / Э. И. Спивак // Проектирование металлургических печей. – 1978. – № 6. – 30 с.
6. Тимошпольский, В. И. Стальной слиток. – Т. 3: Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова. – Минск: Белорусская наука, 2001. – 879 с.

7. К р и в а н д и н, В. А. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей: справ. / В. А. Кривандин, Ю. П. Филимонов. – М.: Металлургия, 1986. – Т. 1.

8. И в а н ц о в, Г. П. Нагрев металла: теория и расчет / Г. П. Иванцов. – Свердловск; М.: Металлургиздат, 1948. – 191 с.

9. О с н о в н ы е методы оптимизации режимов нагрева металла / В. И. Тимошпольский [и др.] // Литье и металлургия. – 2000. – № 3. – С. 68–73.

10. М а т е м а т и ч е с к о е моделирование сопряженного теплообмена в нагревательных печах с подвижным подом / В. И. Тимошпольский [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79, № 3. – С. 3–11.

Поступила 03.11.2010

УДК 621.182.3

## **ПЕРЕВОД ВОДОГРЕЙНОЙ КОТЕЛЬНОЙ В РЕЖИМ МИНИ-ТЭЦ\***

**Докт. техн. наук БАЙРАШЕВСКИЙ Б. А.**

В составе производственных и отопительных водогрейных котельных, как правило, имеется паровой котел для обеспечения потребностей в паре. В ряде случаев решение проблемы одновременного производства горячей воды и пара осуществляется путем установки комбинированных пароводогрейных котлов [1, 2] или расширителей и прочих паросепарирующих устройств, позволяющих получать насыщенный пар низких параметров из перегретой воды. Основным недостатком получения пара из перегретой воды является его малая доля по сравнению с попутным дренажом той же температуры. Соответствующие меры конструктивного и технологического характера по снижению этого недостатка приводят к удорожанию установки и, по мнению специалистов [1, 2], оказываются неконкурентоспособными в сравнении с вариантом, положим, двухконтурных котлов.

Известные разработки конструкций турбин, работающих на насыщенном паре [3, 4], позволяют несколько по-иному оценить эффективность применения паросепарирующих устройств в совокупности с работой водогрейных котлов. В Беларуси идея использования водогрейных котлов посредством расширителя в качестве источника питания паровой турбины была предложена проф. В. К. Балабановичем, реализация которой способствовала бы значительному увеличению спроса разработанных им же конструкций турбин [5]. Здесь следует добавить, что положительные тенденции к переводу теплосетей на независимые схемы теплоснабжения также перспективны, так как позволяют использовать высокотемпературные потоки воды в пределах тепловой схемы котельной. Это позволяет увеличить температурный напор в водоводяном бойлере сетевой воды, что, несомненно, способствует оптимизации его конструкции и снижению металлоемкости поверхностей нагрева за счет возрастания температурного напора.

\* Печатается в порядке обсуждения.