

УДК 669.04

## РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГАЗОПЛАМЕННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ НАГРЕВА И ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛА

Доктора техн. наук, профессора ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,  
НЕСЕНЧУК А. П., ТРУСОВА И. А.,  
асп. МЕНДЕЛЕВ Д. В., канд. физ.-мат. наук ГЕРМАН М. Л.

*Белорусский национальный технический университет,  
Научно-исследовательское и проектное республиканское унитарное предприятие  
«Белорусский теплоэнергетический институт»*

Мировые тенденции в машиностроении свидетельствуют о том, что машиностроительная отрасль играет в экономике развитых стран определяющую роль. Неслучайно в последние два-три года многие специалисты обратили внимание на модернизацию машиностроительных предприятий и усовершенствование технологий. Сегодня невозможно решать проблемы машиностроения в отрыве от тенденций развития как смежных отраслей (например, металлургической), так и экономики в целом.

Однако развитие машиностроения даже в такой развитой стране, как Россия, нельзя назвать в настоящее время эффективным и динамичным. Для российской машиностроительной отрасли характерны следующие показатели: производительность труда на порядок ниже данного показателя машиностроения США; уровень использования производственных мощностей достиг в 2006 г. 75 %; число предприятий, осуществляющих инновации, составляет всего 12 %. Многие эксперты отмечают, что российское машиностроение вплотную подошло к порогу максимальной изношенности оборудования. При его нынешнем состоянии темпы перевооружения должны составлять 10–12 % в год [1].

Необходимость реконструкции машиностроительной отрасли актуальна не только в Российской Федерации, но и в других странах СНГ с энергоемким внутренним валовым продуктом (Украина, Беларусь).

Так, на международном научно-техническом конгрессе «ОТТОМ-8» (Харьков, 2007 г.) обсуждались вопросы энерго- и ресурсосбережения в термических производствах промышленных предприятий стран СНГ. Отмечалось, что практически на всех промышленных предприятиях стран

СНГ существующие термические производства оснащены устаревшим морально и физически оборудованием, которое потребляет огромное количество энергоносителей, имеет низкий КПД и в ряде случаев представляет угрозу окружающей среде. Применительно к термическим производствам достижение эффекта по энергосбережению возможно при реализации комплекса мероприятий: организационных, исследовательских, технологических, конструкторских, а также рациональной эксплуатации термического оборудования в условиях промышленного производства [2].

Конкурентоспособность собственного машиностроения может быть подкреплена программой модернизации производства при прямой государственной поддержке, которую, например, оказывают своим промышленным предприятиям государства Евросоюза и Китая.

В 2007 г. Совет Министров Республики Беларусь утвердил Программу технического перевооружения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств на 2007–2010 гг., направленную на решение комплекса проблем, существующих в парке нагревательных и термических печей машиностроительной отрасли Республики Беларусь.

Специалистами Белорусского национального технического университета и Белорусского теплоэнергетического института выполнен комплексный анализ состояния парка нагревательных и термических печей, эксплуатируемых на машиностроительных предприятиях по состоянию на 1-й квартал 2008 г. (проанализировано более 300 единиц нагревательных и термических установок, которые в подавляющем большинстве (90 %) в качестве топливно-энергетических ресурсов используют природный газ).

Установлено, что 70–80 % основных конструкционных элементов нагревательных и термических печей, а во многих случаях и сами печи не модернизировались в течение 25 лет (рис. 1).

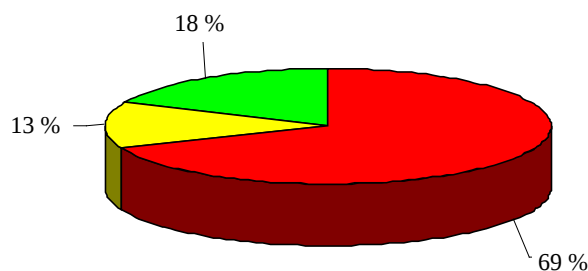


Рис. 1. Износ парка нагревательных и термических печей: ■ – срок эксплуатации более 25 лет; ■ – то же 20–25 лет; ■ – то же 20 лет

Около 70 % парка нагревательных и термических печей не оснащены системами рекуперации теплоты отходящих дымовых газов. Большая часть из оставшихся 30 % просто не удовлетворяет современным требованиям эффективного использования теплоты продуктов сгорания. Около половины парка нагревательных и термических печей функционирует в ручном режиме – без автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУТП). АСУТП другой половины парка не соответствует современным принципам и подходам при проектировании и использовании

таких систем. Природоохранные технологии по сокращению выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$ , как правило, и вовсе отсутствуют. Тепловой КПД находится в пределах 8–16 %.

При расчете и конструировании современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металлических изделий и заготовок априори необходимо учитывать все существующие технические решения, позволяющие в комплексе эффективно устранить большинство выявленных недостатков.

Однако учет абсолютно всех технических решений не позволит эффективно (с технико-экономической точки зрения) приблизить современную газопламенную установку к идеальному агрегату.

Наиболее эффективными теплотехническими факторами являются [3, 4]:

- рекуперация теплоты уходящих газов (увеличивает КПД на 15–22 %);
- использование современных газогорелочных устройств (повышает КПД на 6–8 %);
- снижение потерь теплоты через ограждения печи и на аккумуляцию теплоты кладкой (увеличивает КПД на 4–6 %);
- автоматизация теплового режима работы печи (экономия топлива – до 15 %).

**Принцип расчета и выбора типа рекуператоров при проектировании современных газопламенных установок машиностроительных и металлургических теплотехнологий.** На нагревательных и термических печах машиностроительного производства используются, как правило, блочные рекуператоры. Они собираются из нормализованных игольчатых элементов, изготавливаемых заводами в соответствии с разработанными типорядами 17,5 и 28.

При конструировании отдельно взятой проектируемой газопламенной установки для достижения максимальной эффективности проводится тепловой расчет рекуператора. Исходными формулами для конструкторского и поверочного расчетов рекуператора являются:

- уравнение теплопередачи

$$Q = kF \Delta t_{\text{ср}}, \text{ Вт (кВт)}; \quad (1)$$

- уравнение баланса теплоты

$$V_{\text{д}} (i'_{\text{д}} - i''_{\text{д}}) \eta = V_{\text{в}} (i''_{\text{в}} - i'_{\text{в}}), \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F$  – поверхность нагрева рекуператора,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta t_{\text{ср}}$  – средняя разность температур между продуктами сгорания и нагреваемым воздухом-окислителем,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V_{\text{д}}$  и  $V_{\text{в}}$  – соответственно секундные расходы дыма и воздуха-окислителя через дымовой и воздушный тракты рекуператора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $i'_{\text{д}}$  и  $i''_{\text{д}}$  – соответственно начальная (на входе в рекуператор) и конечная энтальпии (на выходе из рекуператора) продуктов сгорания,  $\text{МДж}/\text{м}^3$ ;  $i'_{\text{в}}$  и  $i''_{\text{в}}$  – энтальпии воздуха на входе и выходе из рекуператора (вторичный теплоноситель),  $\text{МДж}/\text{м}^3$ ;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий потери теплоты через кладку рекуператора ( $\eta = 0,7\text{--}0,9$ ).

При проектировании нового рекуператора обычно задаются три температуры: начальная и конечная температуры воздуха  $t'_в$  и  $t''_в$ , а также начальная температура дыма  $t'_д$ . Температура же продуктов сгорания, покидающих рекуператор, может быть найдена расчетным путем из уравнения

$$t''_д = t'_д - \frac{t''_в - t'_в}{\eta \frac{W_д}{W_в}} \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (3)$$

где  $t'_д$  – температура продуктов сгорания на выходе из печи (на входе в рекуператор),  $^\circ\text{C}$ ;  $\eta$  – коэффициент удержания теплоты;  $W_д$  и  $W_в$  – соответственно водяные эквиваленты дыма и воздуха,  $W_д = c_{p_д} V_д$  и  $W_в = c_{p_в} V_в$  ( $c_{p_д}$  и  $c_{p_в}$  – средние объемные изобарные теплоемкости дыма и воздуха).

Поверхность нагрева рекуператора  $F$  вычисляется из (1), в которое входят коэффициент теплопередачи  $k$  и средняя разность температур дыма и воздуха  $\Delta t_{ср}$ . Для конвективных рекуператоров  $\Delta t_{ср}$  изменяется вдоль поверхности нагрева по экспоненциальному закону. Среднее значение разности температур дыма и воздуха определяется как среднелогарифмическая разность.

Также важно отметить, что при проектировании рекуператора целесообразно установить максимально возможную, экономически оправданную степень рекуперации теплоты уходящих газов. Значение оптимальной степени рекуперации теплоты для конкретного значения температуры уходящих дымовых газов можно найти, исходя из минимума функции приведенных затрат на рекуператор и топливо при приравнении к нулю частных производных этой функции по оптимизируемому параметру:

$$\frac{\partial Z_p}{\partial P} = C_\tau \frac{\partial B_\Gamma}{\partial P} + C_p \frac{\partial F}{\partial P} = 0, \quad (4)$$

где  $Z_p$  – приведенные затраты по рекуператору и топливу, руб./год;  $P$  – степень рекуперации теплоты уходящих газов;  $B_\Gamma$  – расход топлива,  $\text{м}^3/\text{год}$  (или  $\text{кг}/\text{год}$ );  $F$  – площадь поверхности нагрева рекуператора,  $\text{м}^2$ ;  $C_\tau$  – стоимость топлива, руб./ $\text{м}^3$  (или руб./кг);  $C_p$  – приведенная годовая стоимость нагрева  $1 \text{ м}^2$  поверхности рекуператора, (руб./( $\text{м}^2 \cdot \text{год}$ )) [4, 5].

В [6] приведен пример проектирования рекуператора для газопламенных установок современных машиностроительных заводов с учетом (4).

**Принцип выбора типа горелочных устройств при проектировании современных газопламенных установок машиностроительных и металлургических теплотехнологий.** Горелочные устройства, функционируя в составе печного оборудования, должны удовлетворять общим техническим требованиям, регламентированным стандартами.

Одно из таких требований – обеспечение коэффициента расхода воздуха в допустимых пределах. Немаловажным требованием также является наличие на горелках современной системы охраны окружающей природной среды: низкий уровень выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$ ; принудительное удаление продуктов горения в дымовую трубу и рассеивание в атмосфере продуктов

горения, обеспечивающих допустимые приземные концентрации вредных веществ; управление процессом тепловой обработки в автоматическом режиме с использованием газоанализатора.

Горелочные устройства без предварительного смешения рекомендуется применять в следующих случаях: при необходимости обеспечения концентрированного подвода теплоты с помощью небольшого числа крупных горелок; для получения широких пределов регулирования тепловой мощности; при попеременной или одновременной работе на газовом или жидком топливе различных видов; при необходимости подогрева компонентов сгорания до высокой температуры.

Горелки с улучшенным смешением следует применять в тех случаях, когда допустимая длина факела ограничена и требуется концентрированный подвод значительного количества теплоты при сравнительно небольших размерах горелки либо необходимо создать факел специальной формы.

Горелки с полным предварительным смешением целесообразны для осуществления высокотемпературного нагрева при сжигании газов с низкой теплотой сгорания, а также при рассредоточенной подаче теплоты большим числом горелок с целью достижения высокой равномерности нагрева [4, 7].

После выбора типа горелочного устройства по назначению необходимо выбрать из типоряда именно то горелочное устройство, которое будет наиболее эффективно удовлетворять современным требованиям ресурсосбережения [8]:

1. Высокое содержание  $\text{CO}_2$  и малый объем уходящих газов:

$$\max(n_{\text{CO}_2}); \min(V_{\text{ух.г.}}).$$

2. Наличие избытка воздуха, но как можно меньшего:

$$\min(\alpha_{\text{в}}).$$

3. Наличие автоматизированной измерительной техники (для исключения неточности, связанной с наличием человеческого фактора) с выполнением ряда функций:

- $f_1 = f_1(B)$  – измерение расхода газа;
- $f_2 = f_2(p_{\text{нач}})$  – то же давления газа в месте его подведения;
- $f_3 = f_3(t'_{\text{в}})$  – то же температуры подаваемого воздуха;
- $f_4 = f_4(t'_{\text{д}})$  – то же температуры уходящих газов;
- $f_5 = f_5(n_{\text{CO}_2}, n_{\text{CO}}, n_{\text{O}_2})$  – то же содержания  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$  в уходящих

газах;

- $f_6 = f_6\left(\sum_{i=1}^n el_i\right)$  – химический анализ содержания сажи;

- $f_7 = f_7(p_{\text{окр}})$  – измерение давления в топочной камере и на входе в дымовую трубу.

**Выбор футеровочных и теплоизоляционных материалов при проектировании современных газопламенных установок машиностроительных и металлургических теплотехнологий.** В настоящее время при проектировании современных газопламенных установок применяют высокоэффективные огнеупорные и теплоизоляционные материалы, обеспечивающие надежную и долговечную работу печей при следующих температурах длительного применения (волокнистые материалы из базальтовых и муллитокремнеземистых волокон, вспененные материалы):

- до 750 °С – плиты и картоны из базальтовых волокон плотностью от 140 до 220 кг/м<sup>3</sup>;
- до 875 °С – перлитокерамику, пенодиатомит, вермикулит плотностью до 350 кг/м<sup>3</sup>;
- до 1200 °С – муллитокремнеземистые материалы: фетр, войлок и рулонный материал плотностью до 200 кг/м<sup>3</sup>;
- до 1500 °С – муллитокремнеземистые материалы: фетр, плиты на высокотемпературном связующем.

Футеровка из современных волокнистых материалов обеспечивает минимальные потери с поверхности печи и минимальные затраты энергии на ее разогрев после остановок. Поверхность футеровки не пылит и не разрушается при наличии воздушных потоков со скоростью до 6 м/с. Кроме того, конструкция футеровки обеспечивает простоту и удобство монтажа, а также достаточную ремонтпригодность. Конечный выбор материалов зависит от теплофизических и прочностных характеристик, стоимости 1 м<sup>2</sup> кладки и принимается после точных теплотехнических и экономических расчетов. Также для повышения радиационной составляющей теплового потока от футеровки в камере печи внутренний слой изоляции может быть покрыт огнеупорной светоотражающей обмазкой на основе микросфер из кварцевого стекла. При этом увеличение стоимости футеровки компенсируется ее значительными преимуществами по сравнению с футеровкой из штучных огнеупорных материалов.

**Основы проектирования АСУТП современной газопламенной установки.** Система автоматизированного управления технологическими процессами современной газопламенной установки должна включать в себя [3, 4]:

- технические средства (промышленный компьютер, блоки распределенного контроля и управления, газоанализатор);
- программные средства (программа автоматического управления технологическим процессом по заданному режиму);
- подпрограммы визуализации параметров технологического процесса, регистрации и хранения данных, а также обработки аварийных ситуаций.

В современных газопламенных установках АСУТП должна вести контроль процесса нагрева при наличии возможности управления процессом горения в ручном режиме – непосредственно с экрана промышленного компьютера, на котором установлена программная часть системы управления.

При управлении процессом должны контролироваться следующие параметры:

- температура в рабочем пространстве печи;
- температура нагрева первичного воздуха, подаваемого на горение;

- соотношение газ/воздух при любой мощности горелок;
- химический состав дымовых газов;
- температура дымовых газов перед рекуператором;
- температура дымовых газов перед дымососом;
- разрежение в печи.

При работе печи должны регистрироваться и сохраняться в памяти компьютера следующие параметры:

- температура в рабочей камере;
- температура нагреваемого металла;
- температура дымовых газов перед рекуператором;
- температура дымовых газов перед дымососом;
- температура футеровки;
- температура воздуха, подаваемого на горение;
- химический состав дымовых газов;
- расход воздуха и газа.

Необходимо наличие системы безопасности, которая будет обеспечивать прекращение подачи газа к горелкам с подачей световой и звуковой сигнализации при следующих событиях:

- недопустимое отклонение давления газа от заданного уровня;
- погасание пламени у горелки;
- понижение давления воздуха, подаваемого на горение, ниже заданного уровня;
- окончание цикла термообработки;
- прекращение тяги;
- прекращение подачи электроэнергии.

**Теплотехнический расчет лабораторной газопламенной установки, состоящей из современных эффективных модулей.** В качестве примера использования современных технических решений при конструировании газопламенных установок выполнен теплотехнический расчет газопламенной установки с выкатным подом (рис. 2), сконструированной специалистами НАН Беларуси и БНТУ [3, 4, 9].

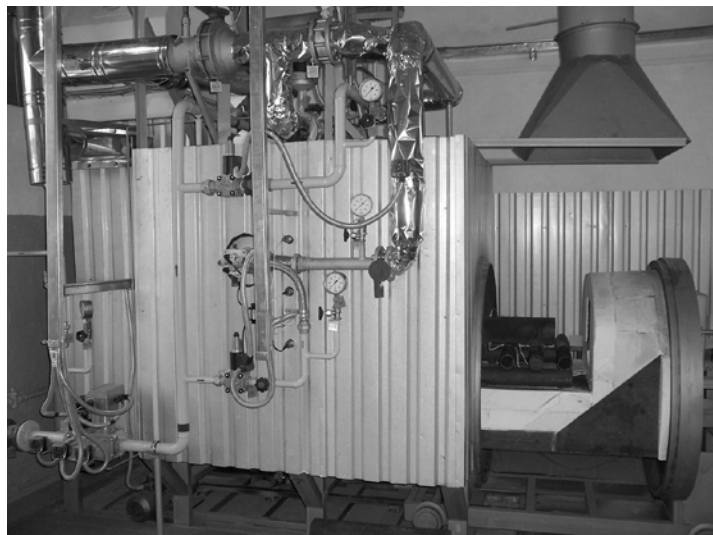


Рис. 2. Газопламенная установка ТГ с выкатным подом

Исходные и основные данные, необходимые для выполнения теплотехнического расчета и полученные расчетным путем для настоящей газопламенной установки (рис. 2) по методике, предложенной в [5, 10], приведены в табл. 1, 2 и на рис. 3.

Таблица 1

**Трехслойная схема футеровки**

| Слой       | Характеристика слоя                                                                       |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Внутренний | Плиты толщиной 100 мм, выдерживающие температуру до 1430 °С                               |
| Средний    | Плиты толщиной 100 мм, выдерживающие температуру до 1260 °С                               |
| Наружный   | Изоляция толщиной 100 мм, волокнистый материал Рагос, выдерживающий температуру до 700 °С |

Таблица 2

| Параметры садки                                          |                                                                    |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Заготовки*                                               | Блум (80×110×900 мм) – 9 шт.<br>(марка стали 30Х, масса – 61,2 кг) |
| Тип посадки*                                             | Заготовки боковой поверхностью примыкают друг к другу (пластина)   |
| Параметры печи                                           |                                                                    |
| Размер выкатного пода печи*                              | 900×1000 мм                                                        |
| Максимальная температура печи*                           | 1250 °С                                                            |
| Производительность печи**                                | 290 кг/ч                                                           |
| Наружная обмуровка*                                      | 1500×1600×1300 мм                                                  |
| Излучающая поверхность рабочего пространства печи*       | 900×1000×700 мм                                                    |
| Параметры нагрева                                        |                                                                    |
| Температурный график нагрева**:                          | Трехзонный                                                         |
| 1. Зона нагрева 0–1, $\tau_1$ ;                          | 1,37 ч                                                             |
| 2. Зона нагрева 1–2, $\tau_2$ ;                          | 0,46 ч                                                             |
| 3. Зона нагрева 2–3, $\tau_{\text{выд}}$                 | 0,08 ч                                                             |
| Коэффициент использования топлива**, $\eta_{\text{и.т}}$ | 0,65                                                               |

\* – исходные данные; \*\* – расчетные.

По методике, изложенной в [5, 10] (с учетом табл. 1, 2 и рис. 3), выполнен тепловой расчет газопламенной установки (рис. 6).

Уравнение баланса теплоты нагревательной печи записывается

$$BQ_{\text{и.т}}^p + Q_{\text{экз}} = Q_1 + 1,05(Q_{\text{о.к}} + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{в.под}}), \quad (5)$$

где  $B$  – расход топлива в печи, кг/ч;  $\eta_{\text{и.т}}$  – коэффициент использования теплоты топлива;  $Q_{\text{экз}}$  – теплота экзотермической реакции окисления садки;  $Q_1$  – теплота, пошедшая на нагрев садки;  $Q_{\text{о.к}}$  – потери теплоты через ограждающую конструкцию (стенки, свод и под);  $Q_{\text{изл}}$  – то же излучением через нижний проем печи при разгрузке и загрузке печи;  $Q_{\text{в.под}}$  – то же с выкатным подом.

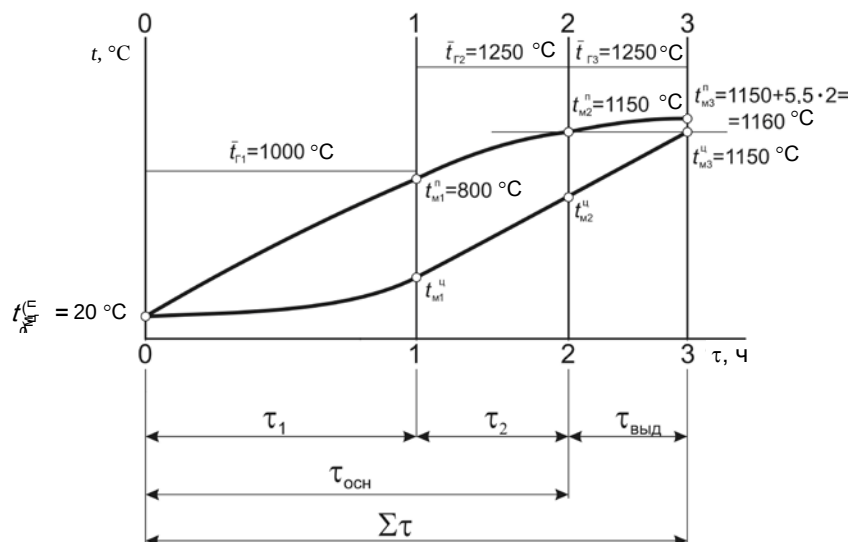


Рис. 3. Температурный график нагрева пластины размерами 110×720×900 мм из стали 30Х

Сводный тепловой баланс газопламенной установки (рис. 2) представлен в табл. 3.

Таблица 3

Сводный тепловой баланс газопламенной установки (рис. 2)

| Приходные статьи, кДж/ч                                                                                |               | Расходные статьи, кДж/ч                                                |                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| Химическая теплота сгорания топлива (с учетом КИТ)                                                     | 382200 (96 %) | Полезная теплота, затраченная на нагрев заготовок за все время нагрева | 213278 (53,5 %) |
| Теплота, полученная вследствие экзотермических реакций                                                 | 16388 (4 %)   | Теплота, теряемая через ограждающую конструкцию печи                   | 64166 (16,1 %)  |
|                                                                                                        |               | Теплота, теряемая за счет излучения                                    | 69714 (17,5 %)  |
|                                                                                                        |               | Теплота, теряемая с выкатным подом                                     | 42656 (10,7 %)  |
|                                                                                                        |               | Неучтенные потери                                                      | 8827 (2,2 %)    |
| Невязка теплового баланса: 0,01 %.<br>Удельный расход условного топлива: 58 кг у. т./т.<br>КПД: 36,3 % |               |                                                                        |                 |

Расчет теплотехнических показателей газопламенной установки (рис. 2) показал, что за счет использования современных эффективных технических и технологических решений при конструировании аналогичных установок их КПД может быть существенно увеличен (до 35–40 %) в зависимости от режима нагрева, а удельный расход условного топлива находится на уровне лучших мировых аналогов.

## ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ тенденций развития машиностроительной отрасли стран СНГ, а также состояния парка нагревательных и термических печей

основных машиностроительных предприятий Республики Беларусь по состоянию на 1-й квартал 2008 г.

2. Приведены наиболее эффективные с технико-экономической точки зрения технические решения при расчете и конструировании современных газопламенных установок для модернизации действующего парка нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий Республики Беларусь.

3. На примере созданной и запатентованной лабораторной газопламенной установки, которая сочетает в себе комплекс современных эффективных технических и технологических решений, выполнен расчет ее основных теплотехнических показателей. Удельный расход условного топлива составил 58 кг у. т./т, КПД печи – 36,3 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ч е м е з о в, С. В. Машиностроение – основа экономической мощи России: тез. докл. на учред. съезде общерос. обществ. орг. «Союз машиностроителей России» / С. В. Чемезов // Регионы России. – 2007. – № 9.

2. Ш у л а е в, В. М. Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении / В. М. Шулаев // Автомобильная промышленность. – 2007. – № 3.

3. Т и м о ш п о л ь с к и й, 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.

4. Т и м о ш п о л ь с к и й, В. И. Обзор основных направлений модернизации печного парка и совершенствование технологий нагрева и термической обработки слитков и заготовок в условиях современного машиностроительного предприятия / В. И. Тимошпольский, М. Л. Герман, Д. В. Менделев // Литье и металлургия. – 2007. – № 4.

5. М е т а л л у р г и ч е с к и е п е ч и. Теория и расчеты: учеб. в 2 т. / В. И. Губинский [и др.] // Минск: Белорусская наука, 2007. – Т. 2. – 832 с.

6. Р а с ч е т оптимальной температуры подогрева воздуха в рекуператоре на примере действующей термической печи современного машиностроительного завода с технико-экономической точки зрения / В. И. Тимошпольский [и др.] // Литье и металлургия. – 2008. – № 2.

7. М е т а л л у р г и ч е с к и е п е ч и. Теория и расчеты: учеб. в 2 т. / В. И. Губинский [и др.] // Минск: Белорусская наука. – 2007. – Т. 1. – 596 с.

8. Т е х н и ч е с к а я документация по эксплуатации жидкотопливных и газовых горелок // Завод жидкотопливных и газовых горелок GIER SCH, Германия.

9. П е ч ь с выкатным подом: пат. ВУ, МПК F 27B 3/00, F 27B 9/00, F 27 В 13/00 / В. И. Тимошпольский [и др.]. – № 4210 U; заявл. 22.03.2007; зарегистр. 15.11.2007 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2007. – № 6.

10. Н е с е н ч у к, А. П. Тепловые расчеты пламенных печей для нагрева и термообработки металла / А. П. Несенчук, Н. П. Жмакин // Минск: Вышэйш. шк., 1974. – 288 с.

Представлена кафедрой  
металлургических технологий

Поступила 20.03.2008