

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 669.04

**МЕНДЕЛЕВ**  
Дмитрий Владимирович

**ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ И КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ  
ДЛЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА**

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.16.02 – Metallургия черных,  
цветных и редких металлов

Минск, 2012

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **Тимошпольский Владимир Исаакович**,  
доктор технических наук, профессор, директор по науке и новой технике Научно-производственной группы компаний «НЕФТЕГАЗСТРОЙИЗОЛЯЦИЯ» (г. Киев, Украина), заслуженный деятель науки Республики Беларусь, лауреат Государственной премии Республики Беларусь

Официальные оппоненты: **Марукович Евгений Игнатьевич**,  
академик, доктор технических наук, профессор, директор ГНУ «Институт технологии металлов НАН Беларуси», лауреат Государственной премии БССР и Государственной премии Республики Беларусь;

**Стеблов Анвер Борисович**,  
доктор технических наук, главный научный сотрудник ОАО «АХК ВНИИМЕТМАШ» (г. Москва, Российская Федерация), лауреат Государственной премии Республики Беларусь

Оппонирующая организация ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Защита состоится «15» июня 2012 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.14 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 12, ауд. 310, тел. (факс) ученого секретаря (017) 292 54 06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета

Автореферат разослан «14» мая 2012 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор

И.А. Трусова

© Менделев Д.В., 2012  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

В Республике Беларусь в соответствии с задачами концепции энергетической безопасности наряду с мерами по созданию и реализации новых направлений дальнейшего развития энергетики (атомная энергетика, использование угольных энерготехнологий, местных видов топлива) особое внимание уделяют мероприятиям по энергосбережению в отраслях народного хозяйства, в первую очередь, в теплотехнологиях металлургических и машиностроительных производств, как наиболее энергоемких. Производство стального проката и готовых деталей машин и механизмов является базой промышленного комплекса Республики Беларусь. Сегодня в условиях Республики Беларусь производится около 500 тыс. т отливок из черных и цветных металлов на машиностроительных предприятиях, более 2 млн. т проката на металлургических предприятиях, при этом большая часть из них подвергается дальнейшей тепловой обработке в нагревательных и термических печах, средний термический коэффициент полезного действия которых для машиностроительного комплекса составляет 8–10 %, а средний удельный расход условного топлива для нагревательных проходных печей находится на уровне 310–320 кг у.т./т, при этом показатели лучших зарубежных аналогов составляют 45–50 % и 55–60 кг у.т./т соответственно. Очевидно, что назрела необходимость перевооружения парка печей машиностроительной отрасли с целью энергосбережения и повышения конкурентноспособности продукции, которая, в свою очередь, подкреплена программой модернизации производства при прямой государственной поддержке.

На основании этого выполненные исследования и расчеты в рамках диссертационной работы, направленные на разработку и совершенствование технологических и конструктивных параметров действующего парка нагревательных печей машиностроительных производств, обеспечивающих снижение удельного потребления топливно-энергетических ресурсов, а также повышение качества металлопродукции, являются исключительно актуальными.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами и темами.** Работа соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований, проводимых в Республике Беларусь в рамках «Программы технического переоснащения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств» на 2007–2010 гг. (Постановление Совета Министров Республики Беларусь № 1421 от 31.10.2007 г.) и на 2010–2015 гг. (Постановление Совета Министров Республики Беларусь № 882 от 09.06.2010 г.).

Диссертационная работа выполнялась в рамках заданий ГППНИ «Металлургия» (задание 1.17 «Разработка новых технических и технологических решений при модернизации газопечного оборудования и анализ их эффективности», № ГР 20081091, период выполнения – 2008 г.; задание 1.29 «Разработка и научное обоснование нормирования удельного расхода топлива нагревательных печей машиностроительного и металлургического производства для применения в промышленных теплотехнологиях нагрева и термической обработки», № ГР 20091219, период выполнения – 2009–2010 гг.), а также в рамках выполнения договоров с ОАО «МАЗ» (х/д № 117/60353/7349 «Разработка типового положения по расчету теплового баланса и коэффициента полезного действия газопламенных печей кузнечного и термического производства ОАО «МАЗ», № ГР 20081085, период выполнения – 2008 г.; х/д № 117/63354/7350 «Разработка и научное обоснование технических и технологических решений для реконструкции печного парка ОАО «МАЗ», № ГР 20081086, период выполнения – 2008 г.).

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является теплотехническое обоснование и разработка энергоэффективных технологий и конструкций промышленных печей для нагрева металла, использование которых позволит снизить энергоемкость выпускаемой металлопродукции (уменьшить удельный расход условного топлива печей, повысить коэффициент полезного действия печей и т.д.).

**Объектом исследования** являются промышленные печи для нагрева металла.

**Предметом исследования** являются закономерности процессов тепловой обработки стальных заготовок в печах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить комплексный анализ состояния парка печей для нагрева металла на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь и методов повышения их энергоэффективности (увеличения коэффициента полезного действия и коэффициента использования теплоты топлива, снижения удельного расхода условного топлива и т.д.) с целью оценки потенциала энергосбережения.

2. Осуществить балансовые испытания наиболее энергоемких агрегатов (нагревательных печей) машиностроительного комплекса с целью определения их фактических показателей энергоэффективности и разработки методики расчета этих показателей.

3. Рассчитать процессы теплообмена в нагревательных печах с целью рационализации их конструктивных и технических параметров, а также разработки для них энергоэффективных технологий нагрева металла

(перераспределение тепловой мощности горелочных устройств по длине печи, позволяющее повысить ее энергоэффективность).

4. Разработать методики по определению рациональных параметров конструктивных элементов нагревательных печей (рекуператор, футеровка) и разработать для них технические решения (выбор оптимальной температуры подогрева воздуха для горения, компоновки многослойных футеровок), направленные на повышение их энергоэффективности.

5. Внедрить разработанные методики на предприятиях Министерств промышленности и энергетики и организаций Министерства образования Республики Беларусь.

#### **Положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Комплексная методика оценки тепловой работы нагревательных печей, отличающаяся от известных учетом взаимосвязи коэффициента использования теплоты топлива ( $\eta_{т.т}$ ), коэффициента полезного действия печи ( $\eta_t$ ), удельного расхода условного топлива ( $b_t$ ), удельного расхода теплоты ( $q_t$ ), коэффициента рекуперации теплоты уходящих газов ( $\eta_p$ ), эквивалентного теплосодержания футеровки ( $K_{акк}$ ) и коэффициента использования оборудования ( $K_{и.о}$ ), позволяющая установить закономерности изменения основных теплотехнических показателей ( $\eta_{т.т}$ ,  $\eta_t$ ,  $b_t$ ) от коэффициента избытка воздуха и производительности печей проходного типа, использование которых позволяет определить показатели энергоэффективности печей.

2. Установленные на основании математического моделирования распределения тепловых мощностей горелочных устройств в рабочем пространстве нагревательных печей, не превышающие допустимых значений плотностей тепловых потоков на металл (по условиям термической прочности заготовок для конкретной марки стали), учитывающие газодинамику печной атмосферы и конфигурацию элементов рабочего пространства печи, участвующих в теплообмене, и позволяющие снизить  $b_t$  на 0,5–2,5 %.

3. Методика определения оптимальной температуры подогрева воздуха для горения в нагревательных печах непрерывного действия, отличающаяся от известных учетом производительности печи, удельной стоимости рекуператора (стоимость труб, крепежных элементов, дымососа, воздушного вентилятора, а также строительно-монтажных работ и технического обслуживания) и природного газа, и позволяющая установить экономически обоснованную степень рекуперации дымовых газов и выбрать конструкцию рекуператора, что позволяет снизить  $b_t$  на 5–30 %.

4. Новая методика выбора материала и конструкции футеровки, а также размера воздушного зазора между наружной поверхностью футеровки и металлическим кожухом в зависимости от температуры наружной поверхности футеровки, отличающаяся тем, что выбор материала и последовательности

слоев футеровки производится на основании максимального значения модуля температурного градиента для рассматриваемых теплоизоляционных материалов в определенном диапазоне температур, использование которой позволяет создать энергоэффективные конструкции многослойных футеровок и снизить  $b_T$  на 5–10 %.

**Личный вклад соискателя.** Совместно с научным руководителем Тимошпольским В.И. определены цель и задачи исследования, обсуждены результаты теоретических исследований. Совместно с соавтором работ Трусовой И.А. выполнен анализ существующих методов повышения энергоэффективности промышленных теплотехнологий машиностроительного производства. Совместно с Тимошпольским В.И. и соавтором работ Трусовой И.А. выполнены балансовые испытания нагревательных печей. Совместно с Тимошпольским В.И., Трусовой И.А. и соавтором работ Германом М.Л. разработана комплексная методика оценки тепловой работы нагревательных печей. Основные научные результаты (распределение тепловых мощностей горелочных устройств в рабочем пространстве нагревательных печей, методика определения оптимальной температуры подогрева воздуха для горения в нагревательных печах, методика выбора конструкции футеровки и размера воздушного зазора между наружной поверхностью футеровки и металлическим кожухом) получены непосредственно диссертантом.

**Апробация результатов диссертации.** Основные материалы диссертации доложены и обсуждены на XV Международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии», 7–9 октября 2008 г., Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина; Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия. Беларусь 2008», 22–23 октября 2008 г., г. Гомель, Беларусь; 7-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике», 22 апреля 2009 г., БНТУ, г. Минск; Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия. Беларусь 2009», 8–9 октября 2009 г., ФТИ НАНБ, г. Минск; Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия. Беларусь 2010», 22–23 ноября 2010 г., БНТУ, г. Минск.

**Опубликованность результатов диссертации.** По материалам диссертации опубликована 21 научная работа, включая 13 статей в рецензируемых научно-технических журналах и сборниках, 4 доклада и 2 тезиса докладов в трудах конференций, получено 2 патента Республики Беларусь на полезную модель. Общий объем материалов, опубликованных по теме диссертационной работы, составляет 10 авторских листов.

**Структура и объем диссертации.** Работа общим объемом 191 страница состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных

библиографических источников из 163 наименований, 8 приложений, включает 56 иллюстраций и 9 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана краткая сравнительная характеристика и состояние проблемы энергоемкости существующих технологий нагрева и термообработки на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь и других стран.

В **первой главе** приведены результаты анализа тепловой работы более 300 нагревательных и термических установок, эксплуатируемых на таких машиностроительных предприятиях, как ОАО «Минский автомобильный завод» (ОАО «МАЗ»), РУП «Минский тракторный завод», РУП «Кузнечный завод тяжелых штамповок» (РУП «КЗТШ»), РУПП «Белорусский автомобильный завод», ОАО «Мозырский машиностроительный завод», ОАО «АМКОДОР», ОАО «Белкард», РУП «Минский завод шестерен», концерн «Белагромаш», ОАО «Бобруйский машиностроительный завод».

Установлено, что 70–80 % основных конструктивных элементов нагревательных и термических печей не модернизировались в течение последних 25–30 лет, при этом около 70 % рассмотренных печей не оснащены системами рекуперации теплоты уходящих дымовых газов, около половины парка печей функционирует без автоматизированной системы управления технологическими процессами. Природоохранные технологии, обеспечивающие сокращение или очистку выбросов от  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$ , практически отсутствуют (на большинстве печей установлены инжекционные горелки, конструкции которых не позволяют использовать подогретый воздух и обеспечивать предельно допустимый уровень концентрации выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$ ).

Проанализированы основные направления повышения энергоэффективности нагревательных и термических печей кузнечно-штамповочного производства, включающие рекуперацию теплоты дымовых газов и снижение тепловых потерь через футеровку, а также проведен анализ методов математического моделирования процессов теплообмена в промышленных печах.

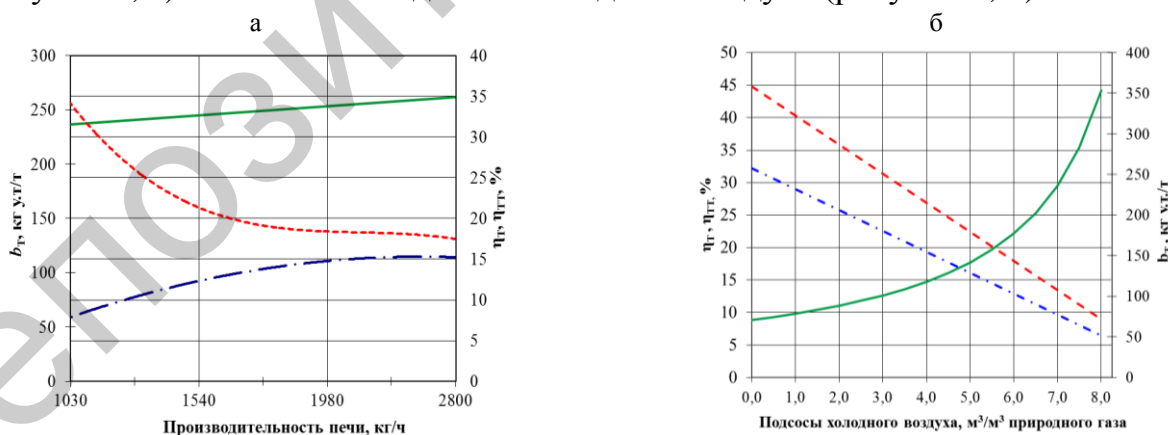
В результате выполненного анализа определены основные направления модернизации печей и сформулированы задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** на первом этапе исследований выполнены балансовые испытания нагревательных печей, результаты которых в дальнейшем были использованы для установления зависимостей изменения основных теплотехнических показателей от конструкции, производительности, величины подсосов холодного воздуха, теплового режима и т.д.

В качестве объектов исследования рассмотрены типовые конструкции нагревательных печей, функционирующих в кузнечных производствах

машиностроительных предприятий на примере ОАО «МАЗ»: проходная печь ручьевого типа (ГНП-1 РУП «КЗТШ») и проходная печь с гладким подом (№ 40 ОАО «МАЗ»). Целью балансовых испытаний являлось определение фактических теплотехнических показателей ( $\eta_T$ ,  $\eta_{T,T}$ ,  $b_T$  при конкретной производительности), подсосов холодного воздуха в рабочее пространство печи, угара металла.

На следующем этапе по результатам полученных данных, а также с учетом того, что в технической литературе отсутствует единый подход к определению основных показателей энергоэффективности работы печей, была разработана комплексная методика расчета теплового баланса и теплотехнических показателей газопламенных печей непрерывного действия кузнечного и термического производства, которая легла в основу утвержденного Госстандартом Республики Беларусь (23.07.2008 г.) Типового положения по расчету теплового баланса и теплотехнических показателей газопламенных печей непрерывного действия кузнечного и термического производства ОАО «МАЗ». Использование разработанного Типового положения позволяет при отсутствии приборов учета и минимальном объеме дополнительных измерений на нагревательных печах установить основные показатели их энергоэффективности, что позволяет использовать Типовое положение при разработке технических заданий при проектировании новых печей и модернизации существующих. В результате расчетного анализа при использовании комплексной методики оценки тепловой работы нагревательных печей установлены зависимости  $\eta_T$ ,  $\eta_{T,T}$  и  $b_T$  от производительности печи (рисунок 1, а) и от объема подсосов холодного воздуха (рисунок 1, б).



а – печь ручьевого типа; б – печь с гладким подом: - · - -  $\eta_T$ ; - - -  $\eta_{T,T}$ ; —  $b_T$

**Рисунок 1 – Зависимости  $\eta_T$ ,  $\eta_{T,T}$  и  $b_T$  от производительности и подсосов холодного воздуха**

На основании полученных результатов сформулированы конкретные задачи, которые решены в последующих главах: выбор энергоэффективных технологических режимов нагрева металла в печах; теплотехническое обоснование и разработка конструкций печей, направленных на повышение их энергоэффективности.



В третьей главе выполнена постановка и численное решение задачи математического моделирования теплообмена в нагревательных печах различной конструкции. Математическая модель теплообмена между заготовками, дымовыми газами и элементами футеровки сформулирована следующим образом:

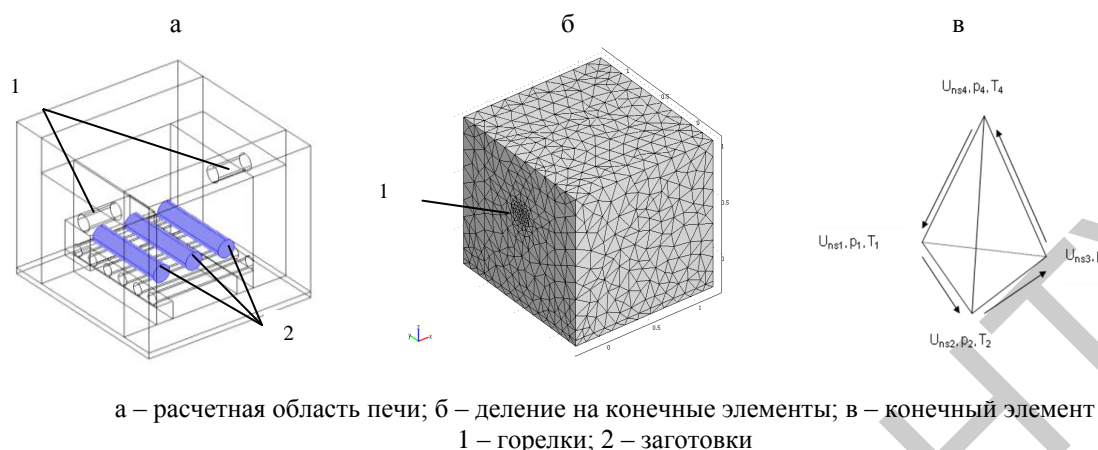
$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{li} c_{pli} \frac{\partial T_{li}}{\partial t} = \rho_{li} c_{pli} U_{ns} \nabla T_{li}, \rho_{2j} c_{p2j} \frac{\partial T_{2j}}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{2j} \nabla T_{2j}), \rho_m c_{pm} \frac{\partial T_m}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T_m) \\ \rho_{li} (U_{ns} \nabla) U_{ns} = \nabla [-p + (\eta_{li} + \eta_{lit}) \nabla U_{ns}], \rho_{li} U_{ns} \nabla k = \nabla [(\eta_{li} + \eta_{lit} / \sigma_k) \nabla k] + \eta_{lit} - \rho_{li} \varepsilon \\ \rho_{li} U_{ns} \nabla \varepsilon = \nabla [(\eta_{li} + \eta_{lit} / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + C_{\varepsilon_1} \varepsilon \eta_{lit} / k - C_{\varepsilon_2} \rho_{li} \varepsilon^2 / k, \nabla U_{ns} = 0 \\ n \cdot (\lambda_{2j} \nabla T_{2j})_{\text{заг.-д.г.}} = \alpha_{ij} (T_{li} - T_{2j}) + \sum_{m=1}^l \sigma (\varphi_{mj} \varepsilon_m T_m^4 - \varphi_{jm} \varepsilon_{2j} T_{2j}^4), \\ n \cdot (\lambda_m \nabla T_m)_{\text{фут.-д.г.}} = \alpha_{im} (T_i - T_m) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^l \sigma (\varphi_{nm} \varepsilon_m T_m^4 - \varphi_{nm} \varepsilon_n T_n^4), n \cdot (\lambda_m \nabla T_m)_{\text{фут.-воздух}} = \alpha_{vm} (T_m - T_v), \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $t$  – независимая переменная (время);  $U_{ns} = \sqrt{u^2 + v^2 + \omega^2}$ ,  $u, v, \omega$  – декартовы проекции скорости дымовых газов в точке;  $\eta_{lit} = \rho_{li} C_\mu k^2 / \varepsilon$ ;  $p$  – давление дымовых газов в точке;  $\rho_{2j}, c_{p2j}, \lambda_{2j}, T_{2j}$  – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и температура  $j$ -й заготовки;  $\rho_{li}, c_{pli}, T_{li}, \eta_{li}$  – плотность, удельная теплоемкость, температура и динамическая вязкость дымовых газов в  $i$ -й зоне печи;  $\rho_m, c_{pm}, \lambda_m, T_m$  – плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и температура  $m$ -го элемента футеровки;  $T_v$  – температура окружающей среды;  $\alpha_{im}, \alpha_{ij}, \alpha_{vm}$  – коэффициенты конвективного теплообмена между дымовыми газами и футеровкой, между дымовыми газами и заготовкой, между окружающим воздухом и наружной поверхностью футеровки;  $\varphi_{mj}, \varphi_{jm}, \varphi_{nm}, \varphi_{nn}$  – угловые коэффициенты;  $\varepsilon_m, \varepsilon_n, \varepsilon_{2j}$  – степени черноты элементов футеровки печи и заготовок, участвующих в теплообмене;  $C_{\varepsilon_1}, C_{\varepsilon_2}, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, k, \varepsilon$  – параметрические коэффициенты  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности.

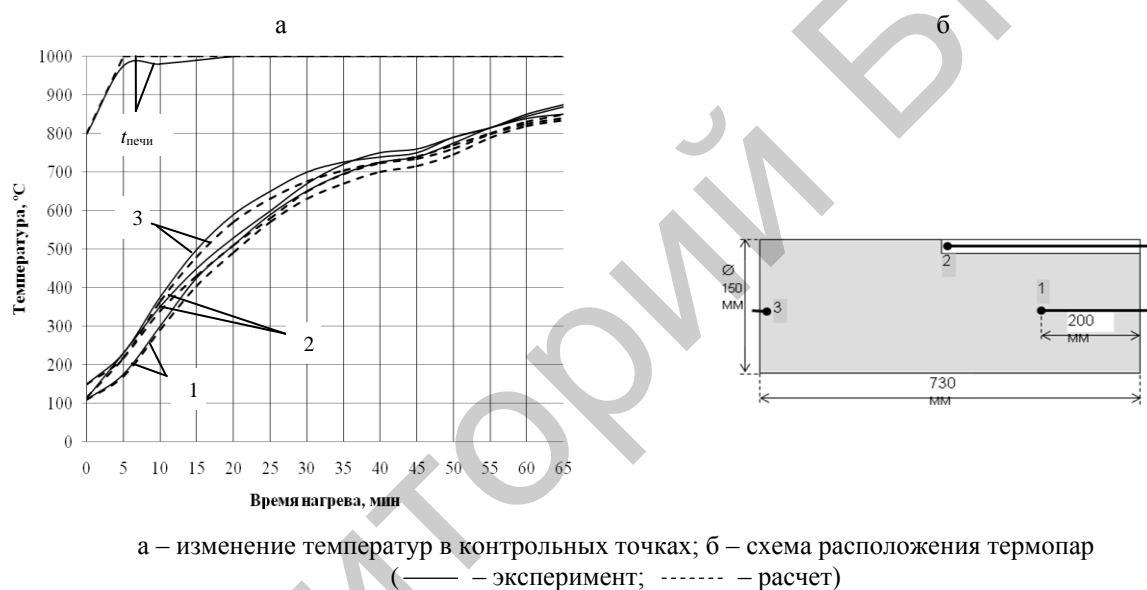
После определения общей структуры математической модели и класса уравнений выполнена параметрическая идентификация. В качестве примера решения задачи параметрической идентификации рассмотрен нагрев заготовок в камерной нагревательной печи с выкатным подом ПВП-1, разработанной и построенной специалистами НИЛ «Теория и техника металлургических процессов» БНТУ, РУП «Белорусский теплоэнергетический институт» (РУП «БелТЭИ») и НАН Беларуси на базе ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси». В качестве расчетного метода использован метод конечных элементов (рисунок 2).

На рисунке 3 показано сравнение расчетных показаний температур в контрольных точках заготовки при реализации поставленной математической модели и экспериментальных данных. Расхождение расчетных и

экспериментальных данных не превышает 3 %, что свидетельствует об адекватности математической модели.



**Рисунок 2 – Схема расчета камерной нагревательной печи ПВП-1**



**Рисунок 3 – Параметрическая идентификация модели нагрева металла в печи ПВП-1**

Для указанной печи проведены численные расчеты моделирования тепловой работы печи при варьировании уровнем расположения боковых горелок, что наряду с направленностью факела и степенью черноты системы «газ–кладка–металл» оказывает влияние на теплотехнические показатели печи. Установлено, что при относительной высоте установки боковых горелок на уровне 0,6 (при неизменной загрузке и расположении металла на поду) можно добиться повышения  $\eta_T$  печи на 1–3 % по сравнению с существующей установкой горелок (относительная высота 0,7), а наибольшей равномерности нагрева заготовок – при установке боковых горелок на уровне относительной высоты 0,68.

На последующем этапе с использованием разработанных подходов к построению математической модели выполнено численное моделирование тепловой работы печей различного конструктивного оформления: проходной печи с гладким подом; проходной печи высокоскоростного струйного нагрева

ручьевого типа; проходной печи с шагающими балками с учетом термической прочности заготовок (допустимых термических напряжений в металле).

Анализ результатов расчетов для проходной печи с гладким подом (печь № 40 ОАО «МАЗ») показал, что замена горелочных устройств и перераспределение их тепловой мощности по сравнению с существующим по длине рабочей зоны (I сварочная – 40 % от суммарной мощности печи; II сварочная – 50 %; томильная – 10 %) практически не дает существенных результатов. При этом  $b_T$  снижается всего на 2,5 кг у.т./т (0,8 %) при существующем расходе 310 кг у.т./т.

В связи с этим на следующем этапе выполнено математическое моделирование печи современной конструкции со струйным нагревом (проходная печь ручьевого типа конструкции ВНИПИ «Теплопроект»). Замена горелочных устройств и перераспределение их тепловых мощностей позволяет снизить суммарную тепловую мощность на 2,3 % и  $b_T$  на 2,5 кг у.т./т (2,3 %) (таблица 1).

Таблица 1 – Распределение тепловых мощностей горелочных устройств по длине печи

Вариант	I сварочная зона	II сварочная зона	Томильная зона	$b_T$ , кг у.т./т
Предлагаемый	37 %	42 %	21 %	105,6
Существующий	40 %	40 %	20 %	108,1

Предложенный подход использован при совершенствовании тепловых режимов высокопроизводительных нагревательных печей металлургического производства (на примере нагревательной печи с шагающими балками стана 850 РУП «БМЗ»). Перераспределение тепловых мощностей горелок без их замены позволяет исключить возникновение трещин вследствие термических напряжений в заготовках и снизить  $b_T$  на 0,2 кг у.т./т (0,5 %) (таблица 2).

Таблица 2 – Распределение тепловых мощностей горелочных устройств по зонам печи

Вариант	I зона	II зона	III зона	IV зона	V зона	VI зона	VII зона	$b_T$ , кг у.т./т
Предлагаемый	9,73 %	14,95 %	17,38 %	34,76 %	6,95 %	10,82 %	5,41 %	44,16
Существующий	24,23 %	24,23 %	12,12 %	24,23 %	4,85 %	7,54 %	2,80 %	44,36

Необходимо отметить, что перераспределение тепловых мощностей горелочных устройств не требует реконструктивных изменений печи и не приводит к простоя оборудования.

В четвертой главе в соответствии с поставленными задачами разработаны следующие методики и технические решения:

1. Выбор оптимальной температуры подогрева воздуха в рекуператоре в зависимости от производительности печи (1–3,5 т/ч), стоимости природного газа  $C_T$  (0,05–1 долл. США за 1 м<sup>3</sup>) и рекуператора (1–25 долл. США за 1 кг).

2. Выбор оптимальной конструкции футеровки печи в зависимости от рабочей температуры печи, применяемых материалов и обеспечения требуемой температуры наружной поверхности печи.

**Выбор оптимальной температуры подогрева воздуха для горения.** При выборе рекуператора необходимо установить предельно допустимую, но экономически целесообразную температуру подогрева воздуха горения, оптимальное значение которой можно найти, исходя из минимума функции приведенных затрат на рекуператор и топливо. Для решения выполняется замена следующих переменных:

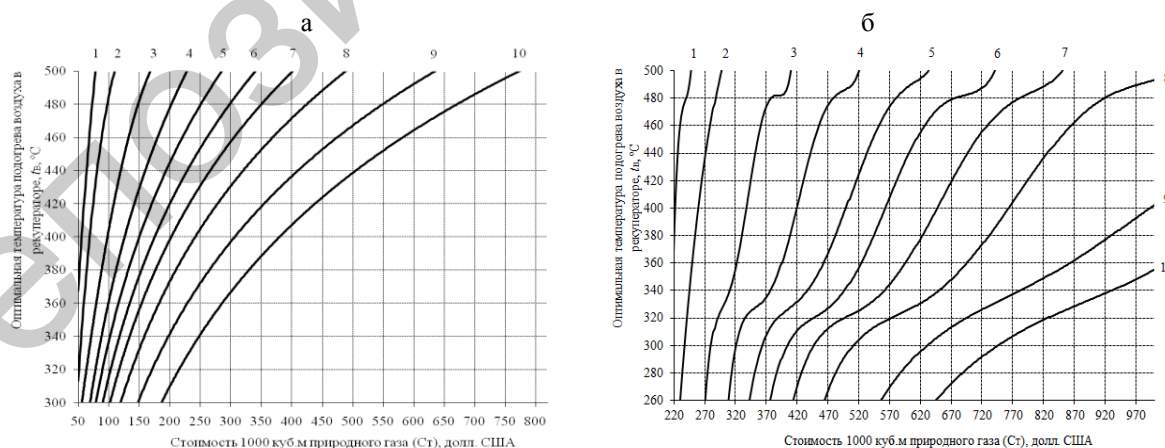
$$\{B_r, P, F, C_p\} \rightarrow \{f_1(t_B), f_2(t_B), f_3(t_B), f_4(t_B)\}, \quad (2)$$

где  $B_r$  – расход топлива, м<sup>3</sup>/год (или кг/год);  $P$  – степень рекуперации теплоты уходящих газов;  $F$  – площадь поверхности нагрева рекуператора, м<sup>2</sup>;  $C_p$  – приведенная годовая стоимость нагрева 1 м<sup>2</sup> поверхности рекуператора, долл. США/(м<sup>2</sup>·год).

При этом замена производится таким образом, что выражение (2) записывается в виде:

$$C_T \frac{\partial f_1}{\partial t_B} + \frac{f_4}{f_1 f_2 f_3} \cdot \left[ f_1 f_2 \frac{\partial f_3}{\partial t_B} + f_1 f_3 \frac{\partial f_2}{\partial t_B} + f_2 f_3 \frac{\partial f_1}{\partial t_B} \right] = 0. \quad (3)$$

Численное значение температуры нагрева воздуха в рекуператоре при решении (3) будет соответствовать оптимальному значению, до которого необходимо подогревать воздух в рекуператоре (рисунок 4).



$S_{0d}$ : 1 – 1 долл. США; 2 – 2 долл. США; 3 – 4 долл. США; 4 – 6 долл. США; 5 – 8 долл. США; 6 – 10 долл. США; 7 – 12 долл. США; 8 – 15 долл. США; 9 – 20 долл. США; 10 – 25 долл. США  
а – частичная модернизация; б – полная модернизация

**Рисунок 4 – Зависимость оптимальной температуры подогрева воздуха в игольчатом рекуператоре от стоимостей ( $S_{уд}$ ) 1 кг рекуператора (с учетом монтажа) и природного газа для нагревательных проходных печей производительностью 2 т/ч**

**Выбор оптимальной конструкции футеровки печи.** При выборе однослойной футеровки расчетами установлено, что для волокнистых футеровок величина снижения теплового потока при последовательном увеличении значения толщины с 0,25–0,35 м на 0,05 м составляет менее 1 % при температуре печи 1000 °С. Это означает, что для достижения необходимой температуры на внешней поверхности футеровки печи (45 °С) увеличение толщины футеровки с 0,25 м до 0,5 м снижает тепловой поток в среднем менее чем на 5 %, при этом стоимость футеровки возрастает в 2 раза. В качестве энергоэффективного конструктивного решения предложено обшивать футеровку печи кожухом. При этом для воздушной прослойки между кожухом и внешней поверхностью футеровки установлена следующая зависимость

$$S = (-0,0542\sigma^2 + 1,2168\sigma + 40,818)t + (2,708\sigma^2 - 58,659\sigma - 2328,8), \quad (4)$$

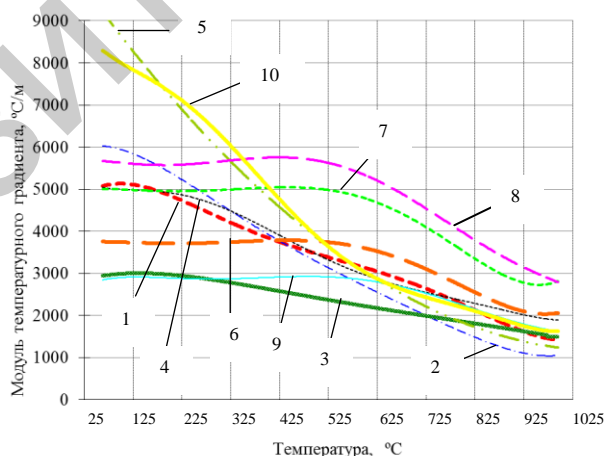
где  $S$  – величина воздушного зазора (мм) между металлическим кожухом и внешним слоем футеровки послойной кладки;  $\sigma$  – толщина металлического кожуха (мм);  $t$  – температура внешнего слоя футеровки (°С).

При выборе многослойных футеровок математическая постановка задачи подбора слоев футеровки имеет следующий вид:

$$\forall i, j (i, j \in M); \forall T (T \in [T_{\text{внеш}}, T_{\text{внутр}}]): \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_i \geq \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|_j \rightarrow j = i, \quad (5)$$

где  $M$  – рассматриваемое множество волокнистых футеровок.

Результаты решения задачи (5) приведены в виде графиков на рисунке 5 с учетом всевозможных компоновок многослойных волокнистых футеровок.



- 1 – мкрв–200, мкрф–100, мкрп–340; 2 – мкрф–1, мкрпг–400; 3 – шпгт–450; 4 – мкрк–500; 5 – foamfrax; 6 – fiberfrax bonded–s; 7 – duraboard ld; 8 – durafelt ld; 9 – prismoblock–s; 10 – insulfrax–s

**Рисунок 5 – Зависимость модуля температурного градиента по сечению теплоизоляционных слоев от температуры по координатам слоя (температура печи 1000 °С)**

На основании полученных закономерностей для термических печей сопротивления ООО «Маштехсервис» (г. Дзержинск) предложена замена существующей футеровки из однослойного шамота и листовой жести на проектную футеровку, которая выполнена из двух слоев волокнистой футеровки

Fiberfrax Duraboard LD 120 и Insulfrax S. Такая конструкция футеровки и металлического кожуха позволяет получить нормируемую температуру согласно действующим СНиП на внешней поверхности кожуха (45 °С) и снизить тепловые потери на функционирующем термическом оборудовании с 4400 до 440 Вт/м<sup>2</sup>. Срок окупаемости при внедрении предложенной конструкции футеровки на термическом оборудовании составил от 2,5 до 3,5 месяцев.

Для термического цеха термогальванического завода на ОАО «МАЗ» проведены расчеты тепловых потерь закально-отпускных агрегатов СТЗА–5.40.5/7–15Л–Б1 и СИЗА 4.20.1/3–Б1 до и после замены футеровки. Замена футеровки состояла в обновлении изношенных слоев путем замены каждого слоя на новый идентичный слой. Годовой экономический эффект от замены футеровки составил 94,5 млн. бел. руб., что в эквиваленте составило 20,0 тыс. долл. США.

Разработанная методика выбора конструкции энергоэффективной футеровки используется при проведении практических занятий по курсу повышения квалификации «Теплозащита промышленных теплоагрегатов» в Институте повышения квалификации и переподготовки кадров БНТУ.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Проведен комплексный анализ состояния парка нагревательных и термических печей ведущих машиностроительных предприятий Республики Беларусь. В результате анализа установлено, что основные конструктивные элементы нагревательных и термических печей, а во многих случаях и сами печи, недостаточно эффективны: средний коэффициент полезного действия ( $\eta_T$ ) отечественных нагревательных и термических печей машиностроительного комплекса находится на уровне 10 % (зарубежные аналоги – 40–50 %); средний удельный расход условного топлива ( $b_T$ ) для термических печей составляет 113 кг у.т./т, для нагревательных печей – 310–320 кг у.т./т (лучшие зарубежные аналоги имеют показатель 40–85 кг у.т./т) [1, 3, 14, 15].

2. Выполнены балансовые испытания типовых нагревательных проходных печей ОАО «МАЗ», которые подтвердили низкую эффективность тепловой работы существующих печей. Так, для нагревательной печи ручьевого типа (печь ГНП–1)  $\eta_T$  составил 8–15 %;  $b_T$  130–256 кг у.т./т при производительности 1–3 т/ч. Для нагревательной печи с гладким подом (печь № 40)  $\eta_T$  составил 6–9 %;  $b_T$  310–320 кг у.т./т при производительности 2–2,5 т/ч с учетом подсосов холодного воздуха (около 7,5–8 м<sup>3</sup> холодного воздуха на 1 м<sup>3</sup> природного газа), что приводит к повышенному расходу топлива, неравномерности нагрева как по длине, так и по сечению заготовок, а также к повышенному

окалинообразованию (до 4 %). На основании полученных результатов разработана комплексная методика по расчету теплового баланса и теплотехнических показателей газопламенных печей непрерывного действия кузнечного и термического производства ОАО «МАЗ», утвержденная Госстандартом Республики Беларусь в виде Типового положения. С использованием разработанной комплексной методики установлены зависимости  $\eta_T$ ,  $b_T$  и коэффициента использования теплоты топлива ( $\eta_{T,T}$ ) от производительности и подсосов холодного воздуха в печь, и предложены рекомендации по усовершенствованию тепловой работы и конструктивных параметров рассмотренных печей: совершенствование тепловых режимов (перераспределение тепловой мощности по длине печи), рекуперация теплоты уходящих дымовых газов, снижение тепловых потерь через футеровку [4].

3. На основании теплотехнических расчетов с использованием математических моделей, учитывающих геометрию печей, садки и место расположения горелок, установлены энергоэффективные технологические режимы нагрева металла для машиностроительных печей различной конструкции (печи камерного типа, проходные печи с гладким подом, проходные печи струйного нагрева ручьевого типа), а также нагревательных печей прокатного производства (печи с механизированным подом), позволяющие снизить  $b_T$  и исключить возникновение брака по причине образования трещин вследствие термических напряжений. Для печей камерного типа при варьировании относительной высотой установки боковых горелок можно добиться повышения  $\eta_T$  печи (при неизменной загрузке и расположении металла на поду) на 1–3 %, что существенно важно для нагревательных и термических печей невысокой производительности (до 1 т/ч) и при относительно невысокой температуре подогрева воздуха горения (до 200 °С) [7–9, 16, 19].

Показано, что частичная модернизация действующих типовых проходных нагревательных печей с гладким подом (замена горелочных устройств и перераспределение их тепловой мощности по длине печи) не позволяет существенным образом повысить их энергоэффективность (снижение  $b_T$  составляет 2–3 кг у.т./т при существующем расходе 310–320 кг у.т./т или 0,5–1,0 % при производительности 1–3,5 т/ч). Установлено, что перераспределение тепловой мощности по длине печи при использовании современных конструкций печей высокоскоростного струйного нагрева ручьевого типа позволяет снизить  $b_T$  на 2–3 кг у.т./т при существующем 105–110 кг у.т./т или 2–2,5 %; применительно к высокопроизводительным печам металлургического производства (на примере печи стана 850 РУП «БМЗ») снижение  $b_T$  за счет перераспределения тепловой нагрузки по зонам печи

составляет около 0,5 %, что с учетом годового объема производства позволяет сэкономить свыше 150 т у.т. [10, 18].

4. Разработана методика (методика МТ-1) по определению оптимальной температуры подогрева воздуха (при приравнении к нулю производной функции затрат на рекуперацию по искомой температуре воздуха для горения) в игольчатых рекуператорах, используемых на нагревательных печах машиностроительных предприятий, в зависимости от производительности печей (от 1 до 3,5 т/ч), удельной стоимости рекуператора (от 1 до 25 долл. США за 1 кг рекуператора с монтажом) и стоимости природного газа. На основе разработанной методики построены номограммы, позволяющие выбрать обоснованную температуру подогрева воздуха в игольчатых рекуператорах как с технической точки зрения, так и экономической, что позволяет снизить  $b_T$  на 5–30 %. Методика может быть адаптирована для нагревательных печей большей производительности и других типов рекуператоров [2, 5].

5. Разработана новая методика (методика МТ-2) выбора слоев футеровки (при выборе максимума модуля температурного градиента в определенном диапазоне температур), размера воздушной прослойки между наружной поверхностью футеровки и металлическим кожухом, а также конструкций многослойных футеровок из современных волокнистых материалов (муллитокремнеземистые плиты, войлоки, фетры и т.д.). Установлено, что для большинства волокнистых футеровок при увеличении толщины с 0,25 м до 0,5 м (достижение температуры 45 °С на внешней поверхности футеровки) снижение теплового потока в среднем составляет менее 5 %, при этом стоимость футеровки возрастает в 2 раза, для чего предложено использовать металлический кожух, для которого установлена зависимость размера воздушного зазора между ним и внешней поверхностью футеровки в зависимости от ее температуры. С использованием разработанной методики рассчитано 24 компоновки многослойных футеровок для нагревательных печей с рабочей температурой 1000 °С, использование которых позволяет снизить  $b_T$  на 5–10 %. Разработанная методика защищена патентами Республики Беларусь [6, 11–13, 17, 20, 21].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработанная комплексная методика оценки тепловой работы нагревательных печей (Типовое положение) использована при расчете теплотехнических показателей нагревательных печей ОАО «МАЗ» и может быть использована при составлении технических заданий на проектирование новых печей или модернизацию действующих, а также распространена в качестве типового отраслевого стандарта применительно к предприятиям и производствам, где промышленные печи определяют энергоемкость



выпускаемой продукции (химическая, строительная промышленность, энергетика и др.).

Разработанная методика МТ-1, позволяющая выбрать оптимальную температуру подогрева воздуха для горения в рекуператорах нагревательных печей, будет использована в РУП «БелТЭИ» при составлении технических заданий на проектирование новых печей и модернизации действующих.

Разработанная методика МТ-2, позволяющая выбрать материал и конструкцию футеровки, а также размер воздушного зазора между наружной поверхностью футеровки и металлическим кожухом, использована при выборе энергоэффективных конструкций для печей, функционирующих в машиностроительном комплексе Республики Беларусь: для закально-отпускных агрегатов СТЗА-5.40.5/7-15Л-Б1 и СИЗА 4.20.1/3-Б1 ОАО «МАЗ» годовой экономический эффект от замены футеровки составил 94,5 млн. бел. руб. (20,0 тыс. долл. США); при замене футеровки термического оборудования на ООО «Маштехсервис» плотность теплового потока снизилась с 4400 до 440 Вт/м<sup>2</sup>, а срок окупаемости при этом составил 3,5 месяца. Методика МТ-2 также использована при проведении практических занятий по курсу повышения квалификации «Теплозащита промышленных теплоагрегатов» в Институте повышения квалификации и переподготовки кадров Белорусского национального технического университета.

Результаты работы могут быть использованы при математическом моделировании нагревательных печей различных конструкций с целью выбора энергоэффективных режимов нагрева металла, при создании экономически обоснованных конструкций рекуператоров, а также при разработке энергоэффективных конструкций футеровок промышленных печей.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Тимошпольский, 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. – № 4. – 2007. – С. 54–62.

2. Расчет оптимальной температуры подогрева воздуха в рекуператоре на примере действующей термической печи современного машиностроительного завода с технико-экономической точки зрения / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, М.Л. Герман, Д.В. Менделев, С.В. Корнеев // Литье и металлургия. – № 2. – 2008. – С. 119–123.

3. Расчет и конструирование современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металла / В.И. Тимошпольский, А.П. Несенчук, И.А. Трусова, Д.В. Менделев, М.Л. Герман // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2008. – № 4. – С. 34–43.

4. Менделев, Д.В. Теплотехнические исследования нагревательных толкательных печей проходного типа с целью определения и улучшения их основных энерготехнологических показателей / Д.В. Менделев // Литье и металлургия. – 2008. – № 4. – С. 47–51.

5. Теплотехническое и экономическое обоснование выбора оптимальной температуры нагрева воздуха в рекуператорах нагревательных проходных печей машиностроительных предприятий / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, Д.В. Менделев, М.Л. Герман // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2009. – № 3. – С. 50–59.

6. Теплотехническое обоснование выбора энергоэффективной футеровки нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, А.П. Несенчук, Д.В. Менделев, М.Л. Герман // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2009. – № 4. – С. 48–55.

7. Выбор оптимальных конструктивных и технологических параметров пламенных печей камерного типа с высокоскоростными горелками с целью обеспечения равномерности нагрева / И.А. Трусова, Д.В. Менделев, П.Э. Ратников, С.В. Корнеев // Литье и металлургия. – № 2. – 2010. – С. 220–223.

8. Тимошпольский, В.И. Математическое моделирование процесса струйного нагрева цилиндрических заготовок в камерной нагревательной печи / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, Д.В. Менделев // Литье и металлургия. – № 3. – 2010. – С. 138–140.

9. Математическое моделирование теплообменных процессов в топливных нагревательных печах камерного типа / И.А. Трусова, Д.В. Менделев, П.Э. Ратников, С.В. Корнеев // *Литье и металлургия*. – № 4. – 2010. – С. 194–197.

10. Трусова, И.А. Определение оптимальных мощностей горелочных устройств в нагревательных печах струйного типа / И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев // *Литье и металлургия*. – № 1. – 2011. – С. 127–141.

11. Оценка экономической эффективности применения волокнистой футеровки в термических газопламенных печах и печах сопротивления в рамках машиностроительного производства / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, Д.В. Менделев, П.Э. Ратников // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 2. – С. 160–162.

12. Повышение эффективности работы термических печей сопротивления в условиях ОАО МАЗ / И.А. Трусова, Д.В. Менделев, А.И. Михлюк, П.Э. Ратников // *Литье и металлургия*. – № 2. – 2011. – С. 163–166.

13. Снижение расхода электроэнергии в печах ОАО МАЗ / И.А. Трусова, Д.В. Менделев, А.И. Михлюк, П.Э. Ратников // *Литье и металлургия*. – 2011. – № 3. – С. 95–98.

#### **Материалы конференций**

14. Пути решения основных задач модернизации парка газопламенных печей машиностроительного и металлургического производств / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, И.А. Трусова, Д.В. Менделев, С.М. Кабишов // *Литейное производство и металлургия 2008. Беларусь : материалы Международной научно-технической конференции, Гомель, 22–23 октября 2008 г.* / Центролит. – *Литье и металлургия*. – 2008. – № 3 спецвыпуск. – С. 303–306.

15. Тимошпольский, В.И. Выбор технических решений при модернизации парка нагревательных и термических печей машиностроительных предприятий / В.И. Тимошпольский, М.Л. Герман, Д.В. Менделев // *Теплотехника и энергетика в металлургии : сб. тез. тр. XV Международной конференции, Днепропетровск, 7–9 октября 2008 г.* / НМетАУ; редкол. : О.В. Гупало. – Днепропетровск, 2008. – С. 37–38.

16. Математическое моделирование процесса теплообмена в камерной нагревательной печи / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, Д.В. Менделев, П.Э. Ратников // *Литейное производство и металлургия. Беларусь 2009 : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 8–9 октября 2009 г.* / ФТИ НАНБ. – *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3. – С. 317–320.

17. Менделев, Д.В. Анализ применения современных волокнистых футеровочных материалов при создании нагревательных и термических печей машиностроительного производства / Д.В. Менделев // Наука – образованию, производству, экономике : сб. тез. докл. 7-й Международной научно-технической конференции, Минск, 22 апреля 2009 г. / БНТУ. – Минск. – 2009. – С. 182.

18. Трусова, И.А. Математическое моделирование процессов радиационно-конвективного теплообмена при нагреве стальных заготовок в методических проходных печах / И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев // Литейное производство и металлургия. Беларусь 2010 : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 22–23 ноября 2010 г. / БНТУ. – Литье и металлургия. – 2010. – № 3 спецвыпуск. – С. 169–171.

19. Трусова, И.А. Математическое моделирование и оптимизация способов нагрева заготовок в камерных печах / И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев // материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 22–23 ноября 2010 г. / БНТУ. – Литье и металлургия. – 2010. – № 4. – С. 190–193.

#### **Патенты**

20. Методическая проходная печь : пат. 7390 Респ. Беларусь / Д.В. Менделев, И.А. Трусова, В.А. Хлебцевич, П.Э. Ратников, С.В. Корнеев, Н.Г. Малькевич; заявитель БНТУ. – № U20101044; заявл. 20.12.2010; опубл. 30.06.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 174.

21. Агрегат периодического действия камерной печи : пат. 7391 Респ. Беларусь / Д.В. Менделев, И.А. Трусова, В.А. Хлебцевич, П.Э. Ратников, Н.Г. Малькевич; заявитель БНТУ. – №U20101045; заявл. 20.12.2010; опубл. 30.06.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 175.

## Рэзюмэ

Мендзелеў Дзмітрый Уладзіміравіч

Цеплатэхнічнае абгрунтаванне энергаэфектыўных тэхналогій і канструкцый прамысловых печаў для нагрэву метала

**Ключавыя словы:** награвальная печ, тэрмічная печ, рэкуператар, футроўка, рэжымы нагрэву, матэматычнае мадэляванне, энергаэфектыўнасць.

**Мэта дысертацыйнай работы:** цеплатэхнічнае абгрунтаванне і стварэнне рэсурсазберагальных цеплатэхнічных працэсаў і канструкцый для награвальных печаў, выкарыстанне якіх дазваляе зменшыць энергаемістасць вырабляемай металапрадукцыі (паменшыць удзельны расход умоўнага паліва, павялічыць каэфіцыент карыснага дзеяння і г.д.).

**Мэты даследавання:** заканамернасці працэсаў цеплавой апрацоўкі.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Праведзены комплексны аналіз стану парка награвальных печаў машынабудаўнічых прадпрыемстваў Рэспублікі Беларусь, на аснове якіх вызначаны асноўныя накірункі мадэрнізацыі печаў, а таксама прыведзена якасная адзнака вынікаў пры правядзенні мадэрнізацыі. Праведзены балансавыя даследаванні цеплавой працы награвальных прахадных печаў ручавога тыпу і з гладкім подам, для якіх прапанаваны пэўныя рэкамендацыі па ўдасканаленню іх цеплавой працы і канструктыўных параметраў. Распрацавана Тыпавое палажэнне па разліку цеплавога баланса і цеплатэхнічных паказчыкаў газапалымных печаў бесперапыннага тыпу кузнечнай вытворчасці ААА «МАЗ», пры выкарыстанні якога вызначаны залежнасці каэфіцыента карыснага дзеяння, каэфіцыента выкарыстання паліва і ўдзельнага расхода ўмоўнага паліва ад прадукцыйнасці награвальных печаў і колькасці падсosaў халоднага паветра. Распрацавана метадыка выбару аптымальнай тэмпературы нагрэва паветра ў ігольчатых рекуператорах, выкарыстоўваемых на награвальных печах машынабудаўнічых прадпрыемстваў, ад прадукцыйнасці печаў і ўдзельнага кошту ігольчатага рэкуператара. Распрацавана і абаронена патэнтамі Рэспублікі Беларусь метадыка выбару слаеў кудзелістай футроўкі, а таксама рад канструкцый шматслойных футровак з сучасных кудзелістых матэрыялаў, выкарыстоўваемых на награвальных і тэрмічных печах машынабудаўнічых прадпрыемстваў.

**Ступень выкарыстання:** Вынікі працы выкарыстаны пры ўжыванні прапанаваных канструкцый футровак награвальных і тэрмічных печаў, а таксама пры распрацоўцы Тыпавога палажэння па разліку асноўных энергатаэхналагічных паказчыкаў працы награвальных печаў.

**Вобласць выкарыстання вынікаў:** сучасныя награвальныя печы машынабудаўнічых і металургічных прадпрыемстваў.

## Резюме

Менделев Дмитрий Владимирович

Теплотехническое обоснование энергоэффективных технологий и конструкций промышленных печей для нагрева металла

**Ключевые слова:** нагревательная печь, термическая печь, рекуператор, футеровка, режимы нагрева, математическое моделирование, энергоэффективность.

**Цель диссертационной работы:** теплотехническое обоснование и разработка энергоэффективных технологий и конструкций промышленных печей для нагрева металла, использование которых позволит снизить энергоемкость выпускаемой металлопродукции (уменьшить удельный расход условного топлива печей, повысить коэффициент полезного действия печей и т.д.).

**Методы исследования:** закономерности процессов тепловой обработки стальных заготовок.

**Полученные результаты и их новизна.** Проведен комплексный анализ состояния парка нагревательных и термических печей ведущих машиностроительных предприятий Республики Беларусь, на основании которых определены основные направления модернизации печей. Выполнены балансовые испытания тепловой работы типовых конструкций наиболее энергоемких нагревательных проходных печей ручьевого типа и с гладким подом, для которых предложены конкретные рекомендации по усовершенствованию их тепловой работы и конструктивных параметров. Разработано Типовое положение по расчету теплового баланса и теплотехнических показателей газопламенных печей непрерывного действия кузнечного производства ОАО «МАЗ». Установлены зависимости общего коэффициента полезного действия, коэффициента использования теплоты топлива и удельного расхода условного топлива от производительности нагревательных печей и подсосов холодного воздуха. Разработана методика выбора оптимальной температуры подогрева воздуха в рекуператорах в зависимости от производительности печей, удельной стоимости рекуператора и используемого топлива. Разработана и защищена патентами Республики Беларусь методика выбора слоев волокнистой футеровки и конструкции многослойных энергоэффективных футеровок, которые могут быть использованы на печах для нагрева металла.

**Степень использования.** Результаты работы использованы при внедрении предложенных конструкций футеровок, а также при разработке Типового положения по расчету основных энерготехнологических показателей работы нагревательных печей.

**Область применения результатов:** действующие нагревательные и термические печи машиностроительных и металлургических предприятий.

## Summary

Mendelev Dmitri Vladimirovich

Heat engineering justification of energy efficient technologies and constructions in application to industrial heating furnaces

**Key words:** heating furnace, heat treatment furnace, recuperator, refractory, heating mode, mathematical modeling, energy efficiency.

**Thesis aim:** thermal justification and development of energy efficient thermo-technological processes and constructions in application to heating furnaces that allow to cut its energy consumption and to raise its efficiency.

**Analysis:** billets heating regularities.

**Results and its novelty.**

There were investigated heating and heat-treating furnaces of machine-building production in Belarus. There were determined the main modernization directions and proposed its evaluation. There were provided experimental investigations of heating work of basic heating furnaces in machine-building production. There were proposed recommendations of its upgrading. There was developed the methodology of heat balance and heat engineering parameters calculation in application to OJSC «MAZ». There was developed the methodology of the optimal air heated temperature selection subject to furnace performance, recuperator and gas costs. There was developed and patented the methodology of refractory layers selection and its multilayered set.

**Application domain of results:** Up-to-date heating and heat treating furnaces in application to metallurgical and machine-building industries.

Научное издание

МЕНДЕЛЕВ Дмитрий Владимирович

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И КОНСТРУКЦИЙ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук  
по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Подписано в печать 07.05.2012. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 60. Заказ 565.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65, 220013, Минск.