

УДК 621.255.2001.24

Г.В. КУЛИНЧЕНКО, канд. техн. наук, доц., СумГУ, Сумы,
Е.Н. МОЗОК, аспирант, СумГУ, Сумы

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ

Исследованы возможности построения аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего визуализацию полей термических печей. Модернизация инструментария по обработке первичных сигналов с датчиков, прогрессивные программные средства и алгоритмы позволяют получать распределения теплового поля в режиме реального времени. Результаты оценки теплового поля используют для управления процессом термообработки в режиме реального времени. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: распределение теплового поля, визуализация полей, режим реального времени, аппаратно-программный комплекс.

Постановка проблемы. Электрический нагрев имеет широкое распространение в различных отраслях промышленности. Преимущество электронагрева по сравнению с нагревом в пламенных печах заключается в возможности обеспечения больших скоростей нагрева, высокой точности и равномерности нагрева вследствие легкости регулирования электрического и температурного режимов. Эффективность работы электрических печей достигается в результате широкого использования средств автоматизации технологических процессов нагрева.

В высокотемпературной электрической печи сопротивления, где доминирует передача тепла излучением, единственным способом создания заданного теплового поля на объекте является генерация соответствующего теплового поля на поверхности рабочего пространства печи [1], что предопределяет необходимость фиксации изменений поля во времени. Для корректного управления процессом нагрева в печах, помимо задачи слежения за распределением поля температур самой печи, необходимо учитывать характер изменения температуры обрабатываемого изделия. Для контроля нагрева металла приходится использовать измерители, которые обеспечивают измерения температуры непосредственно на поверхности металла [2].

Необходимость получения информации о текущем распределении поля термопечи и поля объекта обуславливает стремление к разработке соответствующих средств отображения данных о ходе процесса.

Известные разработки в области измерения полей температур

© Г.В. Кулинченко, Е.Н. Мозок, 2015

частично решают проблемы мониторинга полей термообработки металлов. При этом рекламируемые аппаратно-программные комплексы, в силу большого объема решаемых задач, отличаются неприемлемой для производственных условий стоимостью.

В работе решается проблема разработки нового метода измерения тепловых полей и построения недорогого аппаратно-программного комплекса для мониторинга тепловых полей в режиме реального времени. В техническом плане ставится задача идентификации параметров теплового поля на базе минимальных аппаратурных затрат.

Анализ литературы. В упрощенных задачах оценки состояния теплового поля печи допускается, что температура объекта соответствует усредненной температуре термопечи. Однако реальные измерения температур нагреваемого объекта и печного пространства в его разных точках показывают, что упомянутые температуры существенно разнятся между собой, соответственно для получения корректных оценок поля приходится усложнять используемые технические средства.

Известны системы измерения, в которых оценка измеряемого параметра производится по взвешенным сигналам пирометров, установленных в определенных точках печи и направленных на поверхность металла. Если металл имеет невысокую температуру относительно излучающих на него поверхностей (стен, свода), и особенно при низкой степени черноты металла, то измерение температуры поверхности металла пирометром невозможно из-за большой доли отраженного излучения.

Наличие погрешностей измерений в реализации измерений температуры металла, связанных с наличием поглощающей газовой среды, влиянием отраженного излучения, неопределенностью степени черноты металла (окалины), привело к созданию двухдатчиковых систем измерения, состоящих из пирометра, направленного на поверхность металла, и датчика корректирующего сигнала (например, пирометра, визированного на футеровку) [3]. Такой подход предполагает использование измеряемой пирометром эффективной температуры кладки, что дает возможность по измеренным угловым коэффициентам излучения, спектральной степени черноты металла скорректировать на основе аппроксимирующих полиномов температуру металла.

Предлагаемые разными авторами системы для построения температурного поля, наряду с достигнутыми положительными результатами, имеют определенные недостатки. Зачастую предложенные решения не предусматривают работу в режиме реального времени [4], либо имеют слишком перегруженный для этого математический аппарат

[5]. Часть решений для достижения режима реального времени основываются на перегруженной аппаратной части [6].

Существующие расчетные методы в силу ряда присущих им недостатков (громоздкость вычислений, малая точность, нестационарность параметров и др.) не позволяют получать объективные параметры теплового поля. Известные алгоритмы уточненного определения температуры металла сложны и могут применяться на крупных металлургических печах. Для небольших нагревательных и термических печей с энергосберегающими технологиями использование дорогостоящих пирометров и громоздкого программного обеспечения представляется недостаточно экономически эффективным. Поэтому для идентификации параметров тепловых полей и реализации заданных законов управления нагрева/охлаждения целесообразно использовать традиционные способы измерения поля температур печи с обработкой полученных данных на основе компьютерного моделирования.

До настоящего времени не сформировано четких критериев и подходов к построению промышленных анализаторов распределения теплового поля. Варианты устройств, позволяющих строить тепловые поля, реализуются либо для объектов компактных габаритов [7], либо имеют исследовательский характер [8]. Анализ экспериментальных данных ведется специализированным программным обеспечением, что значительно увеличивает стоимость анализаторов.

Цель работы заключается в разработке метода исследования тепловых полей на основе экспериментальных данных и соответствующего измерительного комплекса, позволяющего вести контроль за ходом процесса в реальном масштабе времени.

При этом необходимо определить функции, решаемые техническим и программным обеспечением комплекса, поскольку традиционно поставленная задача решается за счет чрезмерного усложнения программного обеспечения либо за счет использования дорогостоящих средств автоматизации.

Построение аппаратно-программного комплекса. Для реализации поставленной цели исследований разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) оценки тепловых полей. Структура АПК включает в себя устройство сбора и передачи данных, получаемых от поля датчиков, которые регистрируют параметры объекта. Благодаря программному обеспечению, которое включает математическую модель термических процессов печи, осуществляется мониторинг процесса обработки металла в режиме реального времени.

Для настройки модели рассчитанные значения теплового поля T_M сравниваются с реально измеренными температурами T_R в соответствующих точках. При необходимости производится подстройка весовых коэффициентов расчетной матрицы ΔA . Этот итерационный процесс продолжается до совпадения расчетных значений поля с реальными с заданной точностью. В результате на мониторе АПК осуществляется визуализация теплового поля в масштабе реального времени.

Для минимизации времени вычислений с помощью сложной математической модели, какой является модель теплового поля печи, принимаются следующие допущения [9]:

- преобладающую роль в физических процессах электрической печи играет передача тепла излучением;
- поверхности тел, взаимодействующих в процессах – серые;
- поверхности тел являются диффузно поглощающими и диффузно излучающими;
- температура излучения нагревательных элементов рассматривается как заданная исходная величина по отношению к температуре пространства печи и металла.

При рассмотрении тепловых процессов в пространстве печи определяющую роль играет конвективный перенос тепла, в то же время при нагреве заготовки наиболее существенной является передача тепла излучением.

Программное обеспечение комплекса базируется на решении дифференциальных уравнений теплопроводности. Система уравнений в частных производных, позволяющая описать распространение тепловой энергии в пространстве, имеет вид [10]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q + h(T_n - T), \quad (1)$$

где ρ – плотность; C – теплоемкость; T – температура тела, участвующего в теплообмене; ∇ – градиент; λ – коэффициент теплопроводности; Q – энергия источника тепла; h – коэффициент конвективного теплообмена; T_n – внешняя температура. Физические параметры соответствующих объектов (стенки, воздуха, заготовки) являются табличными величинами и задаются в зависимости от температуры.

Начальную температуру элементов печи принимаем равномерно распределенной и равной температуре окружающей среды. Эта температура определяет значения физических параметров элементов печи, участвующих в процессах теплообмена. Граничные условия при упрощенном варианте моделирования представляем в виде

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q(x, y, z, t), \quad (2)$$

где n – нормаль к границе; q – плотность теплового потока от стены по координатам x, y, z ; t – время.

Краевые условия для решения уравнений формируются из условия баланса входящего и исходящего излучений. Этот баланс определяется результатом взаимодействия конвективной и кондуктивной составляющих переноса тепла.

Тогда для серых тел поток излучения записывается в виде [9]

$$q = \varepsilon(G - \sigma T^4), \quad (3)$$

где ε – излучательная способность поверхности; G – падающий на поверхность тела радиационный поток (поток облучения); σ – постоянная Стефана-Больцмана; T – температура излучающей поверхности.

Интересующую нас температуру на поверхности заготовки можно определить из потока излучения [11]

$$T_n = T_{нач} + \left(0.5q \frac{s}{\lambda}\right)(2F_{Ом} + 2/3), \quad (4)$$

где T_n – температура поверхности заготовки; $T_{нач}$ – начальная температура заготовки; s – толщина заготовки; $F_{Ом}$ – параметр Фурье.

Исходя из приведённых уравнений, оценка полей производится в следующей последовательности. Для каждого элемента модели (стена, воздушное пространство печи, заготовка) задаются соответствующие значения физических параметров (температура, плотность, теплоемкость, теплопроводность и т.д.). Вся область моделирования, в соответствии с алгоритмом метода конечных элементов (МКЭ), делится на треугольные для уточнения и установки разных параметров. Таким образом нелинейные зависимости, описывающие процессы теплообмена, преобразуются в систему линейных алгебраических элементов, что позволяет численно рассчитывать значения функций в узлах [12].

Визуализация кадров поля осуществляется циклически со скоростью, которая определяется производительностью вычислительного устройства (ПК). Поэтому время вычисления одного кадра визуализации должно быть меньше постоянных времени изменения краевых условий печи.

Построение температурного поля печи и заготовки, в соответствии с принятым для тестирования АПК алгоритмом, осуществляется на основании данных, получаемых от датчиков, установленных на стене печи. Эти данные и определяют граничные условия на стенках печи.

Температура печного пространства рассчитывается в результате решения уравнения (1). Учет величины потока излучения (3), используя соотношение (4), позволяет оценить температуру заготовки [13].

Получение реальных значений температур в камере и на стене печи, дальнейшая их обработка, обеспечивается устройством связи с объектом (УСО), в котором осуществляется нормализация и усиление сигналов от датчиков температуры. В качестве датчиков температуры используются термоэлектрические преобразователи ТХА тип К, с диапазоном измерения: $-270 - 1350$ °С. УСО реализовано на плате *Arduino Leonardo* на базе микроконтроллера (МК) *ATmega32u4*. Данная плата имеет 20 цифровых вводов/выводов, 10 разрядный АЦП, аппаратная поддержка *UART, SB, I2C* [14]. Для согласования сигнала термомпары со входом АЦП используется многоканальный операционный усилитель.

С помощью программы, хранящейся в памяти МК, устройство проводит опрос датчиков температуры и усредняет значения по нескольким выборкам перед его передачей в промышленный компьютер. Схема системы сбора и передачи информации представлена на рис. 1.

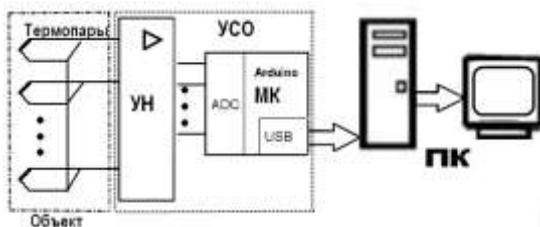


Рис. 1. Система сбора и передачи информации
УН – усилитель-нормализатор; УСО – устройством связи с объектом; МК – микроконтроллер Arduino; ПК – промышленный компьютер

В качестве программного обеспечения для решения задачи теплообмена на персональном компьютере используется среда MatLab с подключенным к ней модулем PDE Tollbox, предназначенным для проведения расчетов и моделирования физических процессов методом конечных элементов [15]. Передачей данных, расчетом и визуализацией управляет программа с соответствующими функциями, оформленная в виде М-файла Matlab. Пример моделирования пространства печи с помещенной заготовкой из углеродистой стали показан на рис. 2, где через X, Y обозначены оси координат печного пространства, при этом считается, что поле по координате Z изменяется незначительно.

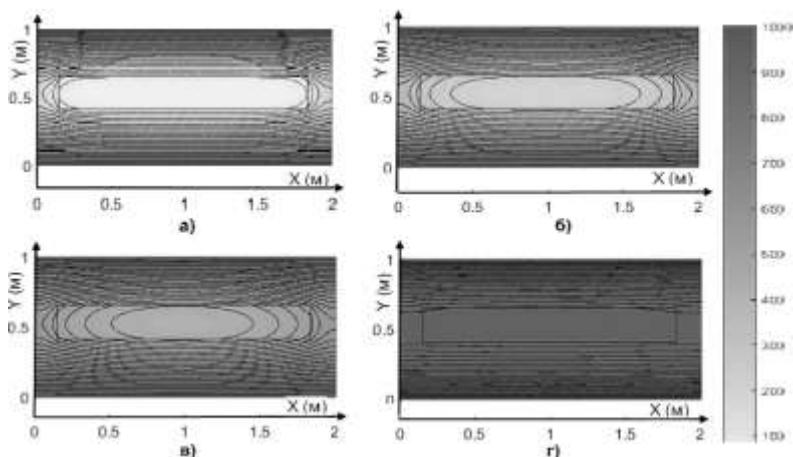


Рис. 2. Результаты моделирования
a) $t = 1$, б) $t = 10$, в) $t = 50$, г) $t = 100$

На рисунках представлены состояния печи и заготовки в различные моменты условного времени. Из рис. 2 видно, что с течением времени температура заготовки, находящейся в печи, уравнивается с температурой среды печи. Характерным для процесса нагрева является уменьшение турбулентностей теплового поля печи и заготовки.

Оценка реализации модели при построении одного визуализируемого кадра с разным количеством элементов приведены в таблице.

Таблица

Результаты моделирования

№	Кол-во узлов	Кол-во сторон	Кол-во треугольников	Время моделирования, с
1	1421	212	2720	4,65
2	5561	424	10880	9,26
3	22001	848	43520	33,63

Анализ результатов моделирования показывает, что платой за точность расчетов является потеря производительности расчетов модели. Поэтому условия компромисса являются предметом дальнейших исследований. Для увеличения точности и уменьшения времени расчетов предполагается использовать датчики теплового потока, что позволит корректировать параметры модели по экспериментальным данным, получаемым с объекта. Задача повышения производительности расчетов для реализации модели в режиме реального времени обуславливает

использование алгоритмов высокопроизводительных компьютерных вычислений [16]. Данный подход позволит свести к минимуму аппаратную часть АПК, при этом сохранив необходимую точность и скорость расчетов.

Выводы. Исследование возможностей построения аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего визуализацию тепловых полей термической печи показало, что для осуществления мониторинга процесса термообработки требуется модернизация имеющихся на рынке технических средств измерения. В связи с этим разработан метод измерения тепловых полей и измерительный комплекс на его основе. Исходя из функций, выполняемых аппаратной и программной частью комплекса, вытекают задачи по совершенствованию программного обеспечения системы, решение которых позволит отслеживать динамику процесса термообработки в промышленных условиях.

Список литературы: 1. *Кацевич Л.С.* Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей / *Л.С. Кацевич*. – М.: Энергия, 1977. – 304 с. 2. *Мирошников В.В.* Обзор существующих методов и средств измерения температуры / *В.В. Мирошников А.И. Котуза* // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Автоматика та приладобудування. – 2008. – С. 118-127. 3. *Лисиенко В.Г.* Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование / *В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев* / Под ред. В.Г. Лисиенко – М.: Теплотехник, 2004. – 832 с. 4. *Гуляев А.В.* Восстановление и точность представления температурного поля при обжиге подины электролизера, проблемы рассматриваемого метода / *А.В. Гуляев* // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008. – № 3. – С. 11-15. 5. *Скоб Ю.О.* Чисельне розв'язання спряженої задачі теплообміну в камерах термообробки / *Ю.О. Скоб* // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2012. – № 4. – С. 79-83. 6. *Хабаров В.А.* Апаратний контроль температурних потоків в режимі реального часу / *В.А. Хабаров, О.В. Непомнячий* // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 5. – С. 54-57. 7. *Увайсов С.У.* Метод теплового діагностування латентних технологічних дефектів радіоелектронної апаратури і її теплова діагностична модель / *С.У. Увайсов, С.П. Сулейманов, Н.К. Юрков* // Известия вищих навчальних закладів. Поволжський регіон. Технічні науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 109-118. 8. *Горячев Н.В.* Совершенствование структуры современного информационно-измерительного комплекса / *Н.В. Горячев, Н.К. Юрков* // Инновационные информационные технологии. – 2013. – Т. 3. – № 2. – С. 433-436. 9. *Кривандин В.А.* Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / *В.А. Кривандин, Ю.П. Филимонов*. – М.: Металлургия, 1986. – 479 с. 10. Heat Transfer and Diffusion [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.mathworks.com/help/pde/ug/heat-transfer.html>. 11. *Киселев Е.В.* Электрические печи сопротивления / *Е.В. Киселев*. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – 78 с. 12. *Румянцев А.В.* Метод конечных элементов в задачах теплопроводности: Учебное пособие / *А.В. Румянцев*. – Калининград: Российский госуниверситет им. И. Канта., 2010. – 95 с. 13. *Цаплин А.* Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии / *А.И. Цаплин, И.Л. Никулин*. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2011. – 299 с. 14. Arduino Leonardo Overview [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLeonardo>. 15. Matlab Partial Differential Equation Toolbox [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.mathworks.com/help/pde/index.html>. 16. *Kulincheko G.* Thermal field analysis

simulation acceleration / G. Kulincheko, E. Mozok // Fourth International Conference "High Performance Computing" HPC-UA 2014. – Ukraine, Kyiv. – 2014. – P.71-74.

Bibliography (transliterated): 1. *Kacevich L.S.* Teorija teploperedachi i teplovye raschety jelektricheskikh pechej / *L.S. Kacevich*. – M.: Jenergija, 1977. – 304 p. 2. *Miroshnikov V.V.* Obzor sushhestvujushchih metodov i sredstv izmerenija temperatury / *V.V. Miroshnikov, A.I. Kotuza* // Visnik NTU "HPI". Serija: Avtomatika ta priladobuduvannja. – 2008. – P. 118-127. 3. *Lislenko V.G.* Racional'noe szhiganie, upravlenie i tehnologicheskoe ispol'zovanie / *V.G. Lislenko, Ja.M. Shhelokov, M.G. Ladygichev*. / Pod red. *V.G. Lislenko*. – M.: Teplotehnik, 2004. – 832 p. 4. *Guljaev A.V.* Vosstanovlenie i tochnost' predstavlenija temperaturnogo polja pri obzhige podiny jelektrolizera, problemy rassmatrivaemogo metoda / *A.V. Guljaev* // Zhurnal nauchnyh publikacij aspirantov i doktorantov. – 2008. – № 3. – P. 11-15. 5. *Skob Ju.O.* Chisel'ne rozv'jazannja sprjazhenoi zadachi teploobminu v kamerah termoobrobki / *Ju.O. Skob* // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2012. – № 4. – P. 79-83. 6. *Habarov V.A.* Apparatnyj kontrol' temperaturnyh potokov v rezhime real'nogo vremeni / *V.A. Habarov, O.V. Nepomnjashhij* // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2009. – № 5. – P. 54-57. 7. *Uvajsov S.U.* Metod teplovogo diagnostirovanija latentnyh tehnologicheskikh defektov radiojelektronnoj apparatury i ee teplovaja diagnosticheskaja model' / *S.U. Uvajsov, S.P. Sulejmanov, N.K. Jurkov* // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehniceskie nauki. – 2013. – № 4 (28). – P. 109-118. 8. *Gorjachev N.V.* Sovershenstvovanie struktury sovremennoho informacionno-izmeritel'nogo kompleksa / *N.V. Gorjachev, N.K. Jurkov* // Innovacionnye informacionnye tehnologii. – 2013. – T. 3. – №2. – P. 433-436. 9. *Krivandin V.A.* Teorija, konstrukcii i raschety metallurgicheskikh pechej / *V.A. Krivandin, Ju.P. Filimonov*. – M.: Metallurgija, 1986. – 479 p. 10. Heat Transfer and Diffusion [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupa k resursu: <http://www.mathworks.com/help/pde/ug/heat-transfer.html>. 11. *Kiselev E.V.* Jelektricheskie pechi soprotivlenija / *E.V. Kiselev*. – Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2010. – 78 p. 12. *Rumjancev A.V.* Metod konechnyh jelementov v zadachah teploprovodnosti: Uchebnoe posobie / *A.V. Rumjancev*. – Kaliningrad: Rossijskij gosuniversitet im. I. Kanta., 2010. – 95 p. 13. *Caplin A.* Modelirovanie teplofizicheskikh processov i ob'ektov v metallurgii / *A.I. Caplin, I.L. Nikulin*. – Perm': Permskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet, 2011. – 299 p. 14. *Arduino Leonardo* Overview [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupa k resursu: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLeonardo>. 15. Matlab Partial Differential Equation Toolbox [Elektronnij resurs] – Rezhim dostupa k resursu: <http://www.mathworks.com/help/pde/index.html>. 16. *Kulincheko G.* Thermal field analysis simulation acceleration / *G. Kulincheko, E. Mozok* // Fourth International Conference "High Performance Computing" HPC-UA 2014. – Ukraine, Kyiv. – 2014. – P.71-74.

Поступила (received) 20.09.2015

Статью представил д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних наук Довбиш А.С.

Kulinchenko Georgij Vasil'evich, PhD Tech
Sumy State University
Str. Rimskogo-Korsakova, 2, Sumy, Ukraine, 40007
tel./phone: (095) 800-0123, e-mail: heorhy@yandex.ua
ORCID ID: 0000-0002-8501-5636

Mozok Evgen Nikolaevich, postgraduate
Sumy State University
Str. Rimskogo-Korsakova, 2, Sumy, Ukraine, 40007
tel./phone: (099) 421-37-32, e-mail: mozok_e@mail.ru
ORCID ID: 0000-0001-5504-3209