

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/47-192

Ссылка для цитирования этой статьи:

Голиков А.В., Панкратова Е.В. В.А. Опыт разработки программного обеспечения для моделирования нестационарного температурного поля печи шахтного типа // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2024. №3

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания министерства образования и науки РФ № 122030100145-3.

УДК 666.1.031.5: 004.942

DOI:10.24412/2541-9269-2024-3-8-15

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПЕЧИ ШАХТНОГО ТИПА

Голиков А.В., Панкратова Е.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки - институт проблем точной механики и управления Российской Академии наук, Россия, Саратов, golikov@iptmuran.ru

EXPERIENCE IN DEVELOPING SOFTWARE FOR MODELING THE NON- STATIONARY TEMPERATURE FIELD OF A SHAFT-TYPE FURNACE

Golikov A.V., Pankratova E.V.

Federal State Budgetary Institution of Science - Institute for Problems of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Russia, Saratov, golikov@iptmuran.ru

Аннотация. В работе разработано программное обеспечение, предназначенное для численного моделирования и анализа нестационарного температурного поля печи шахтного типа, применяемой для расплава и изготовления изделий из стекла. Основная цель работы состоит в разработке программы, реализующей компьютерную модель температурного поля муфельной печи шахтного типа для анализа распределения температур внутри печи и в подпечном пространстве. Разработанное программное обеспечение позволяет визуализировать нестационарное температурное поле печи в динамике, а также получать и анализировать результаты моделирования в графическом и численном виде. Кроме того, в программе реализована возможность настройки конструктивных и теплофизических параметров элементов печи для оценки их влияния на распределение температур по ее объему. Результаты расчетов верифицированы с экспериментальными промерами температур в реальной печи в процессе производства.

Ключевые слова: температурное поле, математическое моделирование, муфельная печь, температурные возмущения, метод элементарных балансов

Abstract. In this work, software for numerical simulation and analysis of the non-stationary

temperature field of a shaft-type furnace used for melt and glass product manufacturing is developed. The main purpose of the work is to develop a program that implements a computer model of the temperature field of a shaft-type muffle furnace to analyze the temperature distribution inside the furnace and in the under-furnace space. The developed software allows to visualize the non-stationary temperature field of the furnace in dynamics, as well as to obtain and analyze the results of modeling in graphical and numerical form. In addition, the program provides the possibility to adjust the structural and thermophysical parameters of the furnace elements to assess their influence on the temperature distribution over its volume. The results of calculations are verified with experimental measurements of temperatures in a real furnace during the production process.

Keywords: temperature field, mathematical modeling, muffle furnace, temperature perturbations, method of elementary balances

Высокотемпературные печи шахтного типа применяются для термической обработки различных материалов в металлообрабатывающей промышленности, металлургии, машиностроении и т.д., например, таких как металлообработка, обжиг кирпичей, производство извести, обжиг керамики и другие [1-6]. Конструкции печей такого типа похожи и основные составляющие это корпус с разным уровнем изоляции, нагревательные элементы различного типа, и системы регулирования температуры.

Анализ литературы показал, что большинство публикаций и авторских свидетельств посвящены в основном печам, применяемым в металлургии и в части конструктивных аспектов таких печей [2,3,7]. Однако при проектировании или модернизации печи важно понимать, как может влиять на тепловые процессы тот или иной конструктивный параметр. Помочь в этом может компьютерная модель, которая без дополнительных временных и финансовых затрат позволит с определенной точностью предсказать результат конструктивных изменений [7-11].

Вообще, для моделирования температурных полей в различных объектах с успехом применяются различные коммерческие программные пакеты, их набор не очень богат. Среди наиболее распространённых можно выделить MATLAB/SIMULINK, ANSYS и подобные. Такие пакеты являются универсальным инструментом, предназначенным для решения широкого круга задач, однако имеют определенные недостатки. Во-первых, это высокая стоимость, а в условиях санкций порой недоступность приобретения и поддержки, во-вторых необходимость в квалифицированном персонале, обученном для использования конкретного пакета.

В данной работе показана реализация специализированного программного обеспечения (СПО), предназначенного для расчета нестационарного неоднородного температурного поля муфельной печи, предназначенной для вытяжки стеклянных трубок и стержней произвольного поперечного сечения. Назначение данного СПО – численное моделирование температурного поля печи для анализа распределения температур в критически важных точках, напрямую влияющих на качество получаемых изделий. Основное достоинство

данного СПО – простота использования, понятный интерфейс, отсутствие необходимости приобретения дорогостоящих коммерческих пакетов. К недостаткам можно отнести реализацию модели конкретной конструкции печи, но с возможностью вариации конструктивных параметров в определенных пределах.

Цель работы - разработка оригинального специализированного программного обеспечения для выполнения численного моделирования нестационарного неоднородного температурного поля муфельной печи, предназначенной для изготовления изделий из стекла, выполнение верификации результатов расчетов с данными промеров температур в реальной печи.

Объект моделирования, методы и описание программного обеспечения

В разработанном СПО реализована модель печи, которая производится ООО «ТОСС» г. Саратов [12] и является элементом установки, предназначенной для вытяжки стеклянных трубок и стержней произвольного поперечного сечения из расплава стеклблоков. Конструкция печи представляет собой цилиндр, состоящий из нескольких слоев различных материалов (обечайка, изоляция, огнеупорный кирпич), внутренняя полость, в которой располагается нагревательный элемент и площадка для размещения стеклблока, и крышка. Конструкция печи схематично показана на рис. 1.

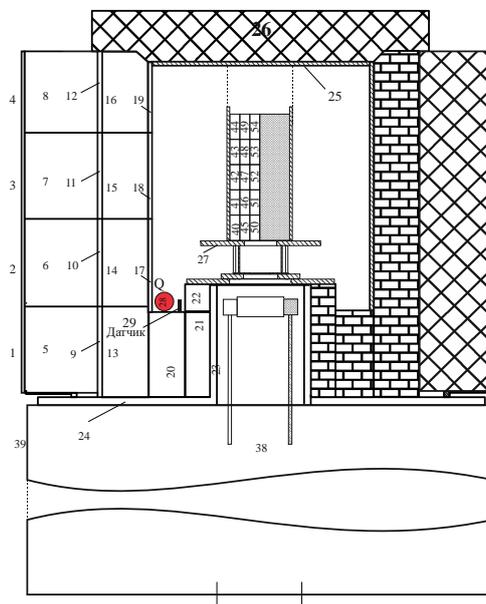


Рис. 1. Общий вид печи с разбиением на расчетные точки («элементарные» объемы)

Для реализации данного СПО были решены задачи построения тепловой модели, определены тепловые связи и выполнен расчет всех необходимых теплофизических параметров. Также были определены основные формулы и соотношения, составляющие математическую модель тепловых процессов, в

основе которых лежит хорошо апробированный метод элементарных балансов [13,14]

Поскольку конструкция печи представляет собой симметричную цилиндрическую форму, для упрощения расчетов рассматривается двумерный случай, в предположении, что температурное поле однородно по окружности и неоднородно в радиальном и вертикальном направлениях.

Данное СПО написано на объектно-ориентированном языке программирования C# и является полностью оригинальной разработкой, которое позволяет выполнять расчет температур по объему печи, включая размещенный в ней стеклоблок. Возможности ПО позволяют настраивать модель под нужную конструкцию печи в рамках типовой, включая геометрические размеры, свойства материалов, мощность нагревательного элемента, параметры ПИД регулятора температуры и др. Вывод результатов расчетов выполнен в виде цветовой диаграммы температурного поля и графиков температур в расчетных точках. Кроме того, реализована возможность вывода диаграмм распределения температур по высоте стеклоблока в трех слоях равной толщины внутреннем, среднем и внешнем. Кроме того, для дальнейшего анализа в табличном редакторе, например, MS Excel, возможна выгрузка результатов расчета в файл формата "CSV".

Структурная схема СПО показана на рис. 2.

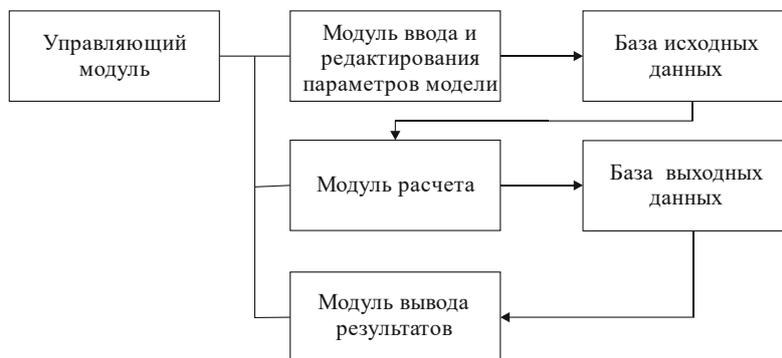


Рис. 2. Структурная схема СПО

На рис. 3, 4, 5 представлены скриншоты с окном вывода распределения температур в вертикальном сечении печи в графической форме в виде цветовой диаграммы, по которой можно получить представление о качественной картине температурного поля в каждый момент времени, окна выбора элемента конструкции (расчетной точки) для вывода графиков температур, параметры настройки геометрии печи и графики температур в стеклоблоке.

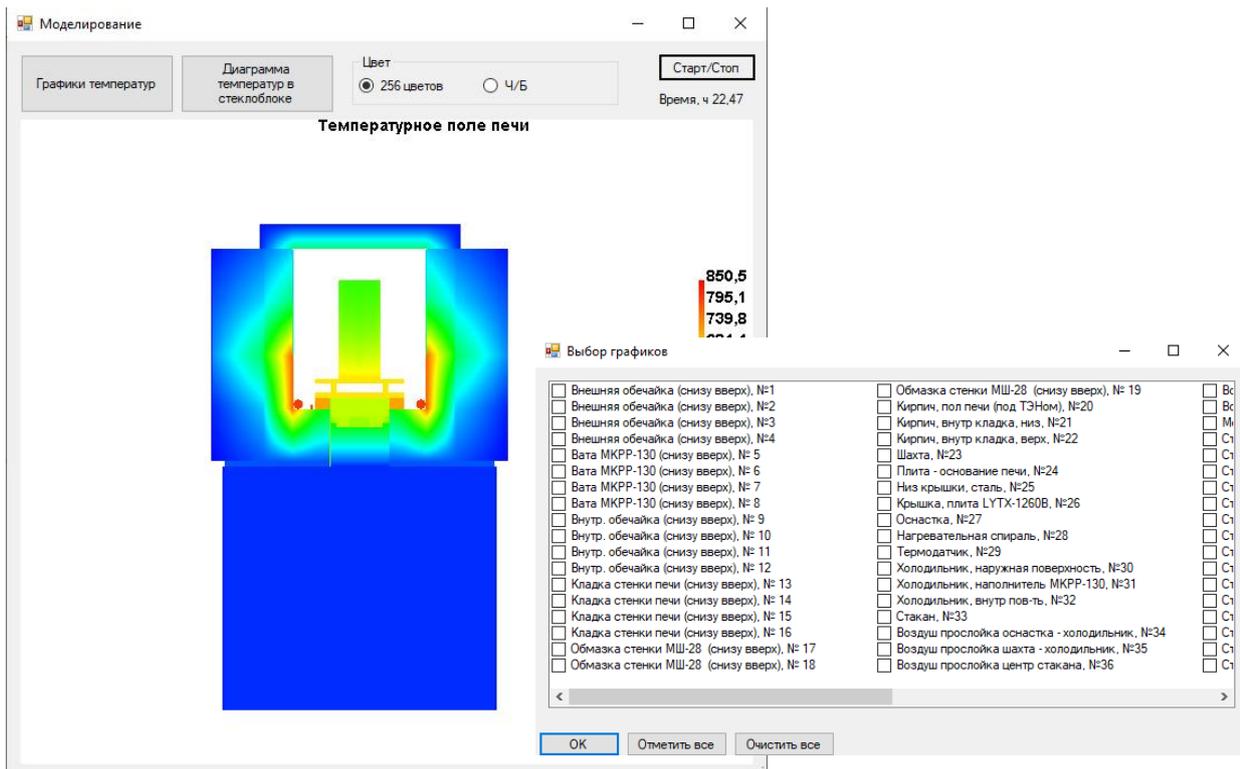


Рис. 3. Скриншоты окон конфигурации температурного поля и окна выбора графиков для вывода на экран.

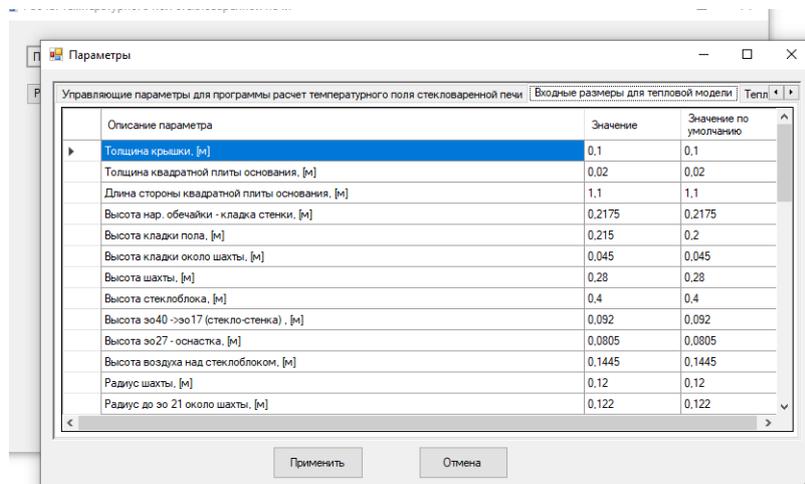


Рис. 4. Скриншот окна настройки геометрических размеров печи.

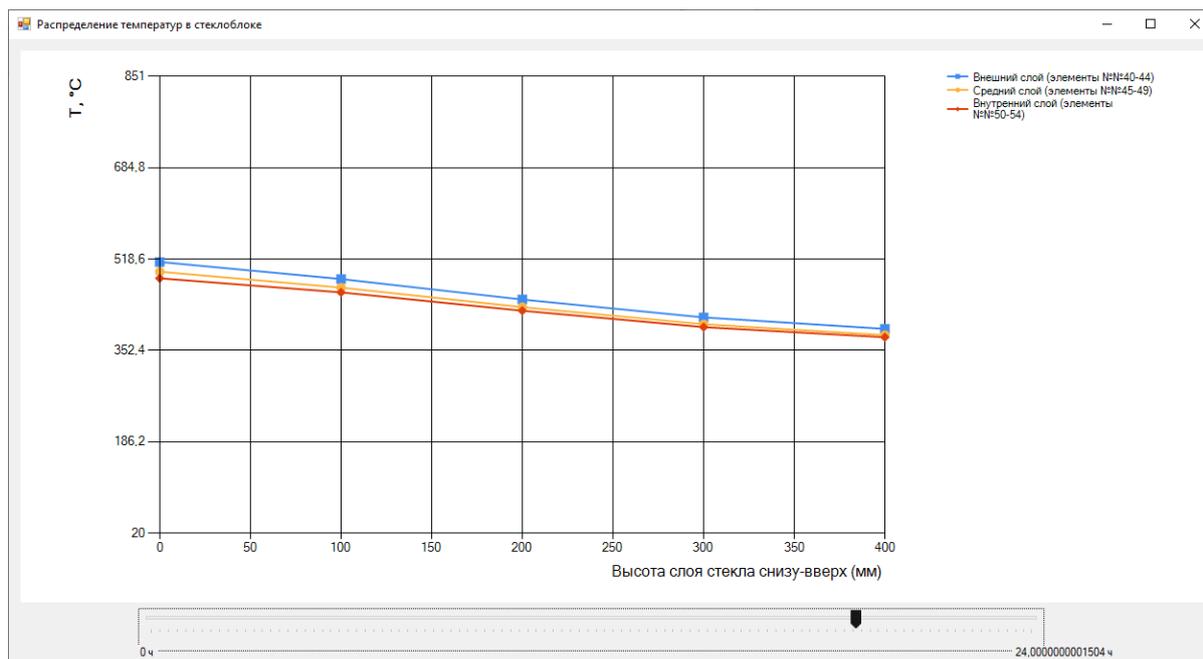


Рис. 5. Скриншот окна графиков температур в стеклоблоке.

Точность расчетов зависит от различных факторов. В частности, при использовании метода элементарных балансов — это, главным образом, количество расчетных точек, точность расчета коэффициентов теплопроводимостей и шаг расчета. При теплообмене излучением, который является основным в высокотемпературных печах, расчет коэффициентов теплопроводимостей зачастую вызывает существенные математические трудности, поэтому для дополнительной настройки модели предусмотрено использование поправочных коэффициентов.

После настройки модели в программе выполнена верификация расчета температур в печи с данными натуральных испытаний. На рис. 4 представлены данные замеров температуры в центре стеклоблока на этапе прогрева в течение 24 часов и данные, полученный при расчете модели в СПО.

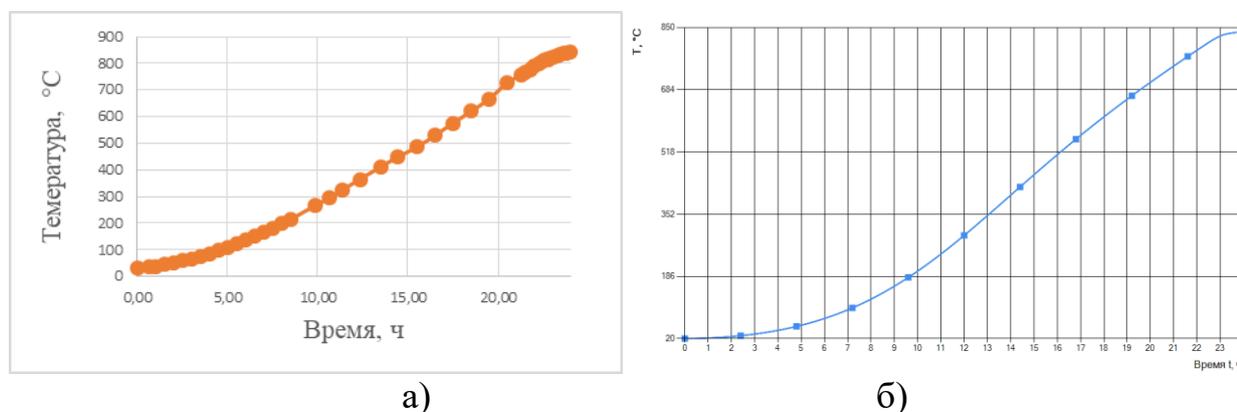


Рис. 4. Температура в центре стеклоблока: а) эксперимент б) расчет

В установившемся режиме разница температур в центре стеклоблока между расчетом и экспериментом составляет 1-2 °С, что является хорошей точностью.

Заключение.

Разработана тепловая модель действующей печи, определены тепловые связи и способы их расчета. Определены основные соотношения и формулы, составляющие математическую модель неоднородного нестационарного температурного поля печи.

Разработано специализированное программное обеспечение для расчета неоднородного нестационарного температурного поля муфельной печи. Выполнена верификация полученных результатов расчета с реальными данными замеров температур внутри печи и стеклоблока. Показана возможность моделирования температурного поля с достаточной точностью.

Разработанное программное обеспечение позволяет оценить влияние конструктивных изменений на конфигурацию температурного поля по объему печи, не прибегая к дорогостоящим и затратным по времени натурным экспериментам.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания министерства образования и науки РФ № 122030100145-3.

Литература

1. Казанцев Е. И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. – М. : Металлургия, 1975. 368 с.
2. Теплотехнические расчеты металлургических печей: учеб. пособие / под ред. А. С. Телегина. – М. : Металлургия, 1982. 358 с.
3. Андреев А. Д. Плавка алюминиевых сплавов в шахтных печах / А. Д. Андреев, В. Б. Гогин, М. З. Темчин // Проблемы цветной металлургии. – М. : Металлургия, 1988. 152 с.
4. Захаров А. В., Шаяхметов У. Ш. Муфельная печь с высокоточным температурным режимом. Огнеупоры и техническая керамика. 2016, №6. с. 9–14.
5. Barot Rakesh, Ayar Mayur, Beravala Dr. (2019). Energy Efficient and Sustainable Design and Development of Muffle Furnace for Melting Alloys. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.3462641.
6. Aleko V.A., Lebedev M.B. Module structure of shaft electric furnaces for heat treatment of long parts. *Met Sci Heat Treat* **40**, 301–302 (1998). <https://doi.org/10.1007/BF02474898>
7. Состояние вопроса и перспективы математического моделирования термической переработки строительных материалов в шахтных печах: Ивановский государственный химико-технологический университет / Ванюшкин В. А., Волынский В. Ю., Зайцев В. А., Мизонов В. Е. – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2004. 52 с. – ISBN 59161600459. – EDN OGBXOQ.

-
8. Ванюшкин Н. М. Применение методов математического моделирования для расчета шахтных печей / Н. М. Ванюшкин, А. В. Семушкин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе, 2012. № 2(3). с. 95-100. – EDN RPUFGL.
 9. Mishra N., Sathyanarayan P. "Modeling of an expert system for an electric muffle furnace for simple heat treatment processes," 2012 Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE), Ahmedabad, India, 2012, pp. 1-6, doi:10.1109/NUICONE.2012.6493280.
 10. Lucák Jiří. (2016). A Mathematical Model of Thermal Processes in the Empty Electric Muffle Furnace. Transactions on Electrical Engineering. 5. 14-20. <https://doi.org/10.14311/TEE.2016.1.014>.
 11. Takenaka Y., Kimura Y., Narita K., Kaneko D. Mathematical model of direct reduction shaft furnace and its application to actual operations of a model plant, Computers & Chemical Engineering, Volume 10, Issue 1, 1986. pp 67-75, [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(86\)85047-5](https://doi.org/10.1016/0098-1354(86)85047-5).
 12. <https://www.tegs.ru/about/>
 13. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. 149 с.
 14. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.