



УДК 669.162.214

**М. А. Волк, А. Н. Бугрий**, кандидаты техн. наук,  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
(Украина, 61166, г. Харьков, пр. Ленина, 14, каф. ЭВМ,  
тел. (057) 702-13-54, E-mail: volk@kture.kharkov.ua, capral@kture.kharkov.ua),

**А. Л. Скоромный**  
Украинский государственный научно-технический центр «Энергосталь»  
(Украина, 61166, г. Харьков, пр. Ленина, 9,  
тел. (057) 702-57-01+ доп. 2-29, факс (057) 702-17-32,  
E-mail: escs@energostal.kharkov.ua)

### **Алгоритм и программа расчета и визуализации двухмерного температурного поля вертикального плитового холодильника**

*(Статью представил д-р техн. наук В. П. Симоненко)*

Предложена математическая модель стационарного процесса переноса теплоты вертикального плитового холодильника для доменной печи в системе гарнисаж (кладка)—набивка—плитовой холодильник—засыпка—кожух. На основе этой модели разработан алгоритм и программа, позволяющие рассчитать тепловое поле, а также визуализировать результаты расчета. Рассмотрена возможность распараллеливания алгоритма.

Запропоновано математичну модель стаціонарного процесу переносу теплоти вертикального плитового холодильника для доменної печі в системі гарнисаж (кладка)—набивання—плитовий холодильник—засипання—кожух. На основі цієї моделі розроблено алгоритм і програму, що дозволяють розрахувати теплове поле, а також візуалізувати результати розрахунку. Розглянуто можливість створення паралельного алгоритму.

*Ключевые слова: плитовой холодильник, температурное поле, алгоритм, программа.*

Надежность работы и длительность кампании доменной печи (ДП) в значительной степени определяется условиями взаимодействия ее системы охлаждения и футеровки [1]. Система охлаждения состоит из элементов тепловой защиты различных конструкций, соединенных между собой трубопроводами. В настоящее время 60—70% ДП в индустриально развитых странах мира оборудованы вертикальными плитовыми холодильниками [2]. Одной из проблем их расчета является не удовлетворительная длительность кампаний ДП, поэтому совершенствование конструкции вертикальных плитовых холодильников — актуальная и важная задача теплоэнергетики доменного производства.

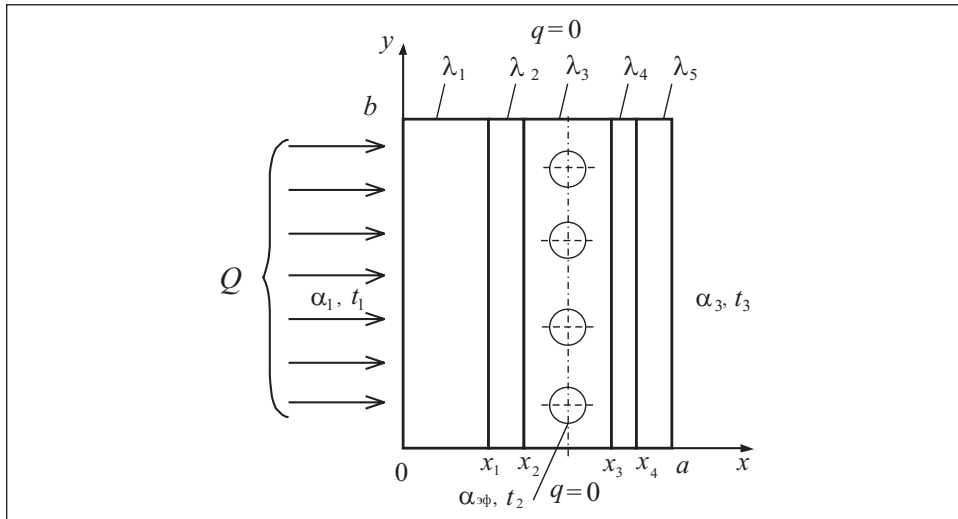


Рис. 1

**Математическая модель температурного поля холодильника.** Поскольку горизонтальные тепловые потоки в ДП в 40 раз превышают вертикальные [3], для упрощения расчета температурного поля в исследуемой системе трехмерная задача расчета температурного поля сведена к двумерной (рис. 1) с достаточной степенью точности. На рис. 1 обозначено:  $Q$  — тепловой поток, Вт;  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$  — коэффициенты соответственно теплопроводности гарнисажа (кладки), засыпки, холодильника, набивки, кожуха, Вт/(м · К);  $\alpha_1, \alpha_{эф}, \alpha_3$  — коэффициенты теплоотдачи соответственно от газов к кладке, от стенки трубки к охладителю, от кожуха к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $t_1, t_2, t_3$  — температура газов соответственно в печи, охладителя, воздуха окружающей среды, °С.

При реализации алгоритма в расчетной схеме приняты следующие допущения, также позволившие существенно упростить решение поставленной задачи:

учитывая малое отношение толщины к наружному диаметру кожуха ( $d_n/d_b \ll 2$ ), кривизной кожуха пренебрегаем с погрешностью менее 4% [4];

теплофизические характеристики плитового холодильника, набивки и кожуха постоянны;

горячая поверхность холодильника — гладкая;

структура гарнисажа, образованного на поверхности кладки, гомогенная;

на границе материалов с различными коэффициентами теплопроводности выполняется условие совершенного теплового контакта.

Запишем в общем виде дифференциальное уравнение теплопроводности в декартовых координатах:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho C}, \quad (1)$$

где  $\frac{\partial t}{\partial \tau}$  — градиент температуры во времени, для стационарной задачи  $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ ;  $a$  — коэффициент температуропроводности  $a = \frac{\lambda}{\rho C}$ , м<sup>2</sup>/с;  $\rho$  — плот-

ность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  — теплоемкость, кДж/(кг · К);  $q_v$  — внутренние источники теплоты,  $q_v = 0$ . Для решения стационарной двухмерной задачи теплопроводности без внутренних источников тепла уравнение (1) преобразуется к виду

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

При решении этого уравнения используют следующие краевые условия:

1) начальное условие распределения температур

$$t = t_0(x, y); \quad (3)$$

2) граничные условия третьего и четвертого рода на внешних поверхностях исследуемой системы:

на границе системы, обращенной к внутреннему пространству печи, условия теплообмена между газами и кладкой или гарнисажем при  $x = 0$

$$-\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 (t_1 - t); \quad (4)$$

на границе системы, обращенной к окружающей среде, условия теплообмена между кожухом и воздухом окружающей среды при  $x = a$

$$-\lambda_5 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=a} = \alpha_3 (t - t_3); \quad (5)$$

на боковых торцах системы тепловой поток отсутствует (выполняется условие симметрии) — при  $y = 0$

$$\frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad (6)$$

при  $y = b$

$$\frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=b} = 0; \quad (7)$$

на поверхности охлаждающих трубок условия теплообмена между поверхностью и охлаждающей водой

$$-\lambda_3 \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha_{\text{ок}}(t - t_2), \quad (8)$$

где  $n$  — нормаль к поверхности трубок;

на границах контакта слоев с различными теплофизическими свойствами при  $x = x_i$

$$-\lambda_i \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=x_i+1}, \quad (9)$$

где  $i = 1 \div 4$ .

Решение дифференциального уравнения (2) с краевыми условиями (3) — (9) осуществляется построением на исследуемой системе (см. рис. 1) сетки из прямоугольных элементов, в узлах которой проводится поиск значений температур, выполняется формирование для каждого узла сетки алгебраического уравнения в конечно-разностной форме и решение системы полученных уравнений итерационным методом с помощью компьютерной программы на ЭВМ.

Учет термического сопротивления слоя накипи, стальных охлаждающих труб и зазора из слоя маршалитовой обмазки и воздуха между трубами и телом чугунных холодильников осуществляется с помощью использования эффективного коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_{\text{эф}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{\text{нак}}}{\lambda_{\text{нак}}} + \frac{\delta_{\text{тр}}}{\lambda_{\text{тр}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}},$$

где  $\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи к охлаждающей воде, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta_{\text{нак}}$ ,  $\delta_{\text{тр}}$ ,  $\delta_3$  — соответственно толщина слоя накипи, стенки трубки, зазора из слоя маршалитовой обмазки и воздуха между трубами и телом чугунных холодильников, м;  $\lambda_{\text{нак}}$ ,  $\lambda_{\text{тр}}$ ,  $\lambda_3$  — коэффициент теплопроводности соответственно слоя накипи, стенки трубки, зазора из слоя маршалитовой обмазки и воздуха между трубами и телом чугунных холодильников, Вт/(м·К).

На основе изложенного реализована программа `ТерлоРоле.exe` на языке программирования C++, состоящая из двух модулей: интерфейсного и вычислительного.

**Особенности построения программного обеспечения.** Интерфейсный модуль реализует взаимодействие с пользователем, а визуализация теплового поля позволяет наглядно представить тепловые процессы, протекающие в плитовом холодильнике. Температурное поле в программе

представлено в виде матрицы  $T = \overline{t_{xy}}$ ,  $x = \overline{1, X}$ ,  $y = \overline{1, Y}$ , где  $X, Y$  — размеры холодильника. Для визуализации распределения температур принято следующее: максимальная температура представлена красным цветом, минимальная — синим, все промежуточные температуры представлены промежуточными цветами.

Для визуализации используется RGB формат представления цвета, где каждый пиксель определяется как  $p = \{r, g, b\}$ , а все температурное поле — матрицей  $p_{ij} = (r_{ij}, g_{ij}, b_{ij})$ ,  $i = \overline{1, X}$ ,  $j = \overline{1, Y}$ :

$$r_{ij} = \frac{(t_{ij} - t_{\min})}{(t_{\max} - t_{\min})} C, \quad g_{ij} = 0, \quad b_{ij} = C - r.$$

Здесь  $C$  — число градаций одной из составляющих цвета;  $t_{\max} = \max(t_{ij})$  и  $t_{\min} = \min(t_{ij})$  — максимальная и минимальная температура в холодильнике.

При масштабировании изображения для равномерного представления цвета использована линейная аппроксимация градаций цвета между двумя близкими точками (градиентная заливка).

Алгоритм работы вычислительного модуля программы представлен на рис. 2. Принятие решения о прекращении итераций происходит на основе сравнения значений, полученных на двух последовательных итерациях: если все разности между величинами соответствующих температурных точек меньше заданной погрешности, итерационный процесс завершается.

Анализируя временную составляющую алгоритма, можно заметить следующее:

1. Длительность расчета зависит от начальных условий (температуры внутри ДП и температуры охлаждающей среды). Чем больше разность температур, тем больше время расчета.

2. Существенное значение имеет коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен холодильник, футеровка и другие компоненты. Это объясняется тем, что в программе, в начале каждой новой итерации, температурам в узлах сетки присваиваются новые значения.

3. Опытным путем установлено, что для высокотеплопроводных материалов расчеты делятся дольше. Чем больше разность температур, тем больше требуется итераций и соответственно больше времени (например, в случае медных холодильников).

4. Длительность расчета зависит от точности вычислений, которая задается вручную.

При сравнении результатов расчетов температурных полей с помощью разработанной компьютерной программы и данных замеров температур в

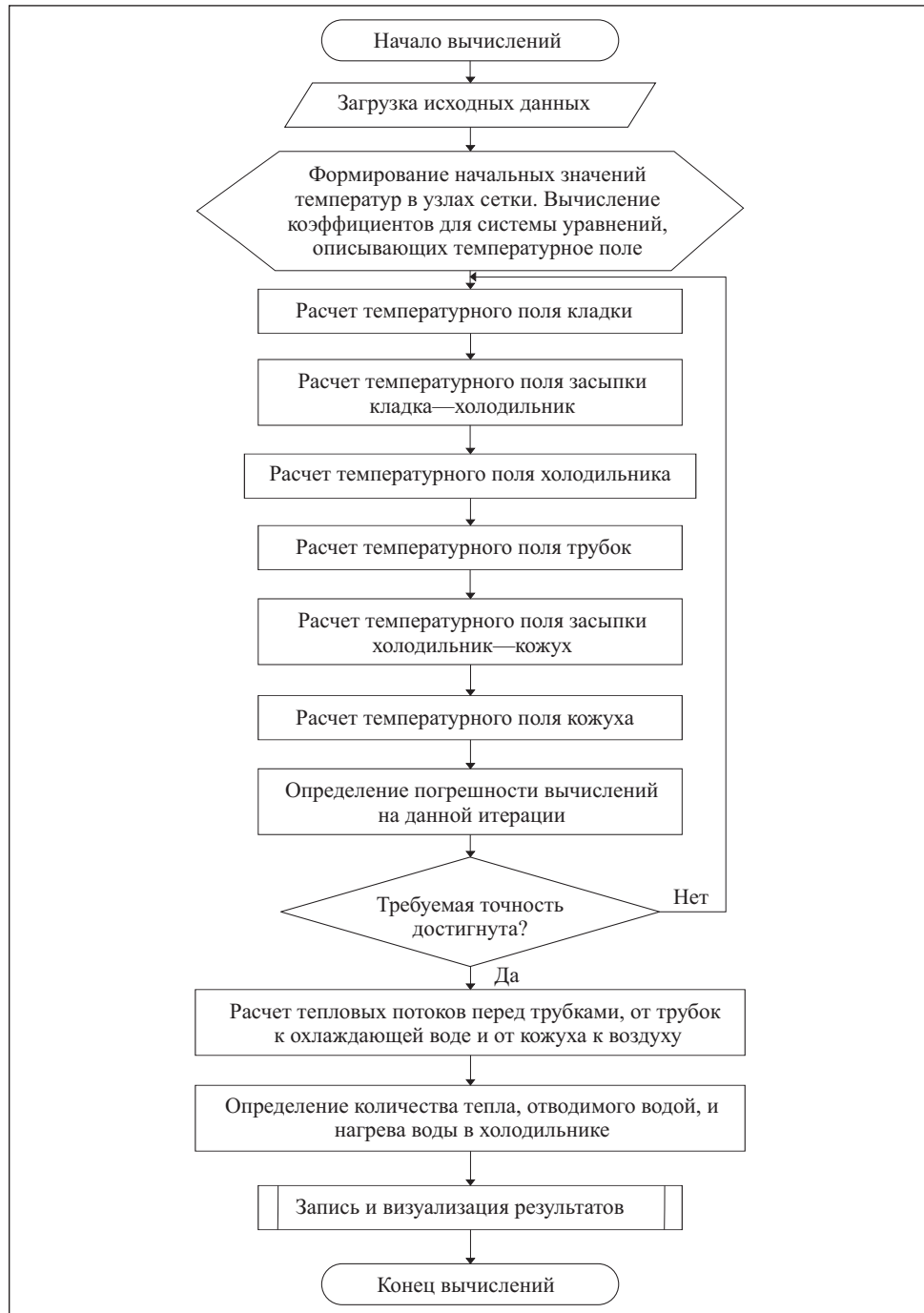


Рис. 2

вертикальных плитовых холодильниках ДП № 5 НТМК получена хорошая сходимость [5]. Различие между расчетными и измеренными значениями составило 6,2%, что является достаточной для инженерных расчетов точностью.

**Анализ способов распараллеливания алгоритма.** Предложенный алгоритм может быть распараллелен двумя способами. В первом из них предполагается мелкозернистое распараллеливание, основанное на том факте, что точки (или слой) теплового поля, а также параметры визуализации, могут быть рассчитаны параллельно. В этом случае расчет проводится независимо на основе одних и тех же исходных данных, а следовательно, требует разделяемой памяти и многопроцессорного (многоядерного) оборудования. Наиболее приемлемый интерфейс параллельного программирования для данного способа распараллеливания — OpenMP.

Второй способ основан на использовании крупнозернистого распараллеливания. Его применение возможно, во-первых, при значительном числе точек теплового поля (более 1000). В этом случае отдельные слои могут быть рассчитаны на отдельных распределенных вычислительных ресурсах. Во-вторых, этот способ используется при многовариантном анализе, когда расчет проводится многократно для поиска оптимальной конфигурации оборудования, и в-третьих, — для расчета различных сечений, всей печи и других объектов. Изменяемыми параметрами в таких расчетах могут быть как внешние, так и внутренние характеристики системы. Интерфейсом параллельного программирования может быть MPI (Message Passing Interface), средой исполнения — локальные и глобальные сети, инфраструктурой — GRID системы.

**Выводы.** 1. Разработанная на основе математической модели и метода конечных элементов на языке программирования C++ компьютерная программа `ТерлоPole.exe` расчета двумерного температурного поля вертикального плитового холодильника предназначена для использования в операционной системе Windows XP с `FrameWork 1.0`.

2. Различие рассчитанных с помощью программы и измеренных значений температур в вертикальном плитовом холодильнике составило 6,2%.

3. Предложенную компьютерную программу целесообразно использовать при разработке новых конструкций и режимов работы вертикальных плитовых холодильников для действующих и проектируемых ДП.

A mathematical model of stationary heat transfer process of the vertical tiled refrigerator for a high furnace is presented in the paper. An algorithm and program, allowing one to calculate the thermal field and to visualize the calculation results developed on the model basis. A possibility of creation of a parallel algorithm is considered.

1. Пляшкевич А. С., Стрелов К. К., Фрейденберг А. С., Сорокин И. Н. Теплотехнический анализ оптимального соотношения параметров футеровки и системы охлаждения шахты доменной печи // *Сталь*. — 1976. — № 3. — С. 209—213.
2. Каптейн Ф., Дзермейко А., Лаар Р. и др. Системы охлаждения и футеровки для доменных печей. // Там же. — 2005. — № 10. — С. 14—18.
3. Зайцев Ю. С., Филиппов О. В. Новые технические решения в охлаждении шахт доменных печей. — Харьков: Основа, 1992. — 225 с.
4. Арсеньев Г. В., Белоусов В. П., Дранченко А. А. и др. Тепловое оборудование и тепловые сети/ Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 400 с.
5. Schauer C., Filatov S., Fedotov S. et al. Application of Copper Staves to an Evaporative Cooling System of a Russian Blast Furnace // 3<sup>rd</sup> Intern. Steel Conference on New Developments in Metallurgical Process Technologies. Steel Institute VDEh. — Germany, Dueseldorf, 2007. — P. 970—977.

Поступила 04.09.08;  
после доработки 17.12.08

*ВОЛК Максим Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники, который окончил в 1995 г. Область научных исследований — параллельное и распределенное программирование, системное программирование, GRID-системы, распределенное имитационное моделирование.*

*БУГРИЙ Андрей Николаевич, канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры ЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники, который окончил в 2000 г. Область научных исследований — теория программирования, системы визуализации реального времени, 3D графика.*

*СКОРОМНЫЙ Андрей Леонидович, зам. зав. лабораторией энергосбережения в горно-металлургическом комплексе (ГМК), в Украинском государственном научно-техническом центре «Энергосталь». В 2005 г. окончил Харьковский национальный технический университет «ХПИ», а в 2008 г. — Межрегиональный ин-т последипломного образования Национального технического университета «ХПИ». Область научных исследований — выбросы парниковых газов на предприятиях ГМК, системы охлаждения высокотемпературных агрегатов, утилизация твердых органических отходов, энергосбережение на предприятиях ГМК.*