УДК 519.876.5 DOI: 10.34031/ES.2023.1.010

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СЕТКИ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Бухмиров В.В., Ракутина Д.В., Светушков И.И.

ИГЭУ, г. Иваново

Аннотация

Приведена оценка эффективности двух численных методов решения многомерных задач теории теплопроводности – метода дробных шагов и метода Либмана. Сравнение эффективности данных методов выполнено для условий работы промышленных печей на примере расчета симметричного нагрева двумерного цилиндра и трехмерной пластины, изготовленных из материалов с разными теплофизическими свойствами (корунд, керамический кирпич и углеродистая сталь). Двумерное осесимметричное температурное поле для цилиндра и трехмерное поле температур для заготовки в виде параллелепипеда найдено методом сеток при граничных условиях II и III родов. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений и краевых условий выполнена методом контрольного объема по неявной конечно-разностной схеме. Разработанные алгоритмы решения многомерных задач внутреннего теплообмена методом дробных шагов и методом Либмана реализованы в виде компьютерных программ в среде программирования Object Pascal. При сравнении эффективности решения многомерных задач данными методами в качестве критерия оптимизации использовали критерий эффективности разностных схем (КЭРС), предложенный В.В. Бухмировым и Т.Е. Созиновой. Построены номограммы для выбора оптимальных параметров пространственно-временной сетки и наилучшего численного метода решения многомерных задач для конкретного процесса нагрева (охлаждения) твердого тела.

***Ключевые слова**: многомерные задачи теории теплопроводности, метод дробных шагов, метод Либмана, критерий эффективности разностных схем, моделирование нагрева (охлаждения) твердых тел цилиндрической и прямоугольной формы.*

SELECTION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE SPACE-TIME GRID IN MATHEMATICAL MODELING OF HEATING OF WORKPIECES IN INDUSTRIAL FURNACES

Vyacheslav Bukhmirov, Daria Rakutina, Ilya Svetushkov

Ivanovo State Power University, Ivanovo

Abstract

The efficiency of two numerical methods for solving multidimensional problems of the theory of thermal conductivity – the fractional steps method and the Liebman method - is evaluated. The efficiency of these methods is compared for the operating conditions of industrial furnaces by the example of calculating the symmetrical heating of a two-dimensional cylinder and a three-dimensional plate made of materials with different thermophysical properties (corundum, ceramic brick and carbon steel). A two-dimensional axisymmetric temperature field for a cylinder and a three-dimensional temperature field for a workpiece in the form of a parallelepiped were found by the grid method under boundary conditions of the II and III genera. The difference approximation of differential equations and boundary conditions is performed by the control volume method according to an implicit finite difference scheme. The developed algorithms for solving multidimensional problems of internal heat transfer by fractional steps and the Liebman method are imple-

mented in the form of computer programs in the Object Pascal programming environment. When comparing the effectiveness of solving multidimensional problems with these methods, the criterion of the effectiveness of difference schemes (CERS) proposed by V.V. Bukhmirov and T.E. Sozinova was used as an optimization criterion. Nomograms are constructed to select the optimal parameters of the space-time grid and the best numerical method for solving multidimensional problems for a specific process of heating (cooling) a solid body.

***Keywords**: multidimensional problems of the theory of thermal conductivity, fractional steps method, Liebman method, criterion of efficiency of difference schemes, modeling of heating (cooling) of cylindrical and rectangular solids.*

Введение

Ключевой задачей математического моделирования является разработка эффективных вычислительных алгоритмов. При этом с развитием вычислительной техники задача выбора оптимальных параметров расчетной области не становится менее актуальной, а напротив, увеличение производительности современных компьютеров создает возможность для постановки всё более сложных многовариантных задач, время решения которых напрямую зависит от применяемых численных методов и алгоритмов их решения.

В реальных теплотехнических агрегатах задача теплопроводности, как правило, является многомерной, так как обрабатываемые тела имеют сложную геометрическую форму. Решение многомерных задач теории теплопроводности можно получить аналитическими и численными методами. Аналитические решения многомерных задач теплопроводности громоздки и получены лишь для немногих частных случаев [1], поэтому в настоящее время наиболее распространенными методами решения многомерных задач теории теплопроводности являются численные методы [2-4]. При разработке эксклюзивных численных математических моделей тепломассообмена наибольшее распространение получил метод конечных разностей или метод сеток. Для решения построенных на основе метода конечных разностей разностных схем в многомерных задачах теплопроводности, обычно применяют различные итерационные методы, а также метод дробных шагов [3, 5, 6].

Среди итерационных методов расчета, используемых для решения задач большой размерности, следует отметить метод простой итерации, метод Либмана и метод итерации с введением коэффициента релаксации. Все они основаны на многократном повторении одного и того же алгоритма, который дает результат, постепенно приближающийся к точному решению. Различие между методами простой итерации и Либмана заключается в разных способах присваивания новых значений переменным. В методе простой итерации присваивание уточненных значений производится после окончания расчетов на данном шаге итерации всем переменным одновременно. В методе Либмана уточненные значения переменных используются сразу же после их получения. В связи с этим скорость сходимости метода Либмана значительно выше скорости сходимости метода простой итерации [6].

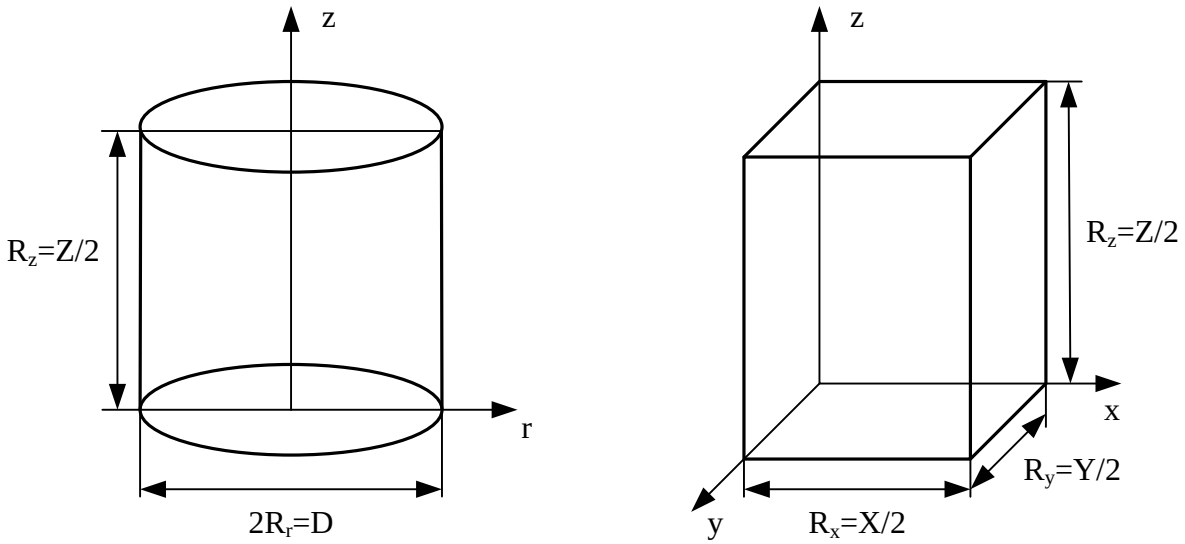
Идея метода дробных шагов заключается в замене многомерной задачи совокупностью одномерных, каждая из которых учитывает перенос тепла вдоль одного из координатных направлений. При этом расчет проводится поэтапно: на первом этапе находят некоторые промежуточные значения температур при учете переноса тепла только вдоль одной из осей координат, на втором этапе эти промежуточные значения рассматриваются в качестве исходных и производится учет теплопереноса вдоль другой оси.

Итерационные методы и метод дробных шагов отличаются друг от друга своей точностью и эффективностью. Цель данной работы заключается в сравнении эффек-

тивности двух основных методов решения многомерных задач теории теплопроводности – метода дробных шагов и метода Либмана. При этом для количественной оценки эффективности численных методов был применен критерий эффективности разностных схем (КЭРС) [7-10].

Материалы и методы

Сравнение эффективности метода дробных шагов и метода Либмана выполнено для условий работы промышленных печей при симметричном нагреве двумерного цилиндра и трехмерной пластины, изготовленных из материалов с разными теплофизическими свойствами: корунда, керамического кирпича и углеродистой стали (рис. 1).



а) **б)**

Рис. 1. К расчету температурного поля многомерных тел:
а) двумерный цилиндр (D, Z - диаметр и высота цилиндра);
б) трехмерная пластина (X, Y, Z - длина, ширина и высота пластины)

Дифференциальные уравнения теплопроводности для расчета осесимметричного температурного поля цилиндра и заготовки прямоугольной формы имеют вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right). \quad (2)$$

На поверхностях твердых тел были рассмотрены граничные условия II или III родов. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений и краевых условий выполнена методом контрольного объема по неявной конечно-разностной схеме, в результате которой получена система линейных алгебраических разностных уравнений для внутренних и граничных узлов в виде:

для двумерного цилиндра

$$A_{i,j}T_{i+1,j}^{m+1} - B_{i,j}T_{i,j}^{m+1} + C_{i,j}T_{i-1,j}^{m+1} + D_{i,j}T_{i,j+1}^{m+1} + E_{i,j}T_{i,j-1}^{m+1} + P_{i,j} = 0, \quad (3)$$

для трехмерной пластины

$$Ap_{i,j,k}T^{m+1}_{i+1,j,k} - Bp_{i,j,k}T^{m+1}_{i,j,k} + Cp_{i,j,k}T^{m+1}_{i-1,j,k} + Dp_{i,j,k}T^{m+1}_{i,j+1,k} + \\ + Ep_{i,j,k}T^{m+1}_{i,j-1,k} + Fp_{i,j,k}T^{m+1}_{i,j,k+1} + Gp_{i,j,k}T^{m+1}_{i,j,k-1} + Pp_{i,j,k} = 0, \quad (4)$$

где $T^{m}_{i,j}$, $T^{m}_{i,j,k}$ – температура в узлах сетки; i, j, k – номера узлов по пространству; m – номер расчетного момента времени.

Алгоритмы решения конечно-разностных уравнений (3) и (4) методом дробных шагов и методом Либмана были реализованы в виде компьютерных программ на языке программирования Object Pascal.

Как уже было отмечено выше, для количественной оценки эффективности этих двух численных методов решения многомерной задачи теории теплопроводности использовали критерий эффективности разностных схем (КЭРС), предложенный на кафедре Теоретических основ теплотехники ИГЭУ [7-10]. При этом разностная сетка, обеспечивающая заданную точность расчета при максимальном значении КЭРСа, является оптимальной.

Формула для расчета критерия эффективности разностных схем в общем случае имеет вид [10]:

$$K_{эрс} = \left[\varphi_{рс} \left(N_{x1} + 1 \right) \left(N_{x2} + 1 \right) \left(N_{x3} + 1 \right) \tau_{кон} / \Delta\tau \right]^{-1} \quad (5)$$

где $\varphi_{рс}$ – коэффициент, характеризующий удельные вычислительные затраты, т.е. количество элементарных операций, приходящихся на один узел пространственной сетки при расчете одного шага по времени; N_{x1}, N_{x2}, N_{x3} – число разностных слоев по трем ортогональным координатам; $\tau_{кон}$ – время нагрева; $\Delta\tau$ – шаг по времени.

При определении $\varphi_{рс}$ в качестве единицы измерения удобно использовать величину удельных вычислительных затрат, необходимых для реализации некоторого базового алгоритма. В этом случае коэффициент $\varphi_{рс}$ приобретает смысл коэффициента относительной трудоемкости, который может быть определен по соотношению времени расчета по программам, реализующим исследуемый и базовый алгоритмы решения разностных схем.

Для корректного определения коэффициента относительной трудоемкости $\varphi_{р.с.}$ необходимо:

– вычислительные программы писать на одном и том же языке программирования и в одном стиле (организация циклов, описание идентичных переменных и т.п.);

– вычислительный эксперимент проводить на одном классе персональных компьютеров.

В качестве базовой схемы была принята разностная схема, реализуемая методом дробных шагов. Коэффициент относительной трудоемкости для базовой разностной схемы по определению равен единице $\varphi^{МД}_{рс} = 1$. Коэффициент относительной трудоемкости для метода Либмана находили как отношение времени расчета этим методом к времени расчета базовым методом:

$$\varphi^{МЛ}_{р.с} = \frac{\tau^{МЛ}}{\tau^{МД}} \quad (6)$$

Для решения поставленной задачи необходимо исследовать зависимость критерия эффективности разностных схем от относительной максимальной погрешности

расчета температурного поля Δ_{max} при разном числе сеточных слоев по пространству и времени.

Максимальную относительную погрешность расчета температурного поля трехмерной пластины и двумерного цилиндра в конечный момент времени определяли по формулам:

$$\Delta_{max} = \frac{\max\limits_{i,j,k}\left|T(x_i, y_j, z_k, \tau_{кон}) - T^M_{i,j,k}\right|}{T(x_i, y_j, z_k, \tau_{кон})} \quad \text{и} \quad \Delta_{max} = \frac{\max\limits_{i,j}\left|T(r_i, z_j, \tau_{кон}) - T^M_{i,j}\right|}{T(r_i, z_j, \tau_{кон})} \tag{7}$$

где $T(x_i, y_j, z_k, \tau_{кон})$ и $T(r_i, z_j, \tau_{кон})$ – точные значения температур в узлах пространственной сетки в момент времени $\tau_{кон}$; $T^M_{i,j,k}$ и $T^M_{i,j}$ – значения температур в узлах пространственной сетки в момент времени M, соответствующий конечному моменту времени $\tau_{кон}$, рассчитанные по методу конечных разностей.

Точные значения температур $T(x_i, y_j, z_k, \tau_{кон})$ и $T(r_i, z_j, \tau_{кон})$ найдены суперпозицией (наложением) температурных полей тел простой формы, которые получены по известному аналитическому решению [11, 12].

Результаты

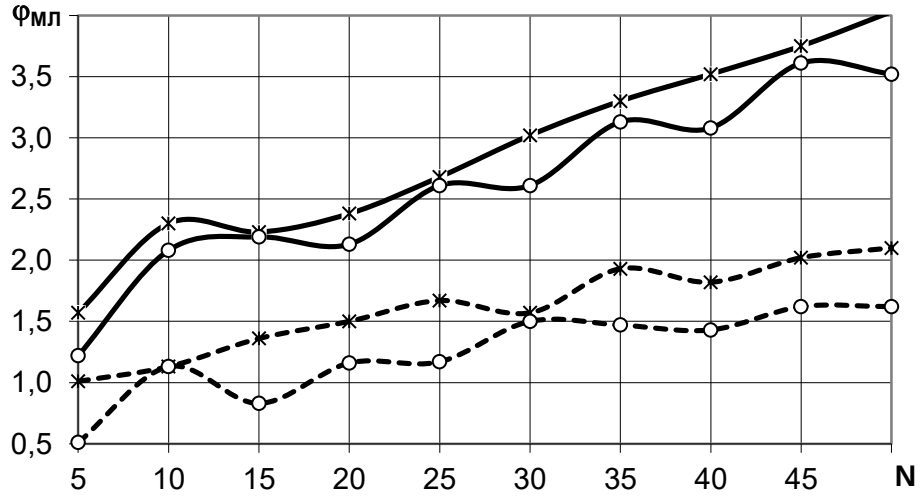
В результате расчета получили зависимости коэффициента относительной трудоемкости $\varphi^{МЛ}_{р.с}$ от числа разностных слоев по пространству N для двумерного цилиндра (пунктирная линия) и трехмерной пластины (сплошная линия) при граничных условиях II и III рода (рис. 2). Графики построены при постоянном значении шага по времени, равном одной секунде $\Delta\tau = 1$ с.

Из графиков, показанных на рис.2, видно, что зависимость $\varphi^{МЛ}_{р.с} = f(N)$ имеет колебательный характер и с увеличением числа разностных слоев по пространству коэффициент относительной трудоемкости возрастает. При этом абсолютное значение $\varphi^{МЛ}_{р.с}$ зависит от теплофизических свойств материала. Колебательный характер зависимости $\phi^{МЛ}_{р.с} = f(N)$ объясняется изменением погрешности аппроксимации в зависимости от числа слоев разбиения по пространству.

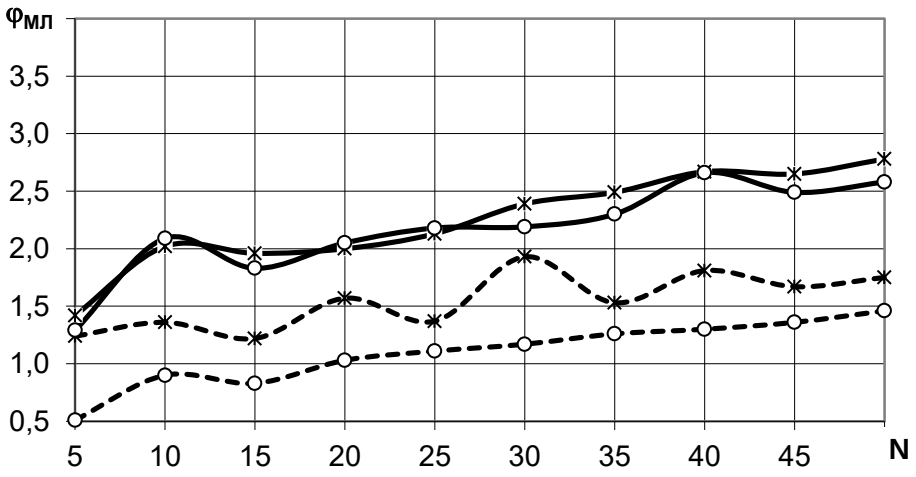
Анализ данных, представленных на рис. 2, позволяет заключить, что трудоемкость метода Либмана в основном выше трудоемкости метода дробных шагов, однако при условии $N < 15$ и $\Delta\tau \le 1$ с коэффициент относительной трудоемкости метода Либмана меньше единицы $\varphi^{МЛ}_{р.с} \le 1$, что говорит о меньшей трудоемкости метода Либмана по сравнению с методом дробных шагов.

При численной реализации разработанной математической модели теплопроводности необходимо обеспечить заданную точность расчета при минимальном объеме вычислений. Для этого необходимо выбрать оптимальные размеры сеточной области для решения конкретной краевой задачи. В результате компьютерного исследования построены 12 номограмм, которые позволяют для конкретного случая кондуктивного теплообмена рассчитывать оптимальные параметры пространственно-временной сетки и выбирать предпочтительный метод численного расчета многомерных задач теплопроводности по критерию эффективности разностных схем (КЭРС).

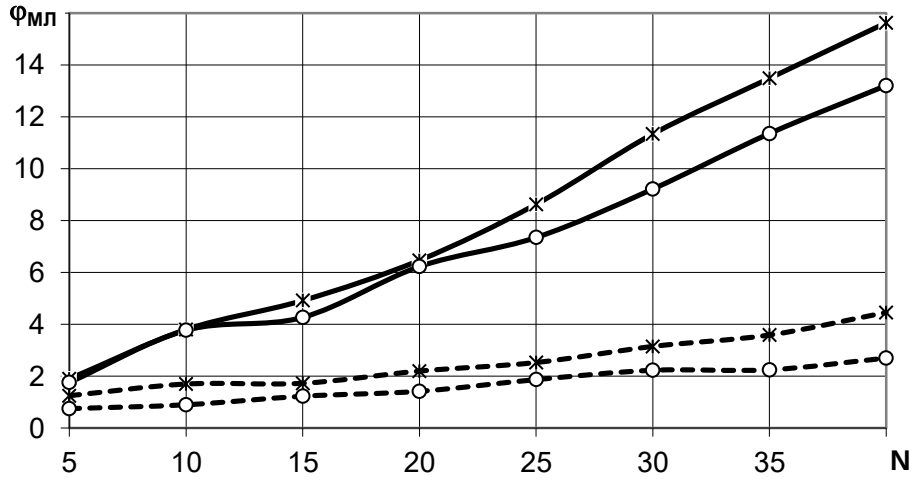
На номограммах показана зависимость КЭРС для метода дробных шагов и для метода Либмана и сеточных параметров (N, $\Delta\tau$) от максимальной относительной погрешности расчета температурного поля в конечный момент времени (Δ_{max}).



а) корунд



б) керамический кирпич

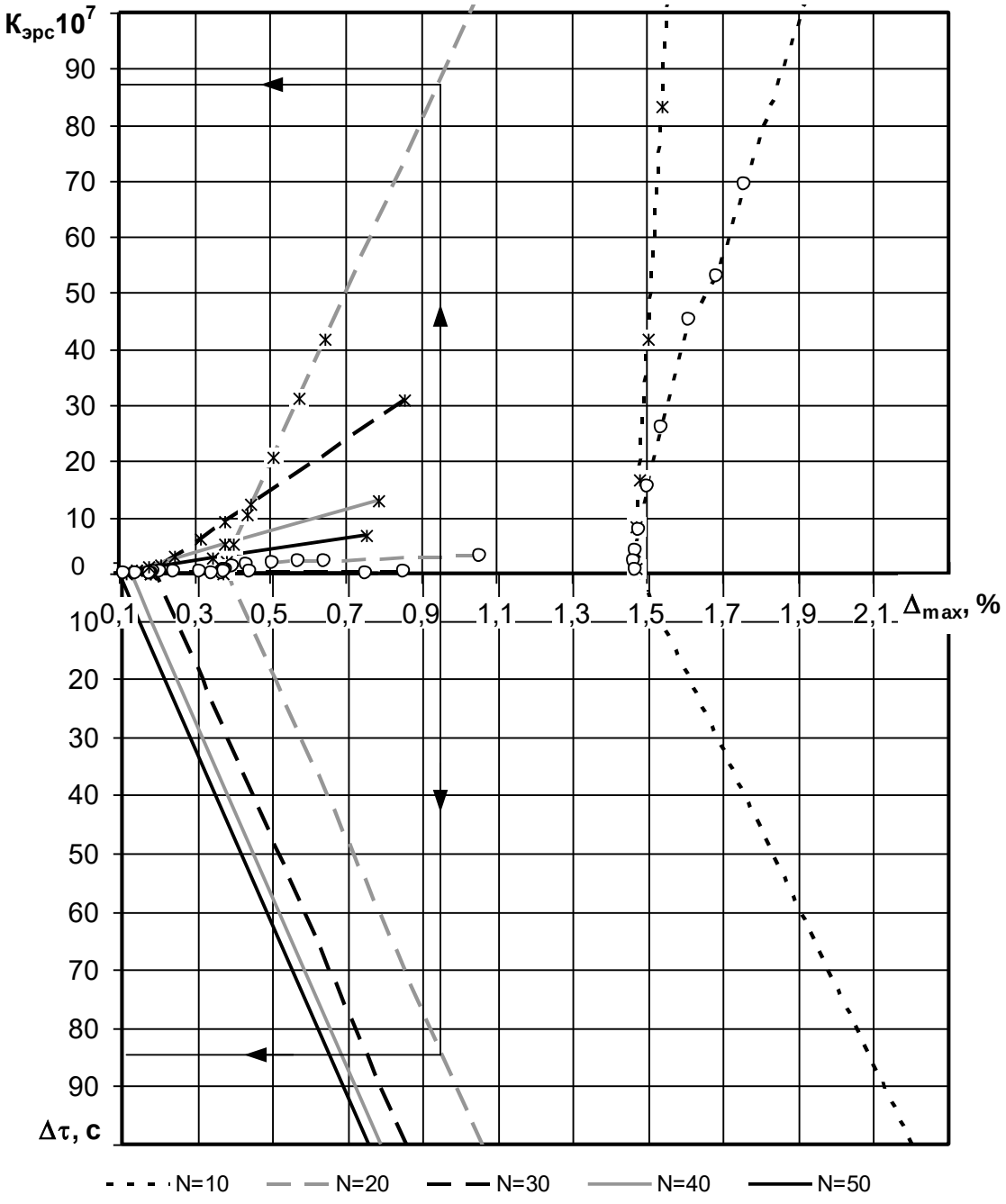


в) углеродистая сталь

– – – – – - двумерный цилиндр; ——— трехмерная пластина

о – граничные условия II рода; ж – граничные условия III рода

Рис. 2. Зависимость коэффициента относительной трудоемкости метода Либмана от числа разностных слоев по пространству



ж – метод дробных шагов; о – метод Либмана

Рис. 3. Зависимость КЭРС от максимальной относительной погрешности и параметров разностной сетки в конечный момент времени нагрева для трехмерной пластины при граничных условиях II рода (материал – корунд)

Номограммы построены для двумерного цилиндра и трехмерной пластины, изготовленных из материалов с разными теплофизическими свойствами, при граничных условиях II и III рода. Графики построены при одинаковом числе разностных слоев по каждому из координатных направлений N. В качестве примера на рис. 3 представлена номограмма для трехмерной пластины, изготовленной из корунда, при граничных условиях II рода.

Зависимости $К_{эрс}=f(\Delta_{max}, \Delta\tau, N)$ позволяют по заданной точности расчета Δ_{max} подобрать значения N и $\Delta\tau$, при которых значение КЭРС имеет максимальное значение. Также по заданному числу разностных слоев по пространству и времени можно опре-

делить максимальную относительную погрешность расчета температурного поля и значение КЭРС. Например, из анализа графиков на рис. 3 следует, что расчет температурного поля трехмерной пластины, изготовленной из корунда, с точностью менее 1% необходимо выполнять методом дробных шагов при числе слоев по пространству N=20 и шаге по времени Δτ = 85с.

Установлено, что соотношение эффективности методов дробных шагов и Либмана зависит от параметров пространственно-временной сетки. Так, например, на рис. 3 видно, что при N≥30 и Δτ <20с, а также при N = 10 и Δτ<5с критерий эффективности имеет одинаковое значения для метода дробных шагов и метода Либмана. Однако, при N = 20 и Δτ = 50с критерий эффективности метода дробных шагов ~ в 25 раз больше критерия эффективности метода дробных шагов.

Выводы

1. Исследована эффективность двух основных методов решения многомерных задач теории теплопроводности – метода дробных шагов и метода Либмана. Для сравнительной оценки эффективности методов применен критерий эффективности разностных схем, предложенный на кафедре ТОТ ИГЭУ.

2. Разработаны алгоритмы решения многомерных задач внутреннего теплообмена методом дробных шагов и методом Либмана, которые реализованы в виде компьютерных программ.

3. Компьютерное исследование показало, что трудоемкость метода Либмана в основном выше трудоемкости метода дробных шагов. Однако, при определенных параметрах пространственно-временной сетки (N <15 и Δτ ≤ 1с) скорость расчета методом Либмана выше скорости расчета методом дробных шагов.

4. Анализ эффективности методов дробных шагов и метода Либмана показал, что при расчете на разностных сетках с большим шагом по времени и пространству эффективнее оказывается метод дробных шагов. На сетках с мелким шагом по времени и пространству эффективность метода дробных шагов практически совпадает с эффективностью метода Либмана.

5. По результатам компьютерного моделирования построены номограммы для расчета оптимальных сеточных параметров и выбора предпочтительного метода численного расчета многомерных задач теплопроводности по критерию эффективности разностных схем (КЭРС)

6. Результаты данной работы в дальнейшем могут быть использованы при математическом моделировании процессов теплопроводности в телах цилиндрической и прямоугольной формы (керамический кирпич, абразивные круги, стальные заготовки) при их термообработке в промышленных печах [13, 14] и в других элементах теплоэнергетического оборудования.

Библиографический список

1. Кудинов В.А., Карташов Э.М., Калашников В.В. Аналитические решения задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций: Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2005. 430 с.
2. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000. 315 с.
3. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кабельков Г.М. Численные методы. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 630 с.
4. Каханер Д., Маулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. М.: Мир, 1998. 575 с.

5. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
6. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск: Наука и техника, 1976. 144 с.
7. Бухмиров В.В. Разработка и использование математических моделей для решения актуальных теплотехнических задач металлургического производства: Дис... д-ра техн. наук: 05.16.02. М.: МИСИС, 1998. 464 с.
8. Созинова Т.Е. Разработка метода расчета и исследование теплового и термонапряженного состояния крепи геотермальных скважин: Дис… канд. техн. наук: 05.14.04. Иваново: ИГЭУ, 1997. 238 с.
9. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Созинова Т.Е. Оценка эффективности разностных схем решения задач теплопроводности // Известия Вузов. Черная металлургия. 1999. № 9. С. 58–60. EDN: XQKOFG
10. Бухмиров В.В., Крупенников С.А., Созинова Т.Е. Критерий эффективности разностных схем решения задач теплообмена // Автоматизированный печной агрегат – основа энергосберегающих технологий металлургии XXI века. Международная научно-практическая конференция. М.: МИСИС, 2000. С. 109–110.
11. Бровкин Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах. Иваново: ИЭИ им. Ленина, 1973. 364 с.
12. Бухмиров В.В. Тепломассообмен: учеб. пособие. Иваново: ИГЭУ, 2014. 360 с.
13. Метод расчёта термообработки абразивной садки в электрической печи сопротивления / В.В. Бухмиров, Е.Н. Гнездов, Д.В. Ракутина и др. // Промышленная энергетика. 2023. № 1. С. 18-23. EDN: PSJOPD. DOI: 10.34831/EP.2023.18.31.003
14. Выбор оптимального режима сушки керамического кирпича / В.В. Бухмиров, Д.В. Ракутина, Е.Н. Бушуев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения): материалы Международной научно-технической конференции. Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет", 2023. Т.2. С. 319-322. EDN: DUCZOY

References

1. Kudinov, V. A., Kartashov, E. M., & Kalashnikov, V. V. (2005). *Analiticheskie resheniya zadach teplomassoperenosa i termouprugosti dlya mnogoslojnyh konstrukcij* [*Analytical solutions of problems of heat and mass transfer and thermoelasticity for multilayer structures*]. Higher School. [In Russian]
2. Samarskiy, A. A., & Gulin, A. V. (2000). *CHislennye metody matematicheskoj fiziki* [*Numerical methods of mathematical physics*]. Scientific world. [In Russian]
3. Bakhvalov, N. S., Zhidkov, N. P., & Kabelkov, G .M. (2001). *Chislennye metody* [*Numerical methods*]. Laboratory of Basic Knowledge. [In Russian]
4. Kahaner, D., Mauler, K., & Nash, S. (1998). *Chislennye metody i programmnoe obespechenie* [*Numerical methods and software*]. Mir. [In Russian]
5. Samarskiy, A .A., & Vabishevich, P. N. (2003). *Vychislitel'naya teploperedacha* [*Computational heat transfer*]. Unitorial URSS. [In Russian]
6. Berkovsky, B. M., & Nogotov E. F. (1976). *Raznostnye metody issledovaniya zadach teploobmena* [*Difference methods for studying heat transfer problems*]. Science and Technology. [In Russian]
7. Bukhmirov, V. V. (1998). *Razrabotka metoda rascheta i issledovanie teplovogo i termonapryazhennogo sostoyaniya krepi geotermal'nyh skvazhin* [*Development and use of mathematical models for solving actual thermal engineering problems of metallurgical production*] [Dissertations of Doctor of Technical Science, MISIS, Moscow]. MISIS [In Russian]
8. Sozinova, T. E. (1997). *Razrabotka metoda rascheta i issledovanie teplovogo i termonapryazhennogo sostoyaniya krepi geotermal'nyh skvazhin* [*Development of a calculation method and investigation of the thermal and thermally stressed state of geothermal well supports*] [Dissertations of Candidate of Technical Sciences, IGEU, Ivanovo]. IGEU. https://elibrary.ru/xqkofg [In Russian]
9. Bukhmirov, V. V., Krupennikov, S. A., & Sozinova, T. E. (1999). Ocenka effektivnosti raznostnyh skhem resheniya zadach teploprovodnosti [Evaluation of the effectiveness of difference schemes

for solving thermal conductivity problems]. *Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya, 9,* 58-60. [In Russian]
10. Bukhmirov, V. V., Krupennikov, S. A., & Sozinova T. E. (2000). Kriterij effektivnosti raznostnyh skhem resheniya zadach teploobmena [Criterion of efficiency of difference schemes for solving heat exchange problems]. In *Proc. of the International Scientific and Practical conference* (pp. 109-110). MISIS. [In Russian]
11. Brovkin, L. A. (1973). *Temperaturnye polya tel pri nagreve i plavlenii v promyshlennyh pechah* [*Temperature fields of bodies during heating and melting in industrial furnaces*]. IEI. [In Russian]
12. Bukhmirov, V. V. (2014). *Teplomassoobmen* [*Heat and mass transfer*]. IGEU. [In Russian]
13. Bukhmirov, V. V., Gnezdov, E. N., Rakutina, D. V., Gusenkova, N. P., & Suleymanov, M. G. (2023) Metod raschyota termoobrabotki abrazivnoj sadki v elektricheskoj pechi soprotivleniya [Method of calculating the heat treatment of an abrasive cage in an electric resistance furnace]. *Promyshlennaya energetika*, *1*, 18-23. https://doi.org/10.34831/EP.2023.18.31.003 [In Russian]
14. Bukhmirov, V. V., Rakutina, D. V., & Bushuev, E. N. (2023). Vybor optimal'nogo rezhima sushki keramicheskogo kirpicha [Choosing the optimal mode of drying ceramic bricks]. In *Proc. of the International Scientific and Technical Conference "XXII Benardos readings"* (Vol. 2, pp. 319–322). Ivanovo State Power Engineering University. https://elibrary.ru/duczoy [In Russian]

Сведения об авторах

Бухмиров Вячеслав Викторович, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет», кафедра теоретических основ теплотехники.

SPIN-код: 7815-6947

E-mail: buhmirov@tot.ispu.ru.

Ракутина Дарья Валериевна, канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет», кафедра теоретических основ теплотехники.

SPIN-код: 2097-3256

E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Светушков Илья Игоревич, аспирант, ФГБОУ ВО «вановский государственный энергетический университет», кафедра теоретических основ теплотехники.

E-mail: kafedra@tot.ispu.ru.

Authors about

Vyacheslav Bukhmirov, Dr. of Tech. Sciences, Department of Theoretical Bases of Heat Engineering, Ivanovo State Power University.

E-mail: buhmirov@tot.ispu.ru.

Daria Rakutina, Cand. of Tech. Sciences, Department of Theoretical Bases of Heat Engineering, Ivanovo State Power University.

E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Ilya Svetushkov, postgraduate student, Department of Theoretical Bases of Heat Engineering, Ivanovo State Power University.

E-mail: kafedra@tot.ispu.ru.