

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ignition of water-coal fuel droplets during radiative-convective- conductive heating in relation to boilers operating on the technology of circulating fluidized bed / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. Kostoreva, D. Yu. Malyshev, M.V. Purin // Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – V. 33. – P. 101363.
1. Ignition and combustion characteristics of coal – water fuels based on coal & semi-coke / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // Combustion and Flame. – 2022. – V. 246. – P. 112430.
2. Characteristics of spraying and ignition of coal-water fuels based on lignite and liquid pyrolysis products of wood waste / D.V.Gvozdyakov, A.V. Zenkov, A. Zh Kaltaev // Energy. – 2022. – V. 257. – P. 124813.
3. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Sci Total Environ. – 2019. – V. 671. – P. 568–577.
4. The prospects of burning coal and oil processing waste in slurry, gel, and solid state / K. Vershinina, G. Nyashina, V. Dorokhov, N. Shlegel // Appl Therm Eng. – 2019. – V. 156. – P. 51–62.
5. Combustion of coal-water suspensions / A. Kijo-Kleczkowska // Fuel. – 2011. – V. 90. – P. 865–877.
6. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal- water slurry in an industrial boiler to reduce NOx emissions / S.V. Alekseenko, A.A. Dekterev, L.I. Maltsev, V.A. Kuznetsov // Process Safety and Environmental Protection. – 2023. – V. 169. – P. 313–327.

МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

К.Д. Куликов, Д.Е. Фирсова

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5011/5012

Научный руководитель: Ю. Я. Раков, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В текущей статье рассмотрена созданная математическая модель трехмерной задачи для определения коэффициента теплопроводности, а также результаты анализа ее применения.

Ключевые слова: моделирование, коэффициент теплопроводности, погрешность.

Введение

В ходе практической деятельности может возникнуть необходимость определения коэффициента теплопроводности какого-либо нового или неизвестного материала. Существуют множество методов определения коэффициента теплопроводности, например, метод пластины, цилиндра, шара, Кольрауша и др. [1].

Здесь будет представлено описание метода, преимуществом которого является отсутствие какого-либо контактного измерения начальных данных. Таким образом, нет необходимости вносить, возможно, трудновыполнимые изменения в структуру материала.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим объект в форме прямоугольного параллелепипеда со сторонами a , b и c вдоль, соответственно, осей X , Y и Z (рис. 1). Будем нагревать его с одной из сторон тепловым потоком, характеризующимся постоянной плотностью теплового потока q_F . В таком случае, вследствие наличия теплового излучения, с каждой из граней рассматриваемого параллелепипеда будет уходить тепловой поток $Q_{изл\ i}$.

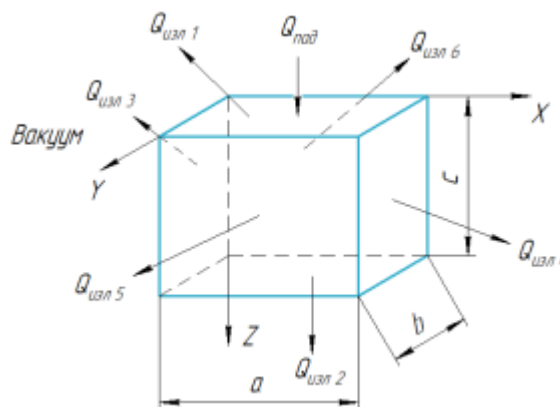


Рис. 1. К математической постановке задачи

Образец помещен внутрь вакуумной камеры, ее стенки зачернены и имеют температуру поверхности, равную температуре окружающей среды T_{oc} . Постоянными принимаем интегральную степень черноты ε и коэффициент поглощения поверхности тела A .

При небольших перепадах температур по сечению рассматриваемого образца постоянным также можно принять и коэффициент теплопроводности λ . Таким образом, математическая постановка задачи для нахождения коэффициента теплопроводности будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = 0, \quad (1)$$

$$q_F \cdot A = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)_{Z=0} + \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Z=0}^4 - T_{oc}^4), \quad (2)$$

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Z}\right)_{Z=c} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Z=c}^4 - T_{oc}^4), \quad (3)$$

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{X=0} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{X=0}^4 - T_{oc}^4), \quad (4)$$

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial X}\right)_{X=a} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{X=a}^4 - T_{oc}^4), \quad (5)$$

$$\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Y}\right)_{Y=0} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Y=0}^4 - T_{oc}^4), \quad (6)$$

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial Y}\right)_{Y=b} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_{Y=b}^4 - T_{oc}^4), \quad (7)$$

$$|Q_{изл 2} - \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot \int_F (T_{Z=c}^4 - T_{oc}^4) \cdot dF| \rightarrow \min \quad (8)$$

Здесь σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана.

Подытоживая вышесказанное, для нахождения коэффициента теплопроводности λ необходимо знать, т. е. экспериментально определить: плотность падающего теплового потока q_F , суммарный тепловой поток, теряемый с нижней грани $Q_{изл 2}$, температуру окружающей среды T_{oc} , интегральную степень черноты ε , коэффициент поглощения поверхности тела A и геометрические размеры образца a , b и c .

Если же поставлена задача определить суммарный тепловой поток, теряемый с нижней грани $Q_{изл 2}$, то набор исходных данных остается прежним, но теперь необходимо знать коэффициент теплопроводности λ . Такую задачу будем называть прямой, а случай выше – обратной.

Как прямая, так и обратная задачи не имеют точного аналитического решения, поэтому для нахождения результатов применяют численные методы решения дифференциальных уравнений. Основой для решения послужил метод конечных разностей, согласно которому частные производные были заменены разностными отношениями для узловых точек сеточной области, границами которой являются границы самого образца. Полученная совокупность конечно-разностных уравнений решалась с помощью составленных программ.

Суть работы моделирующих программ

Для более ясного понимания алгоритма расчетов приведем схемы решения прямой и обратной задач.

Как можно видеть из рис. 2, алгоритм решения прямой задачи следующий: вводятся исходные данные, которые перечислены ранее; затем обозначаются все необходимые константы, состоящие из различных комбинаций начальных данных; присваивается начальное распределение температур (например, принимается, что температура во всех узлах равна температуре окружающей среды); исходя из конечно-разностных уравнений находится распределение температур во всем теле; проверяется сходится ли температурной поле или нет (нахо-

дится разность температур в каждом узле двух массивов), если расхождение больше заданного ΔT , то расчет температур повторяется; находятся интегральные тепловые потоки, уходящие с граней прямоугольного параллелепипеда; проверяется сходимость тепловых потоков (находится разница между тепловым потоком, поступившем в тело и уходящем из него), если расхождение больше заданного ΔQ , то возвращаемся к расчету температурного поля; выводим необходимые нам значения, это могут быть как интегральные тепловые потоки, уходящие с каждой из граней, так и температурное поле.

Из рис. 3 видно, что решение обратной задачи сопровождается многократным решением прямой задачи, алгоритм которой представлен выше.

Поясним решение обратной задачи: вводятся исходные данные, перечисленные ранее; задаются предполагаемые границы определяемого λ ; находится среднее значение λ в этом интервале; рассчитывается прямая задача при λ чуть менее среднего; вычисляется разница между рассчитанным $Q_{\text{изл } 2}$ и определенным экспериментально (или с помощью решения прямой задачи при заданном λ); рассчитывается прямая задача при λ чуть больше среднего; также рассчитывается разница; сужается диапазон λ ; находится новое среднее; рассчитывается прямая задача при новом среднем λ ; вычисляется разница между рассчитанным $Q_{\text{изл } 2}$ и определенным экспериментально, если это разница больше заданного значения ΔQ , то возвращаемся к шагу, стоящему после исходных данных; выводится искомый λ .

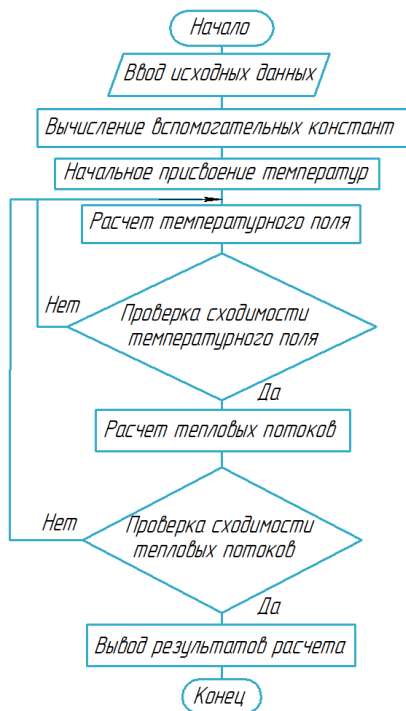


Рис. 2. Схема решения прямой задачи

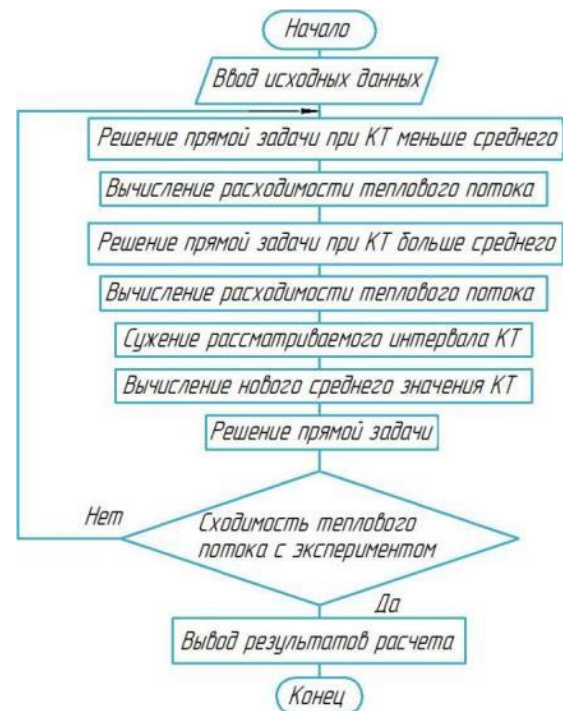


Рис. 3. Схема решения обратной задачи

Результаты работы программы

Покажем погрешность определения коэффициента теплопроводности при последовательном решении сначала прямой задачи и определения $Q_{\text{изл } 2}$, а затем обратной задачи и нахождения λ . После этого проверим насколько будет различно значение λ , определив относительную погрешность. Расчет будем производить при следующем наборе исходных данных: $a = b = c = 5 \text{ мм}$; $q_F = 100000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; $T_{\text{ос}} = 300 \text{ К}$; $\varepsilon = 0,8$; $A = 0,8$; $\Delta T = 0.001 \text{ \%}$; $\Delta Q = 0.01 \text{ \%}$. Узловая сетка – $17 \times 17 \times 17$.

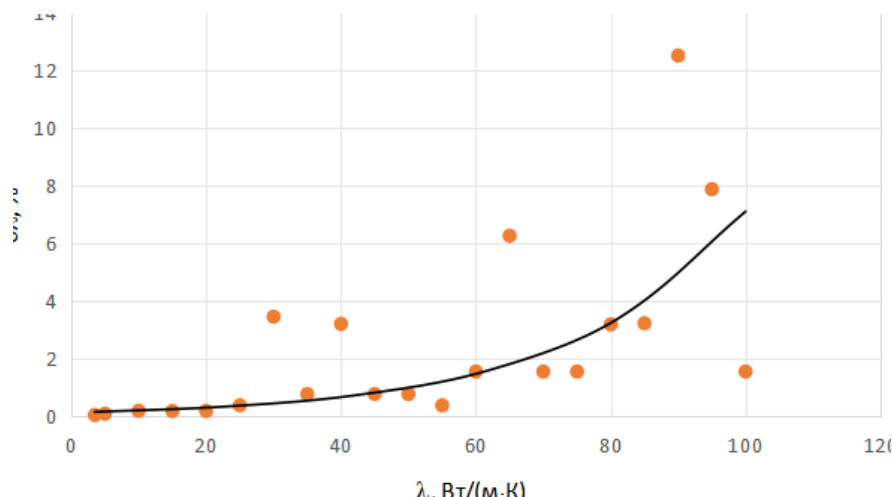


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности определения λ при различных значениях λ

Как можно видеть из рис. 4, погрешность определения λ растет с ростом самого значения λ . Если мы хотим уменьшить погрешность, то необходимо или увеличивать число узлов в сетке или уменьшать ΔT и ΔQ , но и то и другое приведет к увеличению числа итераций и, следовательно, времени расчета программой.

Заключение

В качестве вывода хотелось бы отметить практическую ценность разработанных программ: с их помощью возможно смоделировать ход потенциального эксперимента для интересующего диапазона коэффициентов теплопроводности и других начальных данных и понять какие будут наблюдаться температуры и тепловые потоки, что поможет подобрать наиболее подходящие приборы для создания экспериментальной установки.

Также важно заметить, что при математической постановке задачи было принято, что коэффициент теплопроводности не зависит от температуры и сказано, что это справедливо при небольших перепадах температур по сечению образца. Такое допущение справедливо, например, для набора исходных данных представленных выше, при $\lambda > 3.5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, в иных же случаях необходимо учитывать зависимость $\lambda = f(T)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заворин А.С., Кузьмин А.В., Раков Ю.Я. Методы определения теплопроводности конденсированных сред. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 184 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ КОРПУСОМ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

А.Г. Гарбуз

Томский политехнический университет, ИШЭ, группа 5Б13

Научный руководитель Е.В. Кравченко, к.т.н., доцент, ИШЭ ТПУ

В данной статье рассматривается влияние воздушных зазоров между базовыми элементами и корпусом аккумуляторной батареи на тепловое состояние рабочих элементов. Актуаль-