СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ (ред. от 29.07.2018) "О промышленной безопасности опасных производственных объектов".

2. Patle, D.S.; Ahmad, Z.; Rangaiah, G.P. Operator training simulators in the chemical industry: // Rev. Chem. Eng, No. 30, 2014. pp. 199–216.

3. Кривов М.В., Благодарный Н.С., Колмогоров А.Г. Методика автоматизированной оценки качества управления технологическим процессом операторами котлов утилизаторов // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2015. № 9. С. 122-126.

4. Благодарный Н.С., Кривов М.В. Применение компьютерного тренинга в корпоративном обучении // Образовательные технологии и общество,Т. 22, № 1, 2019. С.3-10.

УДК 004.02

Сенотова Светлана Анатольевна,
к.т.н., доцент, доцент кафедры «Вычислительные машины и комплексы»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», тел.: 89021723488

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕАКТОРЕ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Senotova S.A.

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN PRODUCTION REACTOR POLYCRYSTALLIC SILICON

Аннотация. *В статье рассматривается распределение температуры в реакторе получения поликристаллического кремния. Функция, дающая распределение температуры, является решением Лапласа при соответствующих краевых условиях. Для решения задачи построена сетка. Составлена и решена система алгебраических уравнений. Программа написана на языке C#.*

Ключевые слова: *реактор получения поликристаллического кремния, распределение температуры, уравнение Лапласа, метод сеток, таблица цветов.*

Abstract. *The article discusses the temperature distribution in the reactor for producing polycrystalline silicon. The function giving the temperature distribution is Laplace's solution under the appropriate boundary conditions. To solve the problem, a grid is built. A system of algebraic equations has been compiled and solved. The program is written in C #.*

Keyword: *polycrystalline silicon reactor, temperature distribution, Laplace equation, grid method, color table.*

Поликристаллический кремний – основной полупроводниковый материал, применяемый в современной микроэлектронике, силовой электротехнике, солнечной энергетике, микромеханике.

Технология производства поликристаллического кремния (Si) основана на "Сименс-процессе". По этому методу смесь трихлорсилана ($SiHCl_3$) и водорода (H_2) подается в реактор (рисунок 1), где трихлорсилан восстанавливается и кремний осаждается на стержнях-основах по реакции:

$$SiHCl_3 + H_2 \rightarrow Si + 3HCl.$$

При достижении температуры на стержнях-основах 950 ^{0}С – 1100 ^{0}С за счет прохождения через них электрического тока начинают подачу водорода и трихлорсилана в реактор.

Трихлорсилан подается в теплообменники, где нагревается до 110 ^{0}С – 150 ^{0}С водяным паром.

Водород также подается в теплообменники, где нагревается до температуры 120 ^{0}С – 170 ^{0}С водяным паром.

Парогазовая смесь подается в нижнюю часть реактора через центральный ввод.

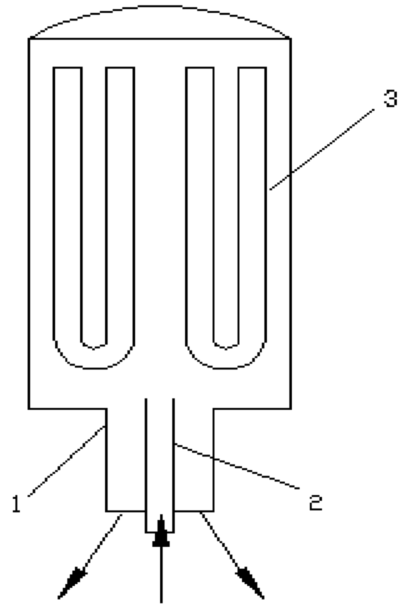

Рисунок 1 – Реактор водородного восстановления трихлорсилана: 1 – труба для вывода парогазовой смеси; 2 – сопло для подачи трихлорсилана и водорода; 3 – кремниевые стержни.

Реактор снабжён рубашкой, в которую по трубопроводу подаётся охлаждающая вода с температурой 75 ^{0}C – 80 ^{0}C для съёма тепла реакции.

Отвод отходящей парогазовой смеси осуществляется снизу реактора через центральный выход, концентричный центральному вводу.

Рассмотрим задачу о стационарном распределении тепла в реакторе.

Известно, что функция $u(x, y)$, дающая распределение температуры, является решением Лапласа [1]

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

при соответствующих краевых условиях. Конечно-разностное уравнение, соответствующее уравнению Лапласа, имеет вид

$$u_{ik} = \frac{1}{4}(u_{i+1,\ k} + u_{i-1,\ k} + u_{i,\ k+1} + u_{i,\ k-1})$$

При составлении конечно-разностных уравнений была использована схема узлов, изображенная на рисунке 2. Здесь и в дальнейшем на рисунках указаны только индексы узла. Например, узел (x_i, y_k) обозначается через (i, k).

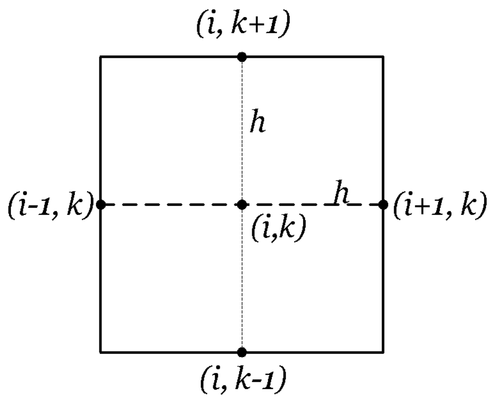

Рисунок 2 – Схема узлов.

Для решения задачи построим сетку. В шести внутренних узлах (1,1), (1,2), (1,3), (3,1), (3,2), (3,3) температура 1100 ^{0}C – это стержни-основы.

$$u_{11} = u_{12} = u_{13} = u_{31} = u_{32} = u_{33} = 1100.$$

В остальных трех внутренних узлах (2,1), (2,2), (2,3) получаем соответственно три уравнения:

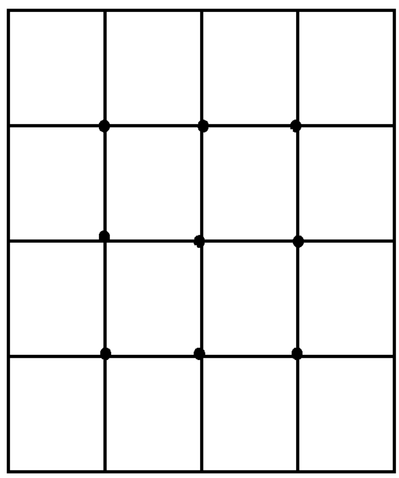

Рисунок 3 – Внутренние узлы сетки.

$$\left.\begin{aligned} u_{11} + u_{31} + u_{20} + u_{22} - 4u_{21} &= 0 \\ u_{12} + u_{32} + u_{21} + u_{23} - 4u_{22} &= 0 \\ u_{13} + u_{33} + u_{22} + u_{24} - 4u_{23} &= 0 \end{aligned}\right\}$$

Подставим известные значения. Окончательно получим систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} -4u_{21} + u_{22} &= -2350 \\ u_{21} - 4u_{22} + 4u_{23} &= -2200 \\ u_{22} - 4u_{23} &= -2280 \end{aligned}\right\}$$

Решив эту систему методом Гаусса, получим

$$u_{21} = 827{,}3214;\ u_{22} = 959{,}2857;$$
$$u_{23} = 809{,}8214.$$

При разработке компьютерной модели использована таблица цветов (таблица 1), с помощью которой можно наглядно увидеть распределение температуры в реакторе. Каждый цвет указывает на определенный диапазон температур, начиная от низкой температуры, которой соответствуют цвета холодных оттенков (синий, голубой и т.д.), и заканчивая высокой температурой, которой соответствуют цвета теплых оттенков (красный, оранжевый и т. д).

Распределение температуры в реакторе реализовано методом линейного горизонтального градиента (рисунок 4). Программа составлена на языке C#.

Таблица 1

Таблица цветов

Название цвета	HEX	Цвет
MidnightBlue	#191970	
Navy	#000080	
MediumBlue	#0000CD	
Blue	#0000FF	
RoyalBlue	#4169E1	
DeepSkyBlue	#00BFFF	
SkyBlue	#87CEEB	
Turquoise	#40E0D0	
Cyan	#00FFFF	
Aqua	#00FFFF	
SpringGreen	#00FF7F	
LightGreen	#90EE90	
Lime	#00FF00	
GreenYellow	#ADFF2F	
Yellow	#FFFF00	
Gold	#FFD700	
Orange	#FFA500	
DarkOrange	#FF8C00	
OrangeRed	#FF4500	
Tomato	#FF6347	
DarkRed	#8B0000	
Firebrick	#B22222	
Red	#FF0000	
Crimson	#DC143C	

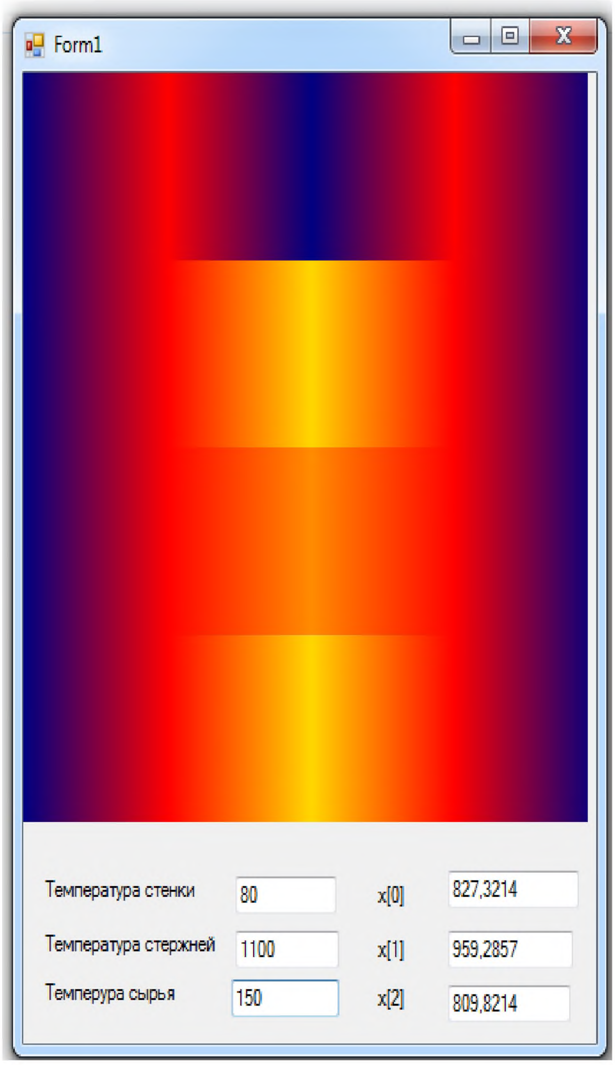

Рисунок 4 – Температурное поле в реакторе.

При изменении температуры стенки, температуры стержней, температуры сырья изменяется температурное поле в реакторе.

В результате теплообмена кремниевых стержней с окружающей средой, парогазовой смесью, центральная область ректора является наиболее горячей по сравнению с поверхностью. Определение температуры в центральной части реактора с помощью математического моделирования является актуальной задачей, позволяющей оптимизировать технологический процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копченова Н.В. Вычислительная математика в примерах и задачах: Учебное пособие / Копченова Н. В. Марон И. А. 2 – е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 368с.

УДК 004.02

Сенотова Светлана Анатольевна,
к.т.н., доцент, доцент кафедры «Вычислительные машины и комплексы», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», тел.: 89021723488
Маслюченко Андрей Павлович,
магистрант кафедры «Вычислительные машины и комплексы», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», тел.: 89025420060

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРБИТАЛЬНОЙ ТРОСОВОЙ СИСТЕМЫ

Senotova S.A., Masluchenko A. P.

COMPUTER MODELING OF ORBITAL CABLE SYSTEM

Аннотация. *В статье рассматриваются дифференциальные уравнения движения орбитальной тросовой системы. Системы уравнений решаются методом Эйлера и методом Рунге-Кутта. Программы составлены на языке Python в графическом редакторе Blender с визуальным представлением математических моделей.*

Ключевые слова: *орбитальные тросовые системы, математические модели, дифференциальные уравнения, язык Python, графический редактор Blender.*

Abstract. *The article discusses the differential equations of motion of the orbital cable system. Systems of equations are solved by the Euler method and the Runge-Kutt method. Programs are written in Python in the graphic editor Blender with a visual representation of mathematical models.*

Keyword: *orbital cable systems, mathematical models, differential equations, Python language, graphic editor Blender.*

Исследованию движения сложных космических систем посвящено большое количество работ, как в нашей стране [1-3], так и за рубежом. В последнее время приобрели большое значение задачи вращательного движения орбитальных космических систем, содержащих панели солнечных батарей, антенны, гибкие упругие тросы. Космические аппараты с тросами получили название орбитальных тросовых систем. При изучении движения орбитальных тросовых систем используются различные математические модели.

Рассмотрим уравнения относительного движения привязанного субспутника в сферических координатах [1]:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = 2\left(\frac{d\varphi}{dt}\right) tg\,\varphi \left(\frac{d\theta}{dt} + 1\right) - 3\sin\theta\cos\theta,$$

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = -\sin\varphi\cos\varphi\left[\left(\frac{d\theta}{dt} + 1\right)^2 + 3\,cos^2\,\theta\right] \tag{1}$$

при начальных условиях

$$\varphi(0) = 0{,}3,$$

$$\frac{d\varphi}{dt}(0) = 0{,}1,$$

$$\theta(0) = 0{,}3, \tag{2}$$

$$\frac{d\theta}{dt}(0) = 0{,}1.$$

Запишем дифференциальные уравнения второго порядка (1) в виде системы че-