ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания к самостоятельной работе для студентов специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства» заочной формы обучения

Могилев 2017

УДК 621.791.7
ББК 30.61
Т 38

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
ГУВПО «Белорусско-Российский университет»

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» протокол № _____ от «_____» _____ 2017 г.

Составитель: ассистент М. Ж. Солодков

Рецензент:

Даны задания к самостоятельной работе по дисциплине «Компьютерное моделирование сварочных процессов» для студентов специальности 1-36 01 06 «Оборудование и технология сварочного производства» заочной формы обучения, а также приведены методические указания по ее выполнению, перечень необходимой литературы.

Учебно-методическое издание
Компьютерное моделирование сварочных процессов

Ответственный за выпуск В. П. Куликов
Технический редактор М. Ж. Солодков
Компьютерная верстка М. Ж. Солодков

Подписано в печать . Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать трафаретная. Усл.печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУВПО «Белорусско-Российский университет», 2017

Содержание

1 Цель и содержание контрольной работы 3
2 Общие сведения 3
3 Задание и примеры решения.....6
4 Вариант задания.....11
5 Список литературы.....12

1 Цель и содержание контрольной работы

Целью самостоятельной работы является изучение студентами дисциплины «Компьютерное моделирование сварочных процессов», получение знаний в области моделирования и расчета тепловых процессов.

Работа состоит из решения одной задачи. Вариант задания определяется по списку группы. Задачу необходимо решить одним из представленных ниже способом.

2 Общие сведения

Теория тепловых процессов при сварке подробно представлена в учебнике «Теория сварочных процессов» под редакцией Фролова В. В. 1988 г. В данных методических указаниях рассматривается лишь один пункт «6.2 Движущийся источники теплоты. Точечный источник на поверхности полубесконечного тела» и при необходимости более подробную информацию можно получить в данном учебнике.

2.1 Термины, определения и обозначения

Полубесконечное тело представляет собой массивное тело с одной ограничивающей плоскостью $z = 0$. Остальные поверхности находятся на значительном удалении и не влияют на распространение теплоты.

Мгновенный точечный источник теплоты (МТИТ). Физической схемой, примерно соответствующей МТИТ, можно считать такую, при которой в очень малый объем за весьма малый промежуток времени вводится некоторое количество теплоты Q. Формально такое введение теплоты можно рассматривать как граничное условие при $t = 0$, когда вместо распределения температур задается распределение теплоты в теле. Действительно, если принять, что во всех точках тела, кроме одной, теплосодержание равно нулю, а в точке с координатами x_0, y_0, z_0 при $t = 0$ содержится количество теплоты Q, то будет иметь случай мгновенного точечного источника.

В последующие моменты времени теплота будет распространяться по телу, подчиняясь уравнению теплопроводности.

Непрерывно действующий источник теплоты можно представить, как серию действующих друг за другом мгновенных источников теплоты.

Движущийся источник теплоты – непрерывно действующий источник теплоты, который перемещается с определенной скоростью вдоль некоторого направления.

2.2 Движущиеся источники теплоты

Для составления уравнений, описывающих процесс распространения теплоты от движущихся непрерывно действующих источников, используют принцип наложения. С этой целью весь период действия источника теплоты разбивают на бесконечно малые отрезки времени dt. Действие источника теплоты в течение бесконечно малого отрезка времени dt представляют как действие мгновенного источника теплоты. Суммируя процессы распространения теплоты от действующих друг за другом в разных местах тела мгновенных источников теплоты, получают уравнение температурного поля при непрерывном действии движущегося источника.

Точечный источник на поверхности полубесконечного тела

Точечный источник теплоты постоянной мощности q движется с постоянной скоростью v прямолинейно из точки O_0 в направлении оси x (рис. 1). Допустим, что с момента движения источника прошло время t_H и он находится в точке O. Вместе с источником теплоты перемещается подвижная система координат, начало которой совпадает с местоположением источника теплоты, т. е. с точкой O. Требуется определить приращение температуры точки A(x, y, z).

Для этого запишем приращение температуры в точке A от мгновенного точечного источника теплоты, который действовал в течение времени dt в точке O′. С момента выделения теплоты в точке O′ прошло время t. Используем уравнение приращения температуры от мгновенного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела

$$\Delta T = \frac{2\cdot Q}{c\rho\cdot(4\cdot\pi\cdot a\cdot t)^{3/2}}\cdot e^{-\frac{R^2}{4\cdot a\cdot t}}, \qquad (1)$$

полагая Q = q·dt, а расстояние

$$O'A = \sqrt{(x+v\cdot t)^2+y^2+z^2}\,.$$

Тогда

$$dT = \frac{2\cdot q\cdot dt}{c\rho\cdot(4\cdot\pi\cdot a\cdot t)^{3/2}}\cdot e^{-\frac{(x+v\cdot t)^2+y^2+z^2}{4\cdot a\cdot t}} \qquad (2)$$

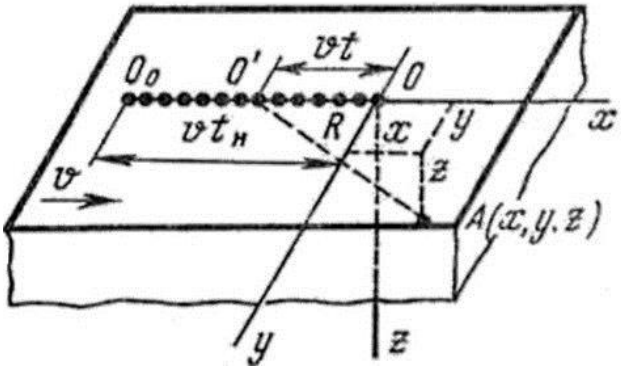

Рисунок 1 – Схема движения точечного непрерывно действующего источника на поверхности полубесконечного тела мощностью q, перемещающегося со скоростью v

Суммируем приращения температуры от всех элементарных источников теплоты на линии OO_0. Время распространения теплоты от мгновенного источника в точке O равно нулю, а от мгновенного источника в точке O_0 равно t_H. Поэтому интеграл берем в пределах от 0 до t_H:

$$\Delta T = \int_0^{t_H}\frac{2\cdot q}{c\rho\cdot(4\cdot\pi\cdot a\cdot t)^{3/2}}\cdot e^{-\frac{(x+v\cdot t)^2+y^2+z^2}{4\cdot a\cdot t}} \qquad (3)$$

После преобразований

$$\Delta T = \frac{2\cdot q}{c\rho\cdot(4\cdot\pi\cdot a)^{3/2}}\cdot e^{-\frac{v\cdot t}{2\cdot a}}\cdot\int_0^{t_H} e^{-\frac{v^2\cdot t}{4\cdot a}-\frac{R^2}{4\cdot a\cdot t}}\frac{dt}{t^{3/2}} \qquad (4)$$

где $R^2 = \sqrt{x^2+y^2+z^2}$.

Уравнение (4) выражает приращения температур в полубесконечном теле в стадии теплонасыщения, т.е. когда температура отдельных точек непрерывно повышается.

Предельное состояние. После продолжительного действия источника теплоты достигается так называемое предельное состояние, когда температура точек в подвижной системе координат перестает изменяться во времени. Такое состояние достигается при $t_H \to \infty$ и называется квазистационарным.

В этом случае уравнение (4) интегрируется после подстановки $R^2/(4\cdot a\cdot t)=u^2$ и принимает вид

$$\Delta T=\frac{q}{2\cdot\pi\cdot\lambda\cdot R}\cdot e^{-\frac{v}{2\cdot a}\cdot(R+x)} \qquad (5)$$

Температурное поле предельного состояния симметрично относительно оси Ox (рис. 2). Изотермы на поверхности xOy представляют собой овальные кривые, которые сгущены впереди источника теплоты и раздвинуты позади него (рис. 2, а). Изотермические поверхности как бы образованы вращением изотерм относительно оси Ox. Смещенность изотерм относительно друг друга и их вытянутость зависят от безразмерного параметра v·R / (2·a). В области малых значений v·R / (2·a) изотермы близки к окружностям, при больших значениях они вытянуты вдоль оси Ox.

Распределение приращения температуры по поверхности массивного тела на расстоянии y, равном 1, 2, 3 см, представлено соответствующими кривыми на рис. 2, в. Температура точек при приближении источника теплоты резко возрастает, достигает максимума, а затем убывает. Снижение температуры происходит с меньшей скоростью, чем ее подъем. Максимум температуры в точках, находящихся не на оси Ox, достигается после прохождения источником теплоты плоскости, параллельной yOz, в которой находится рассматриваемая точка. В более удаленных от оси Ox точках максимальная температура достигается позже п имеет меньшее численное значение по сравнению с точками, расположенными ближе к оси Ox. Штриховой линией на рис. 2, в соединены точки с максимальной температурой на плоскости xOy. Поверхность раздела областей нагрева и остывания получается путем вращения штриховой кривой относительно оси Ox. Область впереди штриховой кривой нагревается, позади – остывает.

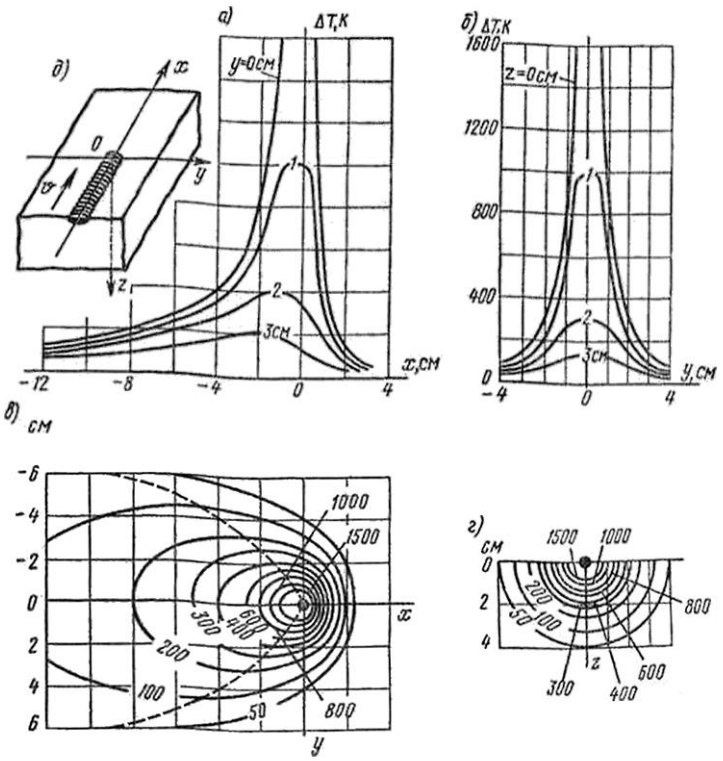

Рисунок 2 – Приращение температур в предельном состоянии при движении точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела [q = 4000 Вт, v = 0,1 см/с, a = 0,1 см²/с, λ = 0,4 Вт/(см·К)]: а – изотермы на поверхности xOy (штриховая кривая разделяет область нагрева и область остывания); б – изотермы в поперечной плоскости xOz, проходящей через центр источника; в – распределение приращений температуры по прямым, параллельным оси x и расположенным на поверхности массивного тела; г – распределение приращений температуры по прямым, параллельным оси y и лежащим в поперечной плоскости xOz; д – схема расположения координатных осей

3 Задание и примеры решения

Задача: Построить график изменения температуры (изотерму) в пластине при нагреве ее движущимся точечным источником теплоты, когда достигнуто предельное квазистационарное состояние.

Исходные данные примера (Вариант № 0): участок от x = 2 см до x = – 8 см, y = 2 см, z = 0 см, мощность источника теплоты – q = 4000 Вт, скорость сварки – ν = 0,1 см/с, коэффициент температуропроводности – a = 0,1 см^2/с, коэффициент теплопроводности – λ = 0,4 Вт/(см·К).

3.1 Первый способ решения задачи

1. Выбираем шесть точек для расчета на участке от x = 2 см до x = – 8 см:

Таблица 1 – Координаты точек

№	Наименование точки	Координаты точки (x; y; z)	X, см	Y, см	Z, см
1	А	(2,0; 2,0; 0)	2,0	2,0	0
2	Б	(0; 2,0; 0)	0	2,0	0
3	В	(–2,0; 2,0; 0)	-2,0	2,0	0
4	Г	(–4,0; 2,0; 0)	-4,0	2,0	0
5	Д	(–6,0; 2,0; 0)	-6,0	2,0	0
6	Е	(–8,0; 2,0; 0)	-8,0	2,0	0

Количество может быть увеличено для более точного построения графика изменения температуры.

2. Рассчитываем для каждой точки значения ΔT по формуле:

$$\Delta T = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot e^{-\frac{v}{2 \cdot a} \cdot (R+x)}$$

где ΔT – приращение температуры в рассматриваемой точке (с координатами x, y, z), К;

q – мощность источника теплоты, Вт;

π – математическая постоянная, π = 3,14;

λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(см·К)

R – расстояние до рассматриваемой точки от начала координат, см;

e – математическая постоянная, e = 2,718;

ν – скорость сварки, см/с;

a – коэффициент температуропроводности, см^2/с;

x – расстояние до рассматриваемой точки по оси x, см.

Значения расстояний R определим по формуле:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\,.$$

Для точки А (2,0; 2,0; 0):

$$R_А = \sqrt{2{,}0^2 + 2{,}0^2 + 0^2} = 2{,}83 \text{ см}\,.$$

Для точки Б (0; 2,0; 0):

$$R_Б = \sqrt{0^2 + 2{,}0^2 + 0^2} = 2{,}0 \text{ см}\,.$$

Для точки В (–2,0; 2,0; 0):

$$R_В = \sqrt{(-2{,}0)^2 + 2{,}0^2 + 0^2} = 2{,}83 \text{ см}\,.$$

Для точки Г (–4,0; 2,0; 0):

$$R_Г = \sqrt{(-4{,}0)^2 + 2{,}0^2 + 0^2} = 4{,}47 \text{ см}.$$

Для точки Д (–6,0; 2,0; 0):

$$R_Д = \sqrt{(-6{,}0)^2 + 2{,}0^2 + 0^2} = 6{,}32 \text{ см}.$$

Для точки Е (–8,0; 2,0; 0):

$$R_Е = \sqrt{(-8{,}0)^2 + 2{,}0^2 + 0^2} = 8{,}25 \text{ см}.$$

Определим приращение температур ΔТ для выбранных точек:

$$\Delta T_А = \frac{q}{2\cdot\pi\cdot\lambda\cdot R_А}\cdot e^{-\frac{v}{2\cdot a}\cdot(R_А + x_А)} = \frac{4000}{2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}4\cdot 2{,}83}\cdot 2{,}718^{-\frac{0{,}1}{2\cdot 0{,}1}\cdot(2{,}83+2{,}0)} = 50{,}297 \text{ К} \approx 50 \text{ К}$$

$$\Delta T_Б = \frac{4000}{2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}4\cdot 2{,}0}\cdot 2{,}718^{-\frac{0{,}1}{2\cdot 0{,}1}\cdot(2{,}0+0)} = 292{,}928 \text{ К} \approx 293 \text{ К}$$

$$\Delta T_В = \frac{4000}{2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}4\cdot 2{,}83}\cdot 2{,}718^{-\frac{0{,}1}{2\cdot 0{,}1}\cdot(2{,}83+(-2{,}0))} = 371{,}570 \text{ К} \approx 372 \text{ К}$$

$$\Delta T_Г = \frac{4000}{2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}4\cdot 4{,}47}\cdot 2{,}718^{-\frac{0{,}1}{2\cdot 0{,}1}\cdot(4{,}47+(-4{,}0))} = 281{,}633 \text{ К} \approx 282 \text{ К}$$

$$\Delta T_Д = \frac{4000}{2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}4\cdot 6{,}32}\cdot 2{,}718^{-\frac{0{,}1}{2\cdot 0{,}1}\cdot(6{,}32+(-6{,}0))} = 214{,}706 \text{ К} \approx 215 \text{ К}$$

$$\Delta T_Е = \frac{4000}{2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}4\cdot 8{,}25}\cdot 2{,}718^{-\frac{0{,}1}{2\cdot 0{,}1}\cdot(8{,}25+(-8{,}0))} = 170{,}335 \text{ К} \approx 170 \text{ К}$$

Таблица 2 – Сводная таблица

№	Точка	R, см	X, см	Y, см	Z, см	ΔT, К
1	А	2,83	2,0	2,0	0	50
2	Б	2,0	0	2,0	0	293
3	В	2,83	-2,0	2,0	0	372
4	Г	4,47	-4,0	2,0	0	282
5	Д	6,32	-6,0	2,0	0	215
6	Е	8,25	-8,0	2,0	0	170

3. Строим график по полученным результатам (Рисунок 3)

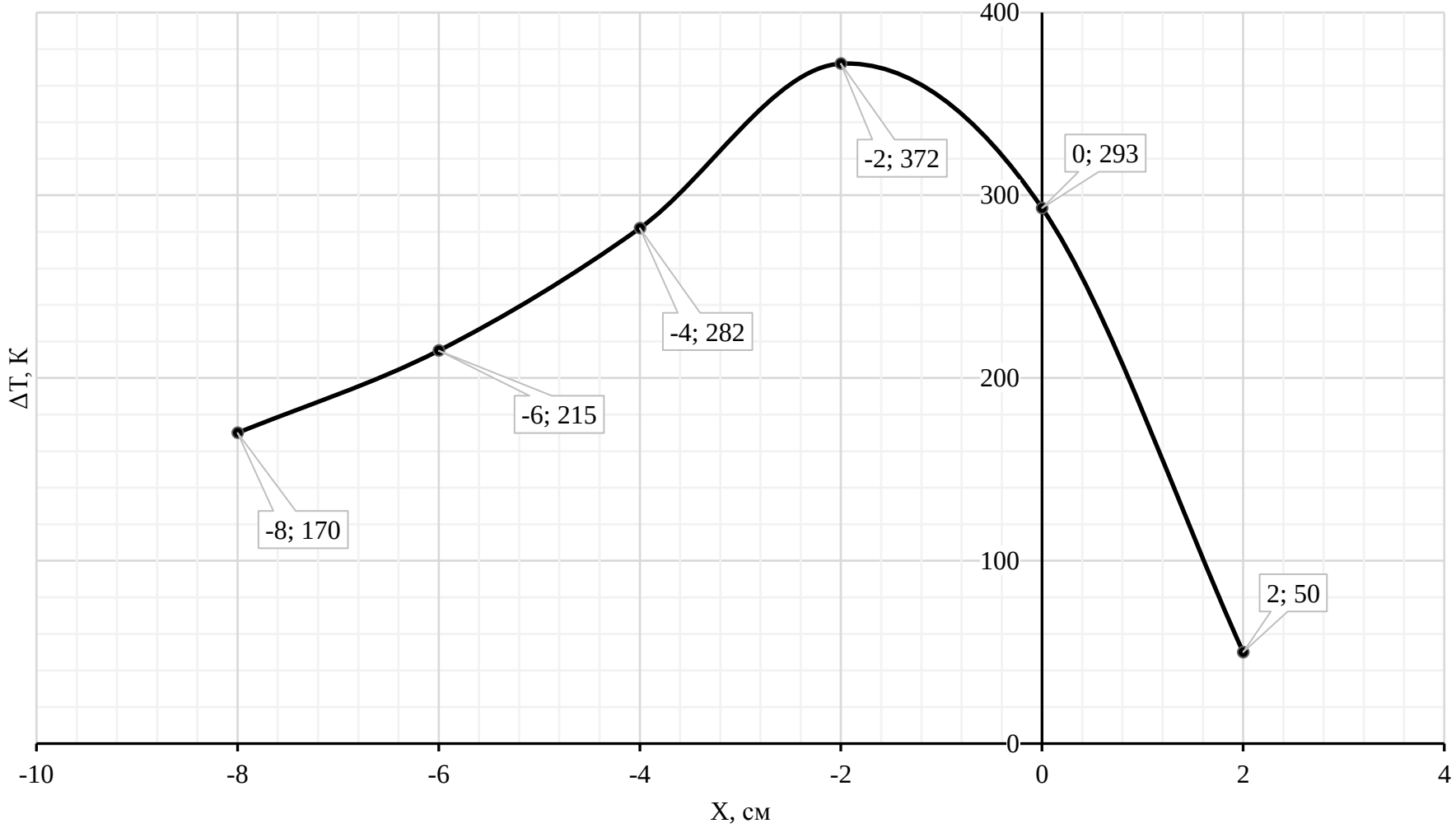

Рисунок 3 – Приращение температур в предельном состоянии при движении точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела на участке от x = 2 см до x = – 8 см, y = 2 см, z = 0 см

3.2 Второй способ решения задачи

Во втором способе будет применена система автоматизированного проектирования MathCad 15.0. Для этого выполним следующие шаги:

1. Выбираем шесть точек для расчета на участке от x = 2 см до x = – 8 см:

Таблица 3 – Координаты точек

№	Наименование точки	Координаты точки (x; y; z)	X, см	Y, см	Z, см
1	А	(2,0; 2,0; 0)	2,0	2,0	0
2	Б	(0; 2,0; 0)	0	2,0	0
3	В	(–2,0; 2,0; 0)	-2,0	2,0	0
4	Г	(–4,0; 2,0; 0)	-4,0	2,0	0
5	Д	(–6,0; 2,0; 0)	-6,0	2,0	0
6	Е	(–8,0; 2,0; 0)	-8,0	2,0	0

Количество может быть увеличено для более точного построения графика изменения температуры.

2. Запускаем MathCad любым известным способом.

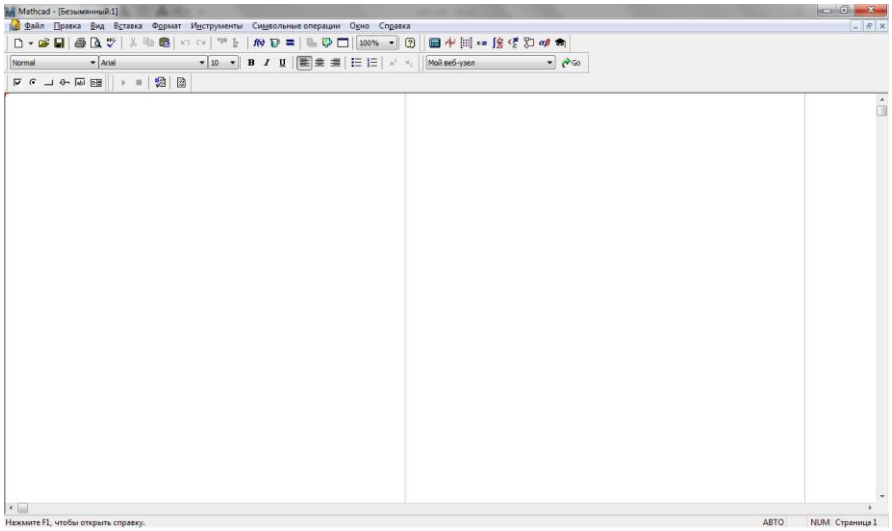

Рисунок 4 – Окно MathCad

3. Введем исходные данные

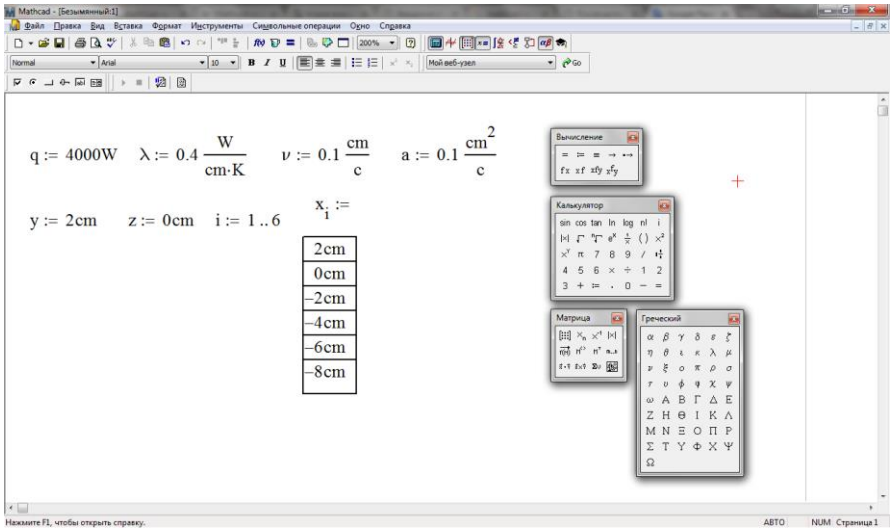

Рисунок 5 – Ввод исходных данных

Для этого нужно:

a. Ввести имя переменной (q, λ, ν, a, y, z);

b. Ввести двоеточие [:], что приведёт к появлению знака присваивания [:=] и следующего за ним поля ввода;

c. Напечатать в поле ввода число или выражение. Mathcad вычислит соответствующее значение и присвоит его имени переменной;

d. При необходимости добавить единицы измерения.

Значения $x_А$, $x_Б$, $x_В$, $x_Г$, $x_Д$, $x_Е$ удобно ввести в табличном виде.

Для этого нужно:

a. Ввести значения переменной i в следующем виде [i := 1 .. 6];

b. Ввести имя переменной x с присвоением индекса i;

c. Ввести двоеточие [:], что приведёт к появлению знака присваивания [:=] и следующего за ним поля ввода;

d. Напечатать в поле ввода необходимое значение;

e. При необходимости добавить единицы измерения;

f. После ввести запятую [,] и повторить пункты d и e в появившейся ячейке (и т.д. до заполнения всех значений).

4. Определим значения R_i следующим способом:

a. Введем формулу нахождения r_i в следующем виде [$r_i:=\sqrt{(x_i)^2+(y)^2+(z)^2}$] (из-за особенностей программы заменим R_i на r_i.);

b. Выведем результаты расчета [$r_i =$] (таблица результатов появится автоматически).

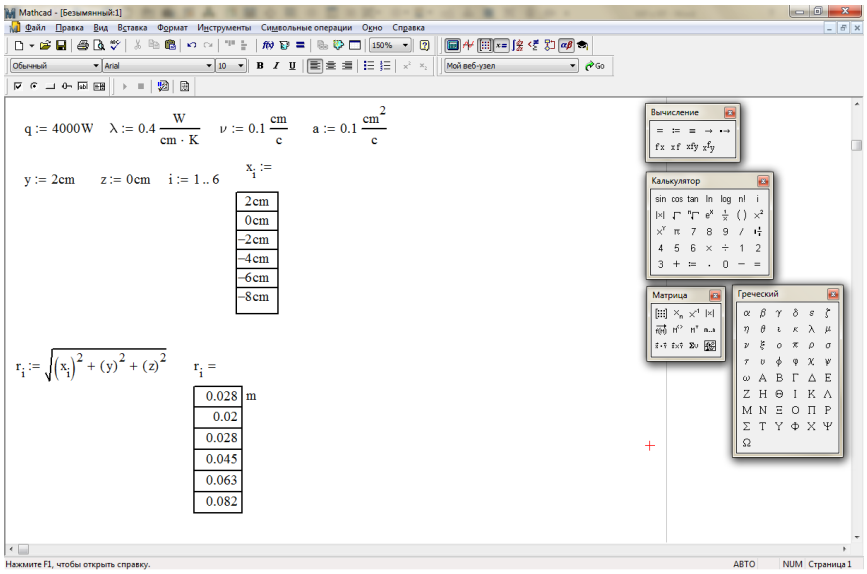

Рисунок 6 – Расчет R_i

5. Определим значения ΔT_i.

Запишем необходимую формулу и выведем результаты аналогично действиям описанным в пункте 4 (итог см. рисунок 7).

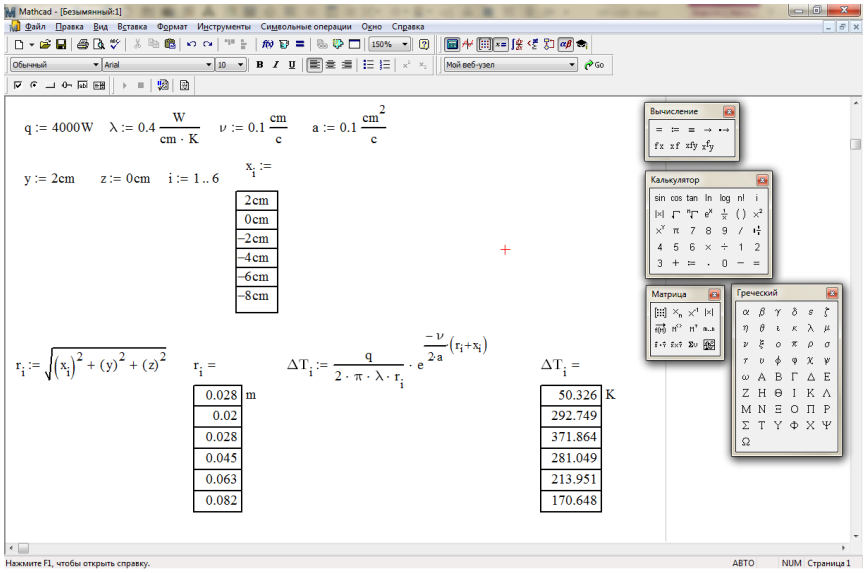

Рисунок 7 – Расчет ΔT_i

6. Строим график использую панель инструментов «График»

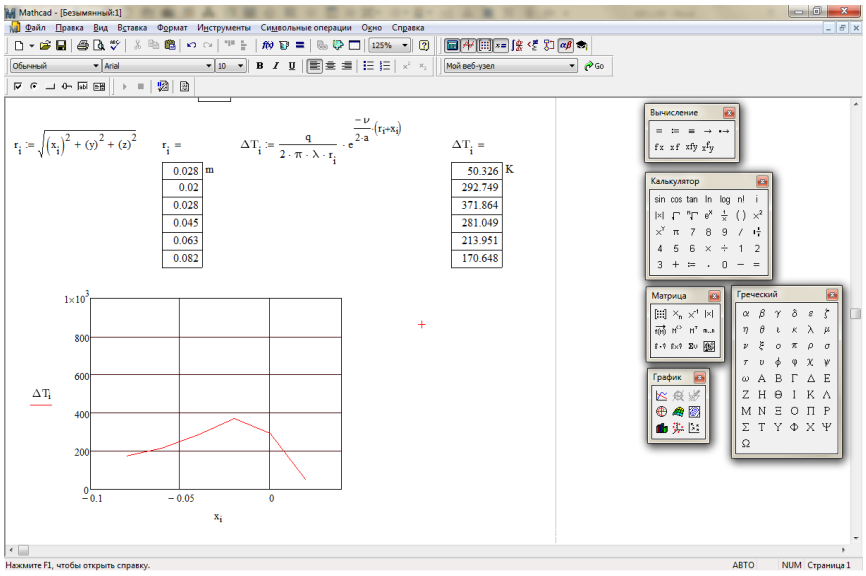

Рисунок 8 –Приращение температур в предельном состоянии при движении точечного источника теплоты на поверхности полубесконечного тела на участке от x = 2 см до x = – 8 см, y = 2 см, z = 0 см

4 Вариант задания

Вариант №	Участок, см			Мощность источника теплоты q, Вт	Скорость сварки v, см/с	Коэффициент температуропроводности a, см2/с	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(см·К)
	x	y	z				
0	от 2,0 до –8,0	2,0	0	4000	0,1	0,1	0,4
1	от 1,0 до –5,0	1,0	0	4000	0,15	0,08	0,38
2	от 2,0 до –12,0	0,5	0	4000	0,2	0,053	0,25
3	от 3,0 до –9,0	2,0	1,0	4000	0,1	0,1	0,4
4	от 1,5 до –6,0	1,0	1,0	4000	0,15	0,08	0,38
5	от 3,0 до –9,0	0,5	1,0	4000	0,2	0,053	0,25
6	от 2,0 до –12,0	2,0	1,5	4000	0,1	0,1	0,4
7	от 2,0 до –8,0	1,0	1,5	4000	0,15	0,08	0,38
8	от 3,0 до –9,0	1,0	1,5	4000	0,2	0,053	0,25
9	от 1,5 до –6,0	0,5	1,5	4000	0,1	0,1	0,4

Вариант №	Участок, см			Мощность источника теплоты q, Вт	Скорость сварки v, см/с	Коэффициент температуропроводности a, см2/с	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(см·К)
	x	y	z				
10	от 2,0 до –12,0	0,5	1,5	4000	0,15	0,08	0,38
11	от 2,0 до –8,0	2,0	0	2000	0,1	0,053	0,25
12	от 1,0 до –5,0	1,0	0	2000	0,15	0,1	0,4
13	от 2,0 до –12,0	0,5	0	2000	0,2	0,08	0,38
14	от 3,0 до –9,0	2,0	1,0	2000	0,1	0,053	0,25
15	от 1,5 до –6,0	1,0	1,0	2000	0,15	0,1	0,4
16	от 3,0 до –9,0	0,5	1,0	2000	0,2	0,08	0,38
17	от 2,0 до –12,0	2,0	1,5	2000	0,1	0,053	0,25
18	от 2,0 до –8,0	1,0	1,5	2000	0,15	0,1	0,4
19	от 3,0 до –9,0	1,0	1,5	2000	0,2	0,08	0,38
20	от 1,5 до –6,0	0,5	1,5	2000	0,1	0,053	0,25
21	от 2,0 до –12,0	0,5	1,5	8000	0,3	0,1	0,4
22	от 2,0 до –8,0	2,0	0	8000	0,35	0,08	0,38
23	от 1,0 до –5,0	1,0	0	8000	0,4	0,053	0,25
24	от 2,0 до –12,0	0,5	0	8000	0,3	0,1	0,4
25	от 3,0 до –9,0	2,0	1,0	8000	0,35	0,08	0,38
26	от 1,5 до –6,0	1,0	1,0	8000	0,4	0,053	0,25
27	от 3,0 до –9,0	0,5	1,0	8000	0,3	0,1	0,4
28	от 2,0 до –12,0	2,0	1,5	8000	0,35	0,08	0,38
29	от 2,0 до –8,0	1,0	1,5	8000	0,4	0,053	0,25
30	от 2,0 до –8,0	2,0	0	8000	0,3	0,1	0,4
31	от 1,0 до –5,0	1,0	0	6000	0,3	0,08	0,38
32	от 2,0 до –12,0	0,5	0	6000	0,35	0,053	0,25
33	от 3,0 до –9,0	2,0	1,0	6000	0,4	0,1	0,4
34	от 1,5 до –6,0	1,0	1,0	6000	0,3	0,08	0,38
35	от 3,0 до –9,0	0,5	1,0	6000	0,35	0,053	0,25
36	от 2,0 до –12,0	2,0	1,5	6000	0,4	0,1	0,4
37	от 2,0 до –8,0	1,0	1,5	6000	0,3	0,08	0,38
38	от 3,0 до –9,0	1,0	1,5	6000	0,35	0,053	0,25
39	от 1,5 до –6,0	0,5	1,5	6000	0,4	0,1	0,4
40	от 2,0 до –12,0	0,5	1,5	6000	0,3	0,08	0,38

5 Список литературы

1. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по Т33 спец. «Оборуд. И технология сварочн. пр-ва» / В. Н. Волченко, В. М. Ямпольский, В. А. Винокуров и др.; Под ред. В. В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. 559 с.: ил.