

Проект «Инженерные кадры Зауралья»

*МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Технология и автоматизация сварочного производства»

## **ПРИКЛАДНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности 150202.65 и направления 150700.62  
(профиль «Оборудование и технология сварочного производства»)

Курган 2014

Кафедра: «Технология и автоматизация сварочного производства»

Дисциплина: «Прикладные компьютерные программы»  
(специальность 150202.65, направление 150707.62).

Составил: канд. техн. наук, доц. С.И. Казаков.

Утверждены на заседании кафедры «27» марта 2014 г.

Рекомендованы методическим советом университета в рамках проекта  
«Инженерные кадры Зауралья» «14» апреля 2014 г.

# **Лабораторная работа № 1**

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

В связи с бурным развитием вычислительной техники и увеличением мощности ЭВМ различных типов в расчетную практику широко внедряются численные методы. Одним из наиболее эффективных применительно к строительной и машиностроительной практике следует считать метод конечных элементов (МКЭ).

Название этого метода в некоторой мере предопределяет его сущность, так как при его использовании конструкция тем или иным путем разбивается на отдельные элементы конечной длины и достаточно простой конфигурации, напряженно-деформированное состояние которых предварительно подробно изучено. Сопряжение элементов осуществляется путем удовлетворения условий равновесия и неразрывности перемещений (одинаковая величина перемещения в узле для всех соединенных с данным узлом элементов). Поведение каждого элемента описывается конечным числом обобщенных координат. Такая формулировка расчета объединяет подход как к объектам строительной механики стержневых систем, так и к объектам теории упругости, что позволяет найти эффективные методы расчета реальных конструкций, в которых обычно соединены (чаще всего сварены между собой) стержни, плиты, пластины, оболочки и т.д.

При использовании МКЭ представляется возможным четко сформулировать три группы уравнений, как это сделано в теории упругости:

- 1) статические, описывающие равновесное состояние системы;
- 2) геометрические, устанавливающие связь между деформациями и перемещениями;
- 3) физические, связывающие между собой силы и деформации.

При рассмотрении стержневых систем МКЭ является точным методом.

### **1 Алгоритм расчета усилий в стержнях плоской фермы методом конечных элементов**

Алгоритм составлен на основе применения теории матриц к расчету ферм [1].

Рассмотрим произвольную плоскую стержневую систему. В первую очередь, необходимо описать структуру решетки системы, пронумеровав все узлы фермы и ее стержни. Для описания структуры составляется структурная матрица  $-S$ , в которой в каждом ее столбце находятся только два числа: 1 и -1, причем 1 располагается в строке, номер которой совпадает с началом стержня, а -1 – в строке, номер которой совпадает с номером узла, к которому примыкает конец стержня. За начало стержня принимается тот его конец, который примыкает (присоединяется) к меньшему по номеру узлу. В каждой строке структурной матрицы (а строка соответствует узлу, совпадающему с ней по номеру) значащие числа характеризуют номера элементов, соединяемых в узле,

причем  $I$  подчеркивает то, что к узлу подходит начало стержня, а  $-I$  – что к узлу подходит конец стержня. Далее следует сформировать матрицы – столбцы координат узлов фермы:

$$\bar{C}_i = \begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

где  $i$  – номер соответствующего узла,

$X_i$  и  $Y_i$  – соответственно координаты  $X$  и  $Y$  узла в выбранной системе координат.

Общая матрица-столбец координат узлов фермы:

$$\bar{C} = \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где  $m$  – число узлов фермы.

Матрица проекций длин элементов фермы:

$$\vec{P} = \bar{S}c^* \cdot \bar{C}, \quad (3)$$

где  $\bar{S}c^*$  – транспонированная матрица  $\bar{S}c$ .

Транспонирование – преобразование исходной матрицы, состоящее в замене строк столбцами при сохранении их нумерации. Элементами матрицы проекций являются матрицы-столбцы, два элемента каждого из которых  $i$ -го стержня дают проекции:

$$\vec{P}_i = \begin{Bmatrix} L_{ix} \\ L_{iy} \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

Длины стержней определяются выражением:

$$L_i = \sqrt{\vec{P}_i^* \square \vec{P}_i}, \quad (5)$$

где  $\vec{P}_i$  – матрица проекций стержня.

$\vec{P}_i^*$  – транспонированная матрица из  $\vec{P}_i$ .

Векторы направляющих косинусов стержней:

$$\vec{A}_i = \frac{1}{L_i} \cdot \begin{Bmatrix} L_{ix} \\ L_{iy} \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

По длине элемента фермы нормальная сила постоянна:

$$N_{\text{нач}} = N_{\text{кон}} = N_i. \quad (7)$$

Построим вектор внешних нагрузок

$$\vec{P} = \begin{pmatrix} \vec{P}_1 \\ \vec{P}_2 \\ \vdots \\ \vec{P}_m \end{pmatrix}, \quad (8)$$

элементами которого являются матрицы-столбцы –  $\vec{P}_j$ , определяющие проекции внешних сил, действующих на узлы, например, для j-го узла имеем:

$$\vec{P}_j = \begin{pmatrix} P_{xj} \\ P_{yj} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

где  $P_{xj}$  и  $P_{yj}$  – проекции внешних сил, действующих на j-й узел, на соответствующие координатные оси. Выражение, устанавливающее связь между внутренними усилиями и внешними силами, при этом будет следующее:

$$\vec{P} = -\vec{S} \cdot \vec{N}, \quad (10)$$

где  $\vec{N}$  – матрица-столбец, элементами которой являются искомые усилия в стержнях фермы;

$\vec{S}$  – матрица, получаемая из структурной матрицы  $\vec{S}_c$  путем замены элементов 1 на соответствующие векторы направляющих косинусов стержней, а элементов (-1) матрицы  $\vec{S}_c$  на соответствующие векторы направляющих косинусов с обратным знаком. Для определения неизвестных усилий в стержнях из вектора  $\vec{P}$  следует исключить элементы матрицы, соответствующие опорным связям системы, и таким путем получить вектор  $\vec{Q}$ . Таким же образом из матрицы  $\vec{S}$  необходимо исключить строки, соответствующие опорным узлам фермы. При этом для узла с шарнирно-неподвижным опиранием удаляются обе строки, а для узла с шарнирно-подвижным опиранием удалить одну строку. В результате таких преобразований получаем матрицу  $\vec{S}_p$ . Тогда вектор усилий  $\vec{N}$  находится решением матричного уравнения:

$$\vec{Q} = \vec{S}_p \cdot \vec{N}. \quad (11)$$

Матрица столбец  $\vec{N}$  может быть определена:

$$\vec{N} = \vec{S}_p^{-1} \cdot \vec{Q}, \quad (12)$$

где  $\vec{S}_p^{-1}$  – обратная матрица относительно  $\vec{S}_p$ .

## 2 Пример расчета плоской фермы матричным методом

Для пояснения алгоритма расчета стержневых систем по методу МКЭ в матричной форме выполним расчет простейшей трехстержневой фермы, показанной на рисунке 1.

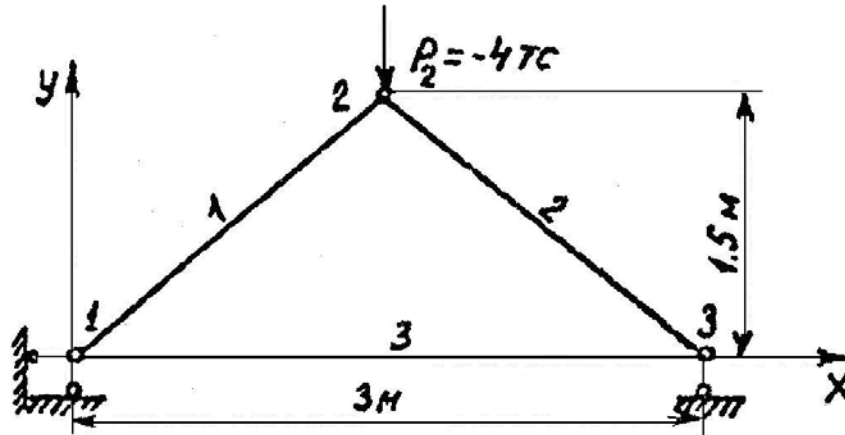


Рисунок 1 – Схема плоской фермы

Построим структурную матрицу фермы (рисунок 1) по ранее приведенной форме:

$$\bar{S}_c = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{vmatrix} \begin{array}{l} \text{первый узел} \\ \text{второй узел} \\ \text{третий узел} \end{array}$$

В построенной матрице:

строки – узлы фермы;

столбцы – стержни фермы.

Запишем матрицы – столбцы координат узлов фермы:

$$\bar{C}_1 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \end{vmatrix}, \bar{C}_2 = \begin{vmatrix} 1,5 \\ 1,5 \end{vmatrix}, \bar{C}_3 = \begin{vmatrix} 3 \\ 0 \end{vmatrix},$$

$$\bar{C} = \begin{vmatrix} \bar{C}_1 \\ \bar{C}_2 \\ \bar{C}_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1,5 \\ 1,5 \\ 3 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

В матрице  $\bar{C}_3$  цифра 3 обозначает координату узла 3 по оси X (X=3), вторая цифра 0 дает значение узла 3 по направлению оси Y (Y=0).

Транспонированная матрица  $\bar{S}_c^*$  путем замены строк столбцами при сохранении их нумерации будет иметь вид:

$$\bar{S}_c^* = \begin{array}{l} \left\| \begin{array}{ccc} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{array} \right\| \begin{array}{l} \text{первый стержень} \\ \text{второй стержень} \\ \text{третий стержень} \end{array} \\ \downarrow \downarrow \downarrow \rightarrow \text{3-й узел} \\ \downarrow \downarrow \rightarrow \rightarrow \text{2-й узел} \\ \downarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \text{1-й узел} \end{array}$$

Матрица проекций длин элементов фермы по формуле (3):

$$\vec{\Pi} = \begin{array}{l} \left\| \begin{array}{c} \bar{\Pi}1 \\ \bar{\Pi}2 \\ \bar{\Pi}3 \end{array} \right\| = - \left\| \begin{array}{ccc} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{array} \right\| \begin{array}{c} \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 1,5 \\ 1,5 \\ 3 \\ 0 \end{array} \right\| = \begin{array}{c} \left\| \begin{array}{c} 1,5 \\ 1,5 \\ 1,5 \\ 1,5 \\ 3 \\ 0 \end{array} \right\| \end{array} \end{array}$$

Длины стержней вычисляются по выражению (5):

$$L1 = \sqrt{\|1,5\| \cdot \left\| \begin{array}{c} 1,5 \\ 1,5 \end{array} \right\|} = \sqrt{1,5 \cdot 1,5 + 1,5 \cdot 1,5} = 2,12 \text{ м};$$

$$L2 = \sqrt{\|1,5\| \cdot \left\| \begin{array}{c} 1,5 \\ 1,5 \end{array} \right\|} = \sqrt{1,5 \cdot 1,5 + 1,5 \cdot 1,5} = 2,12 \text{ м};$$

$$L3 = \sqrt{\|3\| \cdot \left\| \begin{array}{c} 3 \\ 0 \end{array} \right\|} = \sqrt{3 \cdot 3 + 0 \cdot 0} = 3 \text{ м}.$$

Векторы направляющих косинусов стержней по формуле (6):

$$\vec{A}1 = \frac{1}{2,12} \cdot \left\| \begin{array}{c} 1,5 \\ 1,5 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} 0,707 \\ 0,707 \end{array} \right\| ;$$

$$\vec{A}2 = \frac{1}{2,12} \cdot \left\| \begin{array}{c} 1,5 \\ -1,5 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} 0,707 \\ -0,707 \end{array} \right\| ;$$

$$\vec{A}3 = \frac{1}{3} \cdot \left\| \begin{array}{c} 3 \\ 0 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{c} 1 \\ 0 \end{array} \right\| .$$

Вектор внешних нагрузок по выражению (8):





Решение уравнений (11) и (12) в матричной форме дает следующий результат:

$$\vec{N} = \begin{Bmatrix} N1 \\ N2 \\ N3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -2,828 \\ -2,828 \\ 1,999 \end{Bmatrix},$$

где  $N1$ ,  $N2$  и  $N3$  – усилия в стержнях 1, 2 и 3 [Тс].

### **3 Программа анализа напряженно-деформированного состояния стержневых систем**

#### **3.1 Общие сведения**

Программа предназначена для анализа напряженно-деформированного состояния стержневых систем. Анализируемые системы могут быть плоскими и объемными, статически определимыми и статически неопределимыми. Принято, что элементы системы соединены в узлах идеальными шарнирами. В программе принята система координат, изображенная на рисунке 2.

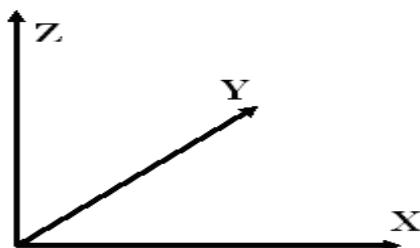


Рисунок 2 – Система координат, принятая в программе

Единицы измерения в программе не ограничиваются, важно правильно их согласовать.

#### **3.2. Выполнение программы**

Для выполнения программы необходимо запустить исполняемый файл OSKAL.exe, после чего на экране появится окно программы, изображенное на рисунке 3.

Координаты узлов конструкции заносятся в таблицу «Сведения об узлах» (графы «X», «Y», «Z»). Туда же заносятся сведения о приложенной нагрузке (проекции сил на координатные оси для каждого из узлов; графы «Сила X», «Сила Y», «Сила Z») и условия закрепления (присутствие закрепления по координатным осям для каждого из узлов обозначается 1; графы «Опора X», «Опора Y», «Опора Z»).

В таблицу «Сведения о связи элементов» заносятся номера узлов, образующих каждый из стержней конструкции (графы «Узел 1», «Узел 2»). Также указываются площадь поперечного сечения и модуль упругости каждого из стержней.

Добавление узлов (стержней) в таблицы «Сведения об узлах» и «Сведения о связи элементов» осуществляется посредством всплывающих меню, вызываемых правой кнопкой мыши, и последующим указанием

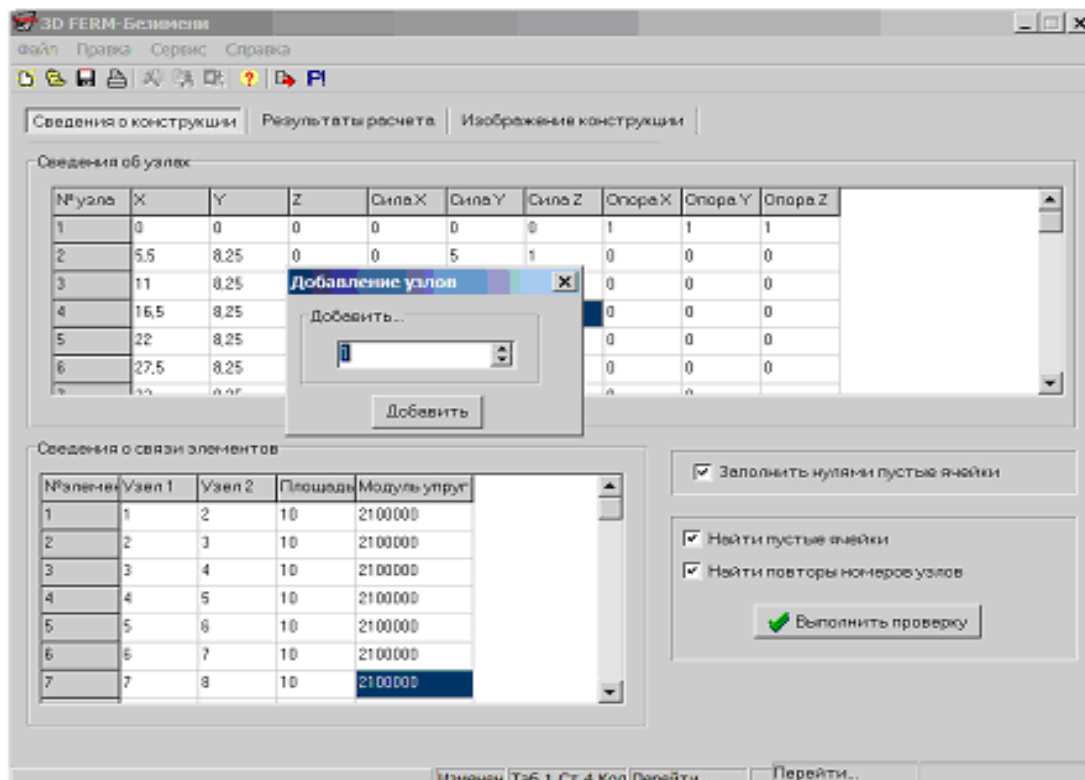


Рисунок 3 – Основное окно программы

количества узлов (стержней), которое необходимо добавить в соответствующую таблицу. Аналогично производится и удаление узлов (стержней).

Отмеченный пункт «Заполнить нулями пустые ячейки» приведет к тому, что значения пустых ячеек при попытке произвести расчет будут автоматически приравнены к нулю. Это может быть удобно при большом количестве нулевых значений, однако возможно возникновение ошибок, связанных с тем, что могут быть упущены из виду ячейки, значения которых не должны быть нулевыми. Во избежание этого можно произвести проверку на предмет наличия не заполненных ячеек. Для этого необходимо отметить пункт «Найти пустые ячейки» и нажать кнопку «Выполнить проверку». Программа проверит внесенные данные и при обнаружении пустой ячейки выдаст сообщение об этом.

Возможно также произвести проверку на повторение номеров узлов, образующих какой-либо стержень. Для этого необходимо отметить пункт «Найти повторы номеров узлов» нажать кнопку «Выполнить проверку». При обнаружении совпадений программа выдаст соответствующее сообщение.

Изображение конструкции можно увидеть на соответствующей вкладке (рисунок 4). Способ отображения конструкции выбирается кнопками:

- **XZ, XZ** – проекции конструкции на плоскость XZ; виды, соответственно, спереди (главный) и сзади.
- **XY, XY** – проекции конструкции на плоскость XY; виды, соответственно, снизу и сверху.
- **YZ, YZ** – проекции конструкции на плоскость YZ; виды, соответственно, слева и справа.
- **D** – диметрия. Вращение изображения в этом режиме осуществляется кнопкой.

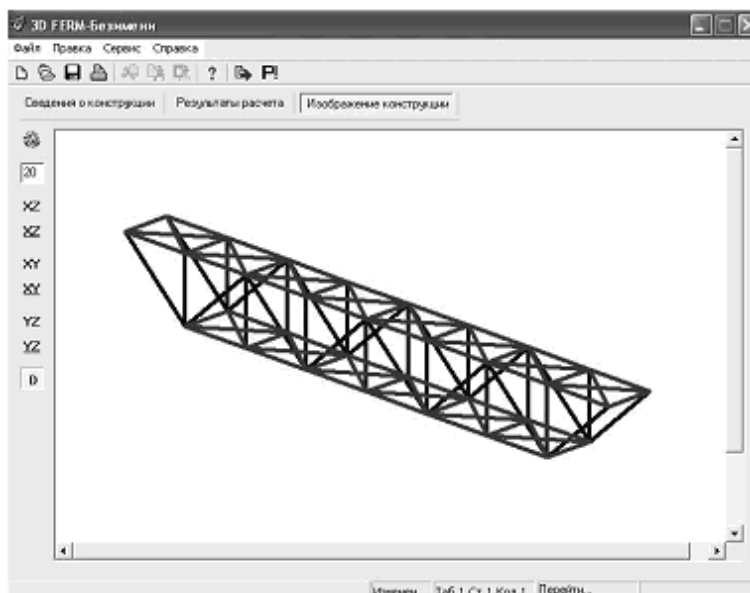


Рисунок 4 – Вкладка «Изображение конструкции»

Чтобы произвести расчет, необходимо выбрать соответствующий пункт в главном меню («Сервис» – «Расчет»), либо воспользоваться «горячей» клавишей F9, либо кнопкой «P!» панели инструментов.

Результаты расчета находятся на соответствующей вкладке (рисунок 5). В первом окне выведены на экран длины стержней и смещения (перемещения) узловых точек по направлению координатных осей X, Y и Z. Во втором окне показаны результаты расчета опорных реакций и реакции (усилия) в элементах (стержнях) решетчатой системы. Все эти результаты могут быть сохранены в файл («Файл» – «Сохранить»).

файл Правка Сервис Справка

Сведения о конструкции | Результаты расчета | Изображение конструкции

### Длины стержней

Номер стержня	Длина стержня
1	9.1
2	9.1
3	9.1
4	9.1
5	9.1
6	9.1
7	9.1
8	9.099999999999999
9	9.100000000000001
10	9.099999999999999
11	9.099999999999999

### Смещения узловых точек

Номер точки	Смещение X	Смещение Y	Смещение Z
13	-0.00502036911111217	-1.290847161057	0
14	-0.00278328644444498	-0.789321308734777	0
15	0	0	0
16	0.455161288513757	-3.1114884351713	0
17	0.455161288513757	-2.00012192868401	0
18	0.455161288513757	-2.4994811326504	0

Отчет о результатах выполненных расчетов | Изменен Таб.1,Ст.1,Хол.Перейти... | Перейти..

3D FERM 1 - Microsoft Word

файл Правка Сервис Справка

Сведения о конструкции | Результаты расчета | Изображение конструкции

### Реакции опор

Номер точки	Реакция X	Реакция Y	Реакция Z
1	0	593.2499999999928	0
15	-5.9876281710558E-10	593.2500000000015	0

### Реакции в элементах

Номер элемента	Усилие	Напряжение
1	0	0
2	68.5533333332881	68.5533333332881
3	205.660000000032	205.660000000032
4	411.320000000093	411.320000000093
5	685.533333333341	685.533333333341
6	1028.299999999907	1028.299999999907
7	1439.619999999992	1439.619999999992
8	1919.493333333455	1919.493333333455
9	2467.920000000077	2467.920000000077

Отчет о результатах выполненных расчетов | Изменен Таб.1,Ст.1,Хол.Перейти... | Перейти..

Рисунок 5 – Результаты расчета

### 3.3 Сообщения оператору

Все элементы окон при необходимости снабжены соответствующими подсказками, поясняющими их назначение. Кроме того, существуют сообщения об ошибках и запросы на подтверждение каких-либо действий.

Если при заполнении таблиц пользователь пытается ввести недопустимый символ, то появляется сообщение об этом (рисунок 6).

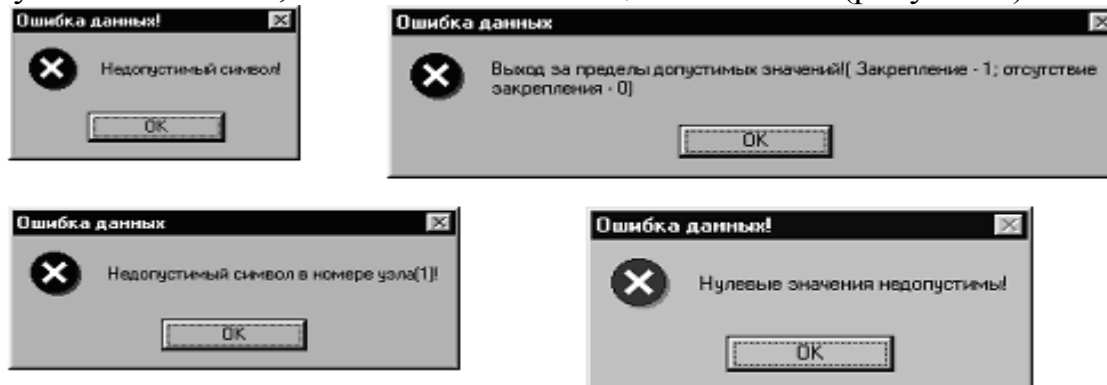


Рисунок 6 – Сообщения об ошибках

При появлении такого сообщения необходимо нажать кнопку «ОК» и ввести верные данные.

Если введенных данных недостаточно для выполнения расчета, то появляется сообщение, показанное на рисунке 7.

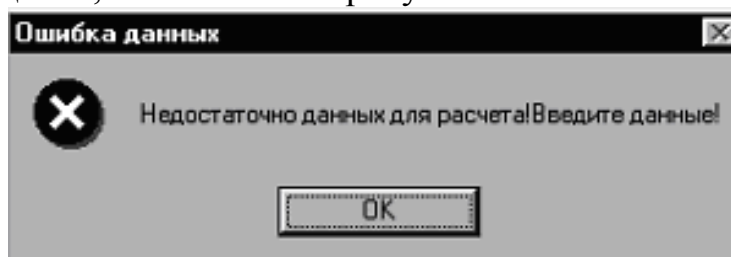


Рисунок 7 – Сообщение о недостатке данных

В этом случае следует ввести недостающие данные и повторить попытку расчета.

В случае возникновения ошибок при выполнении программы выдается соответствующее сообщение. Ошибка может быть связана с некорректностью данных либо с иной причиной, которую нужно выяснить и устранить.

Если файл был изменен, и пользователь пытается выйти из него каким-либо способом, то появляется запрос о необходимости сохранения данных (рисунок 8).

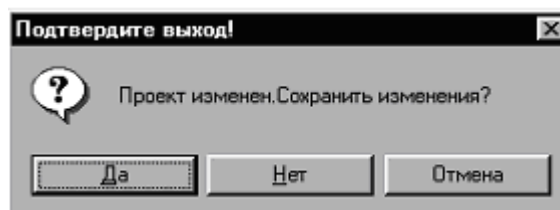


Рисунок 8 – Запрос на сохранение данных

Можно сохранить данные («Да»), не сохранять их («Нет») или закрыть окно сообщения и продолжить работу с программой («Отмена»).

#### **4 Порядок выполнения лабораторной работы**

4.1 Изучить по представленному выше описанию методику расчета стержневых систем по МКЭ.

4.2 Получить у преподавателя задание на расчет стержневой системы.

4.3 Запустить программу 3D FERM и ввести исходные данные о стержневой системе и внешней нагрузке.

4.4 Проверить правильность построения стержневой системы.

4.5 Выполнить расчет с определением:

- длины стержней;
- опорных реакций;
- перемещений каждого из узлов;
- усилий и напряжений в каждой из стержней конструкции.

4.6 Составить отчет по результатам выполненных расчетов.

## **Лабораторная работа № 2**

### **АНАЛИЗ СВАРИВАЕМОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ**

Реализация большинства сварочных технологических процессов связана с нагревом обрабатываемого материала различными видами источников теплоты, а эффективность использования того или иного сварочного процесса определяется условиями нагрева и охлаждения изделия и присадочного материала. Так, характер протекания тепловых процессов определяет производительность плавления основного и присадочного металлов, направление и полноту протекания металлургических процессов в сварочной ванне, условия формирования структуры металла шва и зоны термического влияния. Условия нагрева и охлаждения во многом определяют характер и уровень внутренних напряжений и деформацию изделия. Поэтому в инженерной практике часто возникает необходимость расчетного определения температурно-временных параметров сварочных термических циклов в различных зонах изделия: размеров зон нагрева; скоростей нагрева и охлаждения и т.п. Наряду с современными численными методами подобных расчетов, для решения таких задач широко используют упрощенные аналитические подходы, лежащие в основе классической теории распространения теплоты при сварке и позволяющие оперативно получать численные оценки с приемлемой для практических целей точностью.

#### **1 Критерии выбора технологии и режимов сварки углеродистых и низколегированных сталей**

При дуговой сварке плавлением малоуглеродистых и низколегированных сталей режимы сварки определяют по критериям удовлетворительного формирования шва и максимально возможной производительности процесса сварки с учетом толщины соединяемых деталей, наличия формирующих корень шва устройств, разделки кромок и характера выполнения шва.

При сварке конструкционных низколегированных и легированных сталей повышенной прочности, поставляемых в термоупрочненном состоянии, при выборе режимов сварки, кроме уже указанных выше критериев удовлетворительного формирования шва и максимально возможной производительности, необходимо еще выполнение двух сравнительно противоречивых условий:

1) предупредить образование холодных трещин в околошовной зоне и шве в процессе сварки и при последующем хранении изделий до отпуска. Для предупреждения этого явления необходимо снижать скорости охлаждения металла при температуре начала распада переохлажденного аустенита, что уменьшит вероятность образования мартенсита и исключит образование холодных трещин;

2) необходимо добиваться наименьшего возможного разупрочнения основного металла на участке высокого отпуска зоны термовлияния. Для выполнения этого условия сварку необходимо вести по возможности при

жестких режимах, т.е. чтобы время пребывания металла этого участка выше температуры отпуска было минимальным.

Такое двойное ограничение термического цикла сварки может быть выполнено при условии выбора критерием оптимальности технологии и режимов как однопроходной, так и многопроходной сварки длинными участками – *скорости охлаждения околошовной зоны*. Этот критерий – скорость охлаждения – определяют при температуре начала распада переохлажденного аустенита рассматриваемой стали. Скорость охлаждения должна находиться в интервале оптимальных значений для данной стали. Нижняя граница интервала ограничивает продолжительность времени пребывания металла околошовной зоны выше температуры отпуска, что уменьшает степень разупрочнения, ограничивает рост зерна и предупреждает снижение ударной вязкости сварного соединения. Верхняя граница интервала скоростей ограничивает максимально допустимые скорости охлаждения металла вблизи линии сплавления и, следовательно, предотвращает образование мартенсита.

Сведения по оптимальным скоростям охлаждения содержатся в таблице 1 и в справочной литературе по свариваемости сталей.

## **2 Математическая модель расчета тепловых процессов при дуговой сварке изделий, склонных к образованию холодных трещин**

Большие скорости охлаждения с образованием закалочных структур наиболее часто имеют место при дуговой сварке массивных тел. Задача анализа распределения температур для этого случая была решена Н.Н. Ры-калиным в виде уравнения предельного состояния процесса распространения тепла точечного источника постоянной мощности, движущегося с постоянной скоростью по поверхности полубесконечного тела с непронускающей тепло граничной плоскостью. Точка горения дуги при ее движении находится в начале системы координат (подвижная система координат).

Полубесконечное тело представляет собой массивное тело с одной ограничивающей плоскостью:  $z = 0$ . Остальные поверхности находятся на значительном удалении от нее и практически не влияют на распространение теплоты. Поток теплоты в этом случае пространственный. Ошибка от пренебрежения ограниченностью размеров области распространения теплоты тем меньше, чем больше размеры тела и чем короче расчетная продолжительность процесса распространения теплоты (т.е. суммарная длительность нагрева и охлаждения), чем ближе к источнику теплоты зона расчетных температур и чем ниже коэффициент температуропроводности материала.

Математическая модель распределения температур для точечного источника тепла представлена следующими уравнениями:

$$T(R, x) = T_0 + \left( \frac{q}{2\pi \cdot \lambda \cdot R} \right) e^{-[V(x+R)/2a]}, \quad (13)$$



$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}; \quad (14)$$

$$q = 0,24\eta \cdot J \cdot U; \quad (15)$$

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}; \quad (16)$$

где  $T(R, x)$  – температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) в точке  $R$ ,  $x$  подвижной системы координат;

$T_0$  – начальная температура свариваемых кромок;

$q$  – эффективная тепловая мощность источника;

$\eta$  – эффективный КПД источника нагрева;

$J$  – сила тока дуги;

$U$  – напряжение на дуге;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$a$  – коэффициент температуропроводности;

$c$  – удельная теплоемкость;

$\gamma$  – удельная плотность металла;

$V$  – скорость сварки.

Значения  $\lambda$ ,  $c$  и  $\gamma$  приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные свойства стали Ст.3 и аустенитных сталей

Свойства	ВСт3	18 - 8	25 25 - 20
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7,85	7,9	7,82
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	1500	1400	1388
Удельная теплоемкость, кал/(г·град)	0,10	0,12	0,12
Коэффициент теплопроводности, кал/(см·сек·град)	0,096	0,039	0,035
Коэффициент линейного расширения	$12 \cdot 10^{-6}$	$17,3 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}$
Электросопротивление при $20^{\circ}\text{C}$ , ом·мм <sup>2</sup> /м	0,15	0,73	0,73
Температура начала окалинообразования, $^{\circ}\text{C}$	550	850	1150

Алгоритм решения задачи заключается в последовательном выполнении операций формулы (1), начиная с точки  $R_0 (X_0, Y_0, Z_0)$ , если  $R_0 \Rightarrow \text{EPS}$ , где  $\text{EPS} = N_x / 1000$ . Температура вычисляется в узлах объемной сетки, моделирующей массивное тело с координатами от  $X_0$  до  $X_{\max}$  с шагом  $N_x$ , от  $Y_0$  до  $Y_{\max}$  с шагом  $N_y$  и от  $Z_0$  до  $Z_{\max}$  с шагом  $N_z$ . Блок-схема программы показана на рисунке 9.

Скорость охлаждения как основной критерий склонности стали к образованию холодных трещин определяется на линии сплавления, где чаще всего и наблюдается образование закалочных структур и холодных трещин. Линия сплавления на тепловом поле определяется максимальным расстоянием от оси шва, при котором температура еще достигает температуры плавления, но не превышает (сталь углеродистая  $\approx 1500^{\circ}\text{C}$ ).

Температура начала мартенситного превращения  $T_n$  из переохлажденного аустенита может быть найдена в справочной литературе или для низколегированных сталей по следующему выражению (17)

$$T_n = 540-492 \cdot C - 30 \cdot Mn - 31 \cdot Si - 14 \cdot Cr - 16 \cdot Mo - 23 \cdot Ni + 68 \cdot U + 215 \cdot Ti + 270 \cdot Nb - 10 \cdot Cu + 220 \cdot P - 406 \cdot N + 12 \cdot C \cdot Cr - 4,2 \cdot Cr \cdot Mo - 4,6 \cdot C \cdot Ni + 8,2 \cdot Cr \cdot U + 160 \cdot C^2 + 13 \cdot Si^2 + 0,9 \cdot Ni^2 - 103 \cdot U^2 + 0,313 / (C + 0.001); \quad (17)$$

где  $C, Mn, Si$  и др. – легирующие компоненты анализируемой стали в процентах по массе.

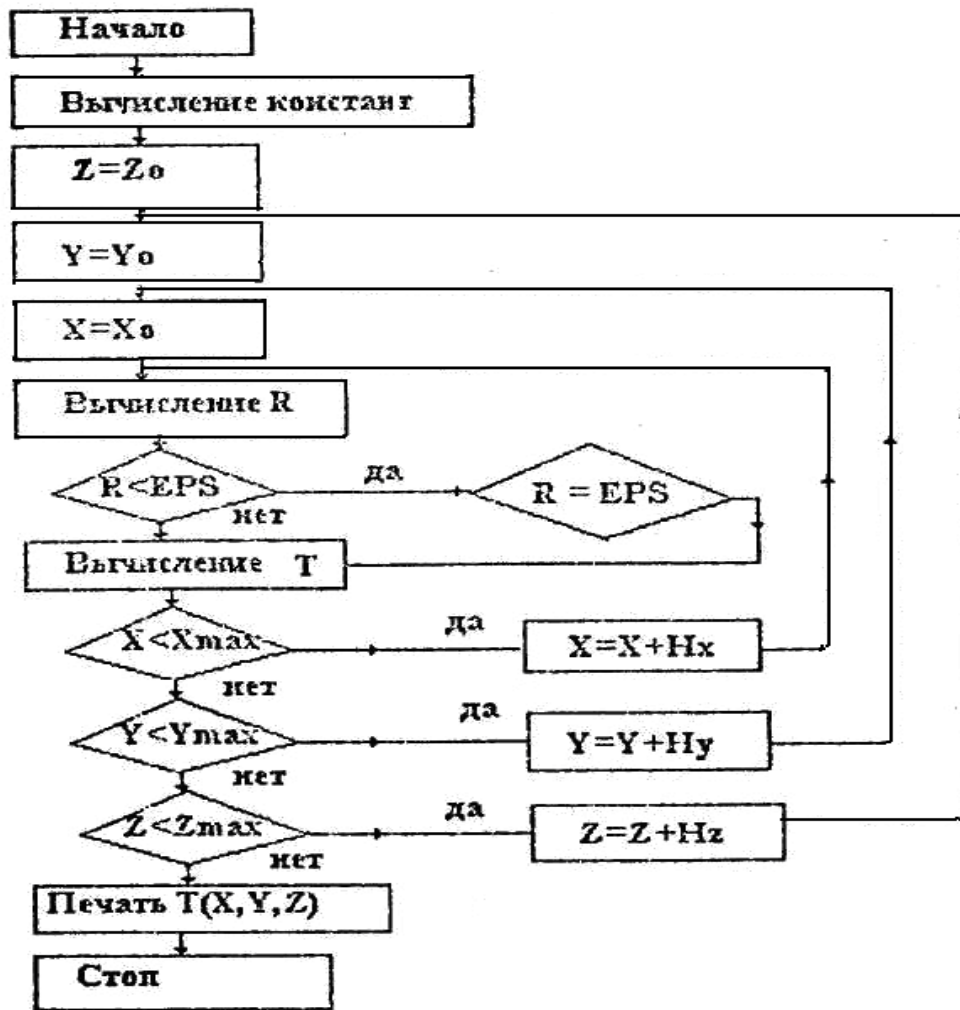


Рисунок 9 – Блок-схема программы расчета температур в массивном теле при сварке подвижным точечным источником тепла

Скорость охлаждения на выявленной линии сплавления определяется в программе по следующей формуле

$$V_{охл} = \frac{T_n - T_{n+1}}{\frac{X_n - X_{n+1}}{V_{св}}}; \quad (18)$$

где  $T_n$  – ближайшее большее в сравнении с  $T_n$  значение температуры на линии сплавления в зоне охлаждения по сравнению с температурой начала мартенситного превращения,

$T_{n+1}$  – очередное меньшее за  $T_n$  значение температуры на линии сплавления,

$X_n$  и  $X_{n+1}$  – соответствующие  $T_n$  и  $T_{n+1}$  координаты  $X$  на линии сплавления,

$V_{св}$  – скорость сварки.

Указанный алгоритм реализован в программе WELDER. Сварочный нагрев массивного тела подвижным точечным источником тепла. Пример расчета по программе показан на рисунке 10. Для сварки листов из стали 40 толщиной 40 мм выбрана автоматическая сварка под слоем флюса с выполнением стыкового двухстороннего шва на следующем режиме: сварочный ток – 950 А, напряжение на дуге – 41 В, скорость сварки 0,9 см/сек, диаметр электрода – 5 мм, количество проходов 6. Эффективная тепловая мощность дуги при КПД = 0,7 составит – 7480 кал/сек. Начальная температура свариваемых кромок – 20° С. Коэффициент теплопроводности стали 40:  $\lambda = 0,1$  кал/(см·сек·град). Удельная теплоемкость – 0,15 кал/(гр·град) при удельной плотности стали  $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>. Объемная зона анализа распределения температур вокруг дуги в подвижной системе координат следующая:  $X$  – от –100 см до + 1 см,  $Y$  – от 0,975 см до 5,0 см,  $Z$  – от 0 до 4 см. При этом шаг сетки по оси  $X$ :  $\Delta X = 0,5$  см, по оси  $Y$ :  $\Delta Y = 0,1$  см. В узлах этой сетки 200 X 40 узлов и вычислялась температура. На рисунке 10 справа виден фрагмент таблицы температур с указанием координат  $T(x, y)$ . Предварительным просмотром теплового поля было найдено значение  $Y$  при котором температура при нагреве достигала 1500° С, а точнее  $T = 1497,75^\circ$  С при  $Y_0 = 0,975$  см от оси шва и  $X = -2,5$  см позади дуги. Таким анализом мы вышли на линию сплавления, на которой и будет определяться скорость охлаждения при температуре  $T_n = 340^\circ$  С для стали 40. Для расчета скорости охлаждения по программе необходимо ввести значение 340 в окно в правой нижней части экрана «Значение температуры град. С». При нажатии, после ввода температуры, кнопки «Вычислить» в окне «Результаты» появляется вычисленное по формуле (18) значение скорости охлаждения 8,9 град.С/сек. Оптимальный же интервал скоростей охлаждения (таблица 2) для стали 40 составляет  $V_{опт} = 2,4 - 5,0^\circ$  С/сек.

Если скорость охлаждения, найденная по результатам расчетов, превысит оптимальный интервал, то для ее снижения необходимо назначить предварительный подогрев при неизменных параметрах дуги. Если же скорость охлаждения будет меньше нижней границы оптимального интервала, то для ускорения охлаждения необходимо снижать погонную энергию дуги, уменьшая силу тока или увеличивая скорость сварки при соблюдении условия обеспечения нормального формирования шва с возможным переходом от однопроходного к многослойному шву с промежуточным охлаждением до комнатной температуры между слоями.

В приведенном выше примере при сварке без подогрева скорость охлаждения превышает оптимальный диапазон, и, следовательно, для снижения  $V_{охл}$  назначим предварительный подогрев кромок до 100° С. Это значение

температуры введем в исходные данные и повторим расчет теплового поля и скорости охлаждения. Результаты расчета представлены на рисунке 11. Вновь вычисленная скорость охлаждения на линии сплавления по формуле (18) составила  $V_{\text{охл}} = 4,98 \text{ } ^\circ \text{C/сек}$ , что удовлетворяет условию оптимального интервала скоростей охлаждения при дуговой сварке стали 40.

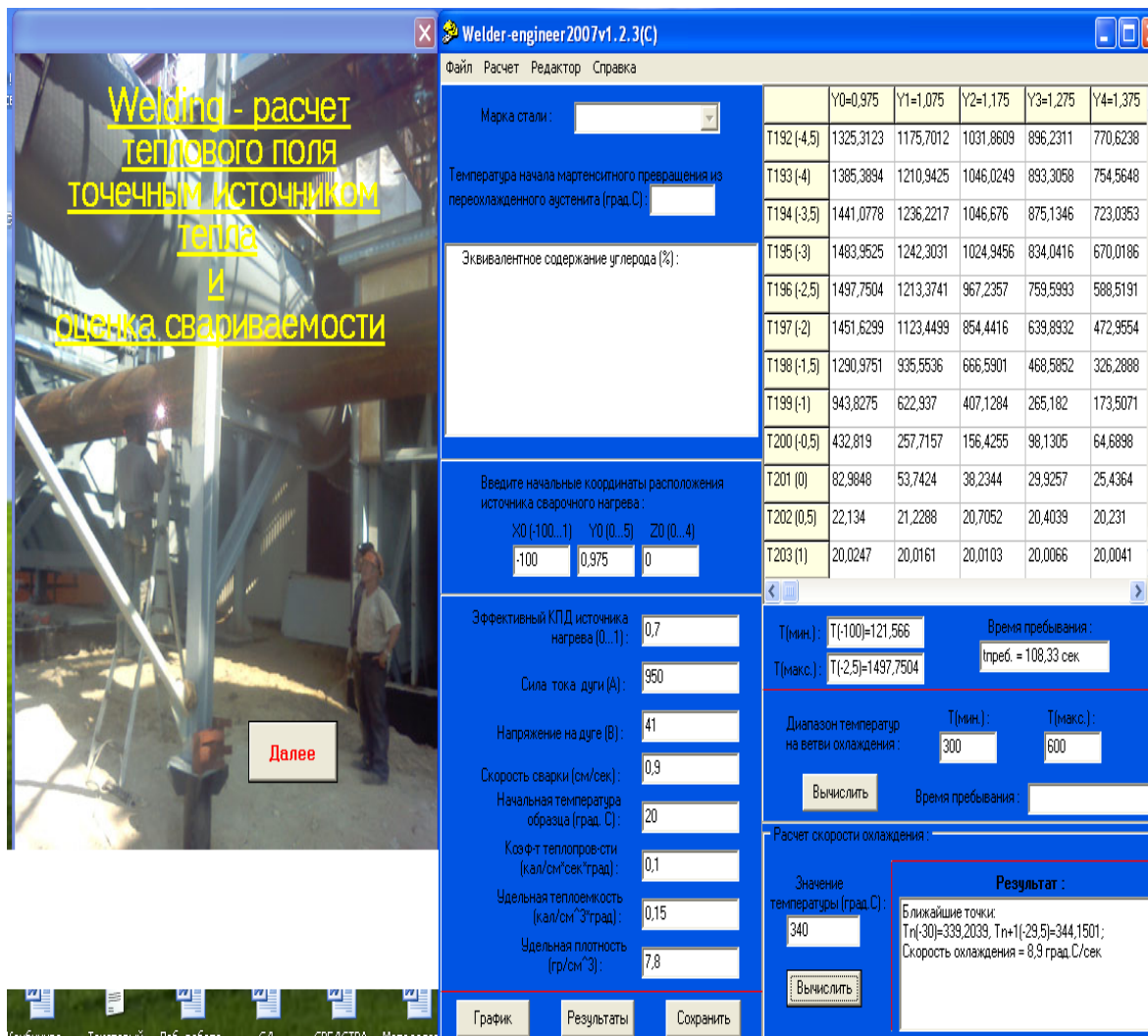


Рисунок 10 – Окно программы ввода исходных данных и таблица распределения температур  $T(X, Y, Z)$  в заданной области вокруг дуги в подвижной системе координат с вычисленной при  $T = 340^\circ \text{C}$  скоростью охлаждения  $V_{\text{охл}} = 8,9^\circ \text{C/с}$

Таблица 2 – Оптимальный интервал скоростей охлаждения при сварке по данным изменения структуры и свойств сталей

Сталь	Оптим. интервал $V_{\text{охл}}, \text{ } ^\circ \text{C/с}$	Количество мартенсита в структуре, %	Твердость НВ
Углеродистая обыкновенного качества			
Ст2	6 - 18	-	155-170
Ст3кп	1,2 - 12	-	155-170
МСт5	0,12 - 40	-	130-190
БСт3	1,4 - 15	-	155-165

Углеродистая качественная конструкционная			
35	0,12 – 7,0	0 - 30	130-200
40	2,4 – 5,0	-	265-280
45	2,0 – 4,0	<5	230-250
Низколегированная конструкционная			
09Г2	1,0 - 15	-	215-185
10Г2Б	0,1 - 70	0 - 10	210-165
14Г2	1,0 – 1,2	-	225-270
16ГС	1,0 - 12	-	190-225
17ГС	10,0 - 30	-	225-235
14ХГС	0,8 – 2,6	-	170-215
12ХГСМФ	0,1 - 30	0 - 20	205-300
15ХГНМ	1,0 - 10	0 - 20	250-320
14ХГ2	1,2 -5,5	-	325-335
17ХГ2САФ	0,1 - 20	0 - 5	180-305
10ХСНД	0,8 - 15	-	250-275
15ХСНД	1,8 – 9,0	-	230-250
Легированная конструкционная			
40Х	4 - 14	75 - 90	340-460
30Г2Л	<= 6,0	0 - 20	300
25ХГНА	<=20	-	365
30ХМА	0,1 – 5,0	0 - 40	190-250
35ХМ	1,0 – 5,0	0 - 40	230-340
25Н3	0,8 - 70	0 - 100	175-455
20ХГСА	1,6 – 7,0	0 - 100	250-420
30ХГСА	1,6 – 6,0	0 - 80	345-450
40ХГСА	<= 0,5	0 - 50	<= 380

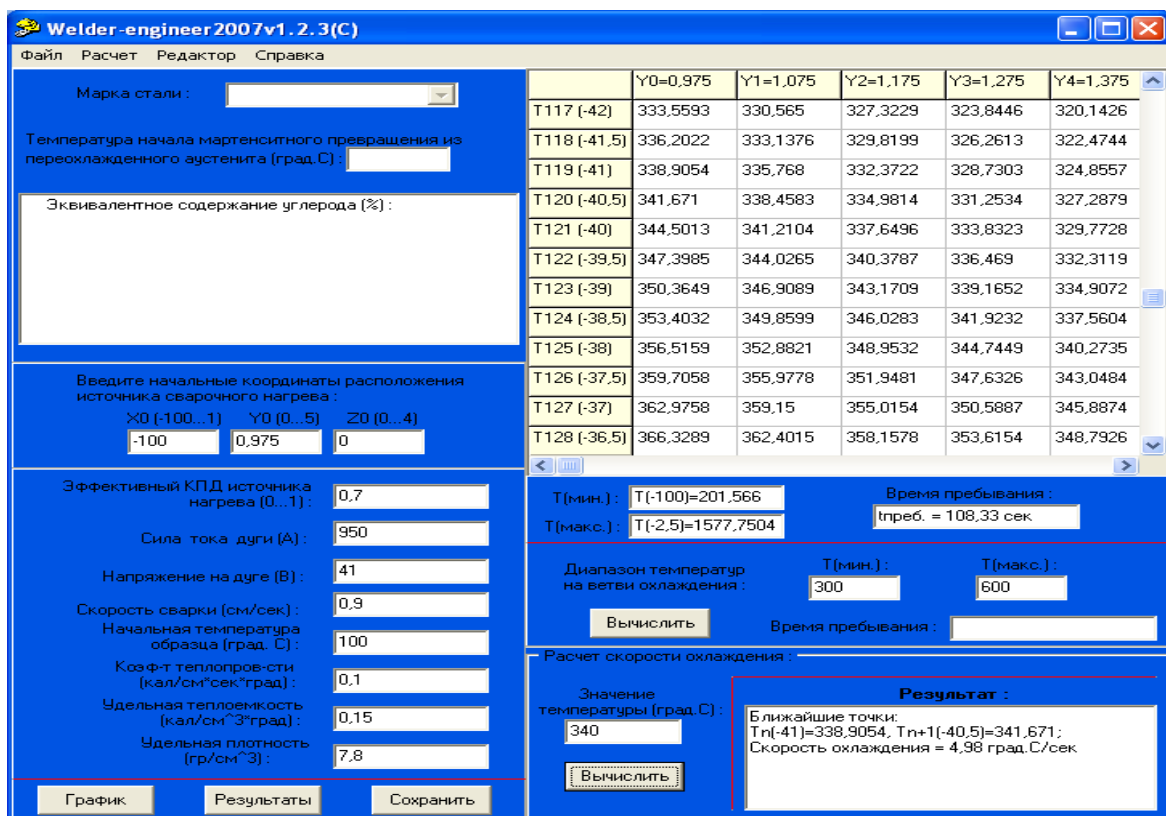


Рисунок 11 – Результаты расчета теплового поля при температуре подогрева свариваемых кромок  $T = 100^{\circ}\text{C}$  с вычисленной при  $T = 340^{\circ}\text{C}$  скоростью охлаждения  $V_{\text{охл}} = 4,98^{\circ}\text{C/с}$

### Порядок выполнения работы

- 1 Освоить работу с программой Welding.
- 2 Ввести параметры режима сварки и теплофизические свойства стали и выполнить расчет теплового поля вокруг дуги в подвижной системе координат в интервале изменения координат X от +1 до -100 см, Y от 0,01 до 5 см, Z от 0 до 4 см.
- 3 Анализируя тепловое поле определить координаты линии сплавления стали на поверхности свариваемых листов ( $Z=0$ ) с шагом по оси X вдоль шва 1 см и с шагом по оси Y=0,1 см (поперек шва) и построить график изотермы  $T = 1450^{\circ}\text{C}$ .
- 4 Вычислить по формуле (17) температуру  $T_n$  начала распада переохлажденного аустенита.
- 5 Ввести в программу температуру  $T_n$  и определить скорость охлаждения на линии сплавления.
- 6 При превышении  $V_{\text{охл}}$  оптимального интервала ввести температуру подогрева, добиваясь оптимальной  $V_{\text{охл}}$  для анализируемой стали.
- 7 Вычислить на линии сплавления длительность пребывания металла в заданном интервале температур, введя в соответствующие окна программы  $T_{\text{max}}$  и  $T_{\text{min}}$ .
- 8 Составить отчет по результатам анализа свариваемости, сохранив окно результата работы программы.

Сергей Иванович Казаков

## **ПРИКЛАДНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММЫ**

Методические указания  
к выполнению лабораторных работ  
для студентов специальности 150202.65 и направления 150700.62  
(профиль «Оборудование и технология сварочного производства»)

Редактор Е.А. Могутова

---

Подписано в печать 19.06.14	Формат 60x84 1/16	Бумага 65 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,5	Уч.-изд. л. 1,5
Заказ 193	Тираж 50	Не для продажи

---

РИЦ Курганского государственного университета.  
640000, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.