

Лабораторная работа №1 «Нестационарное охлаждение прямоугольного ребра»


Задание: Определить нестационарное температурное поле прямоугольного ребра в соответствии с заданным вариантом исходных данных:

VarZad :=	Cond	Cp	$\alpha \cdot Cp^{-1}$	$\nu := 1$
	1	2	3	
1	400	500	10	
2	500	500	10	
3	500	500	5	
4	400	250	7	
5	800	500	10	
6	800	500	5	
7	600	250	7	
8	$1 \cdot 10^3$	500	10	
9	$1 \cdot 10^3$	500	5	
10	450	300	5	
11	17	17	10	
12	600	400	5	
13	385	2.5	10	
14	0.8	0.8	25	
15	0.8	0.8	10	
16	17	170	5	
17	0.8	2.5	10	
18	0.8	2	10	
19	800	400	10	
20	800	250	10	
21	200	250	5	
22	1.5	0.8	15	
23	20	300	5	
24	1	100	2	
25	$1 \cdot 10^3$	500	1	

Исходными данными для Феникса являются: $Pr_L = \nu \cdot c_p \cdot \rho / \lambda$, c_p , ρ и $Coeff = \alpha / c_p$.

Здесь Pr_L - ламинарное число Прандтля, $\nu = \text{ENUL}$ - кинематическая вязкость, c_p - удельная изобарная теплоемкость, ρ - плотность, λ - коэффициент теплопроводности, α - конвективный коэффициент теплоотдачи).

Пошаговая инструкция для выполнения лабораторной работы № 1 в программе PHOENICS и MathCad

Phoenix запускается двойным щелчком на ярлычке , который находится на рабочем столе компьютера. Затем последовательно выполняем шаги, представленные на рис. 1.

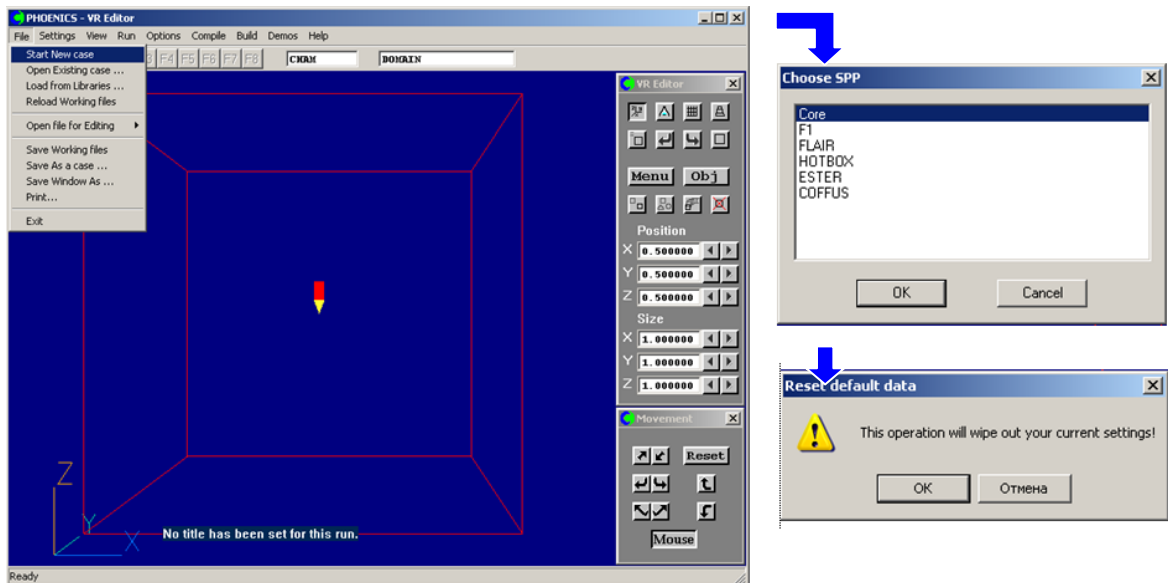


Рис. 1

Для решения задачи охлаждения прямоугольного ребра воспользуемся библиотечным примером, который имеется в вычислительном комплексе PHOENICS. Для этого используем подсказку, представленную на рис. 2.

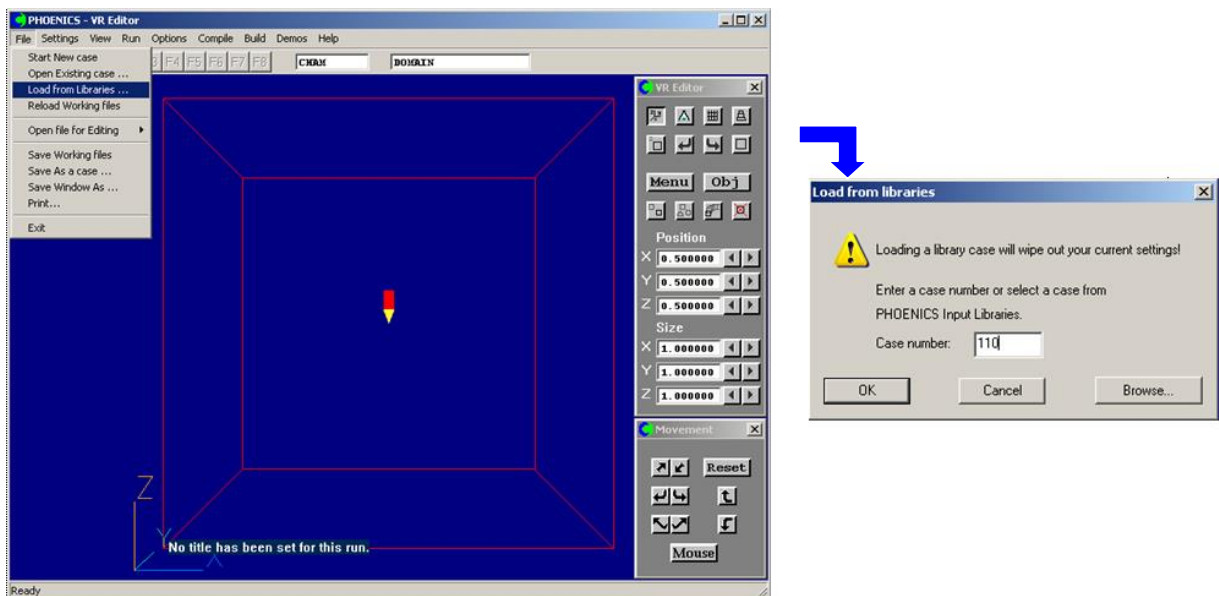


Рис. 2

После нажатия на кнопку «OK» на экране монитора появится окно *Sattelite Command Prompt*.

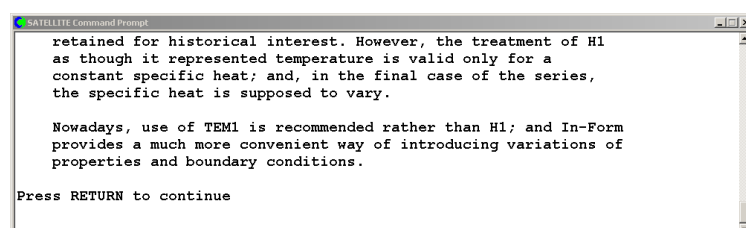


Рис. 3

Кнопка **Reset** служит для задания желаемого расположения ребра.

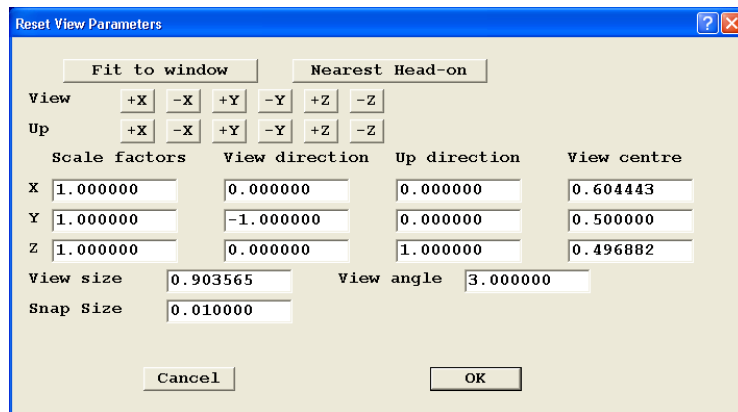


Рис. 7

На панели **VR Editor** щелкаем кнопку **Menu**. В результате на экране появляется панель **Domain Settings**

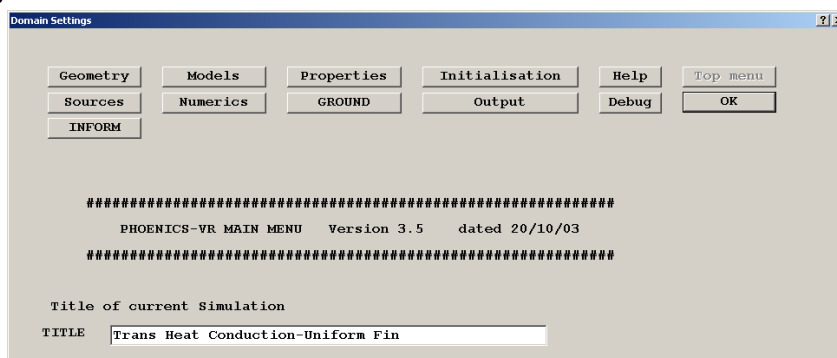


Рис. 8 - Меню главных установок

В поле «**TITLE**» в место фразы «*Trans Heat Conduction-Uniform Fi*» можно вести латинскими буквами номер лабораторной работы и Ф.И.О. её исполнителя. После щелчка по кнопке **Geometry** на экране монитора появляется окно «**Grid Mesh Settings**», которое используется для задания размеров расчётной области, количества ячеек сетки, точность и ещё ряд параметров связанных с выбором режима исследуемого процесса (стационарный или нестационарный) и используемую систему координат. Сравниваем информацию этого окна с данными представленными на рис. 9 и, если это необходимо, корректируем её.

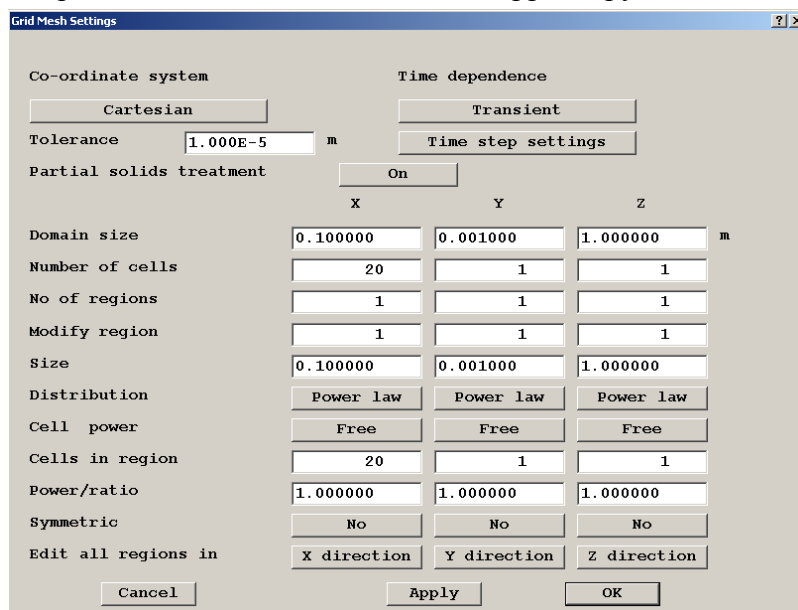


Рис. 9

Щелкаем по кнопке *Time step settings* и сравниваем данные появившейся панели с данными, представленными на рис. 10. При необходимости вносим корректуру.

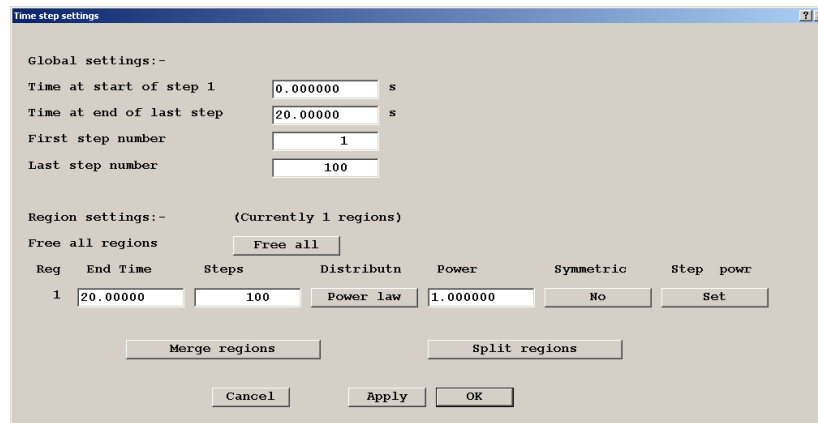


Рис. 10

Закрываем панели *Time step settings* и *Grid Mesh Settings* нажимая на кнопки «OK». Теперь щелкаем по кнопке *Models* панели *Domain Settings*. В результате эта панель принимает вид, представленный на рис. 11. Щелчком по кнопке OFF, расположенной в строке *Energy Equation*, открываем окно *Select energy formulation* и выбираем величину (*Temperature*), определяющую вид уравнения энергии для проведения численного расчета.

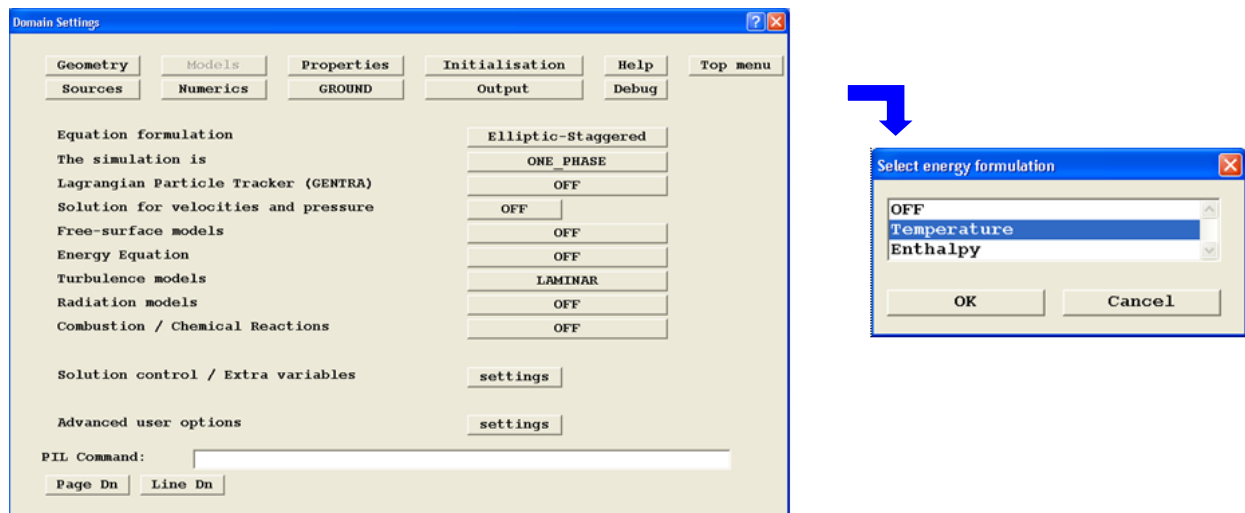


Рис. 11

После нажатия «OK» панель *Domain Settings* принимает вид, представленный на рис. 12.

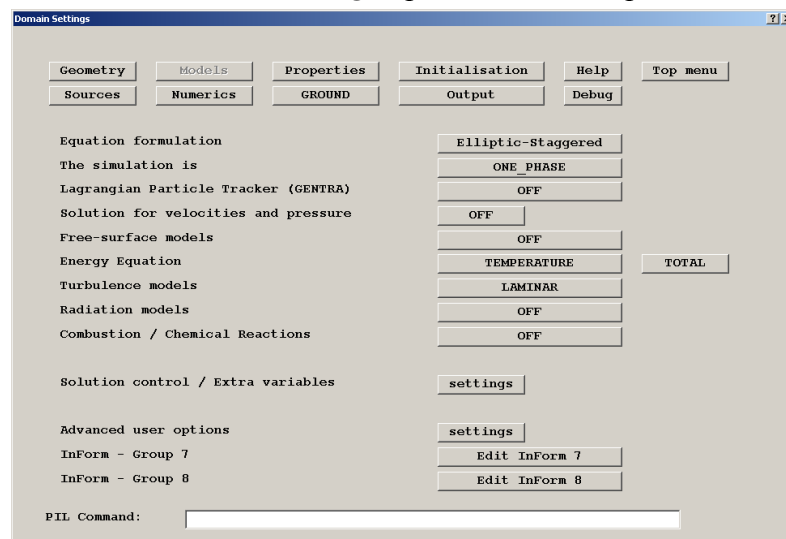


Рис. 12

Щелкаем кнопку *Properties* и проверяем соответствие свойств, представленных на панели *Domain Settings* с данными рис. 13. При необходимости вносим соответствующие исходным данным изменения.

Domain Settings

Geometry Models **Properties** Initialisation Help Top menu

Sources Numerics GROUND Output Debug

Use property tables OFF

Density CONSTANT RHO= 10000
Storage OFF

Viscosity CONSTANT ENUL= 1
Storage OFF

Specific heat CONSTANT CP= 500
Storage ON

Conductivity CONST_PRANDLT_NO Prl= 1
Storage OFF

Thermal expansion coefficient Beta= 0.000000

Reference pres (Pa) 0.000000 Reference temp (K) 0.000000

PIL Command: _____

Page Dn Line Dn

Рис. 13 а

Domain Settings

Reference pres (Pa) 0.000000 Reference temp (K) 0.000000

Advanced settings PIL InForm Edit InForm 9

PIL Command: _____

Page Up Line Up

Рис. 13 б

Domain Settings

Property Settings Previous panel

Phase 1 properties

RHO1	10000.00	DRH1DP	0.000000	ENUL	1.000000
TMP1	0.000000	CP1	500.0000		
DVO1DT	0.000000	TSURR	0.000000		
PRLH1A	0.000000	PRLH1B	0.000000	PRLH1C	0.000000

Variable	SPH1	TEM1	TEMP
PRNDTL	1.000000	1.000000	12500.00

PRNDTL(TEMP) = SPHTHENILRHO1/COND1
↓
C_v·ρ/λ

PIL Command: _____

Рис. 13 в

Жмем кнопку *Sources* на панели *Domain Settings* и сверяем её вид с рис. 14.

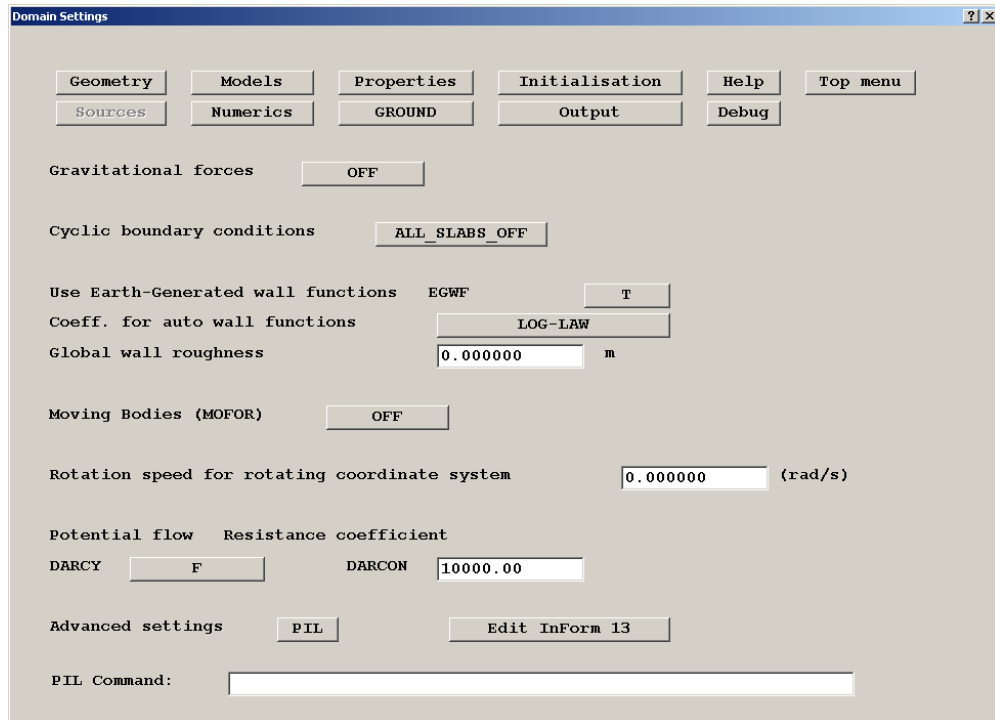


Рис. 14

Затем в строке *Advanced settings* щелкаем кнопку «*PIL*» и в поля под переменной *TEMP* вводим значение *Coefficient* и *Value*, определяемых как α/c_p и T_{air} , соответственно. Закрываем панель щелчком на кнопке *Previous panel*.

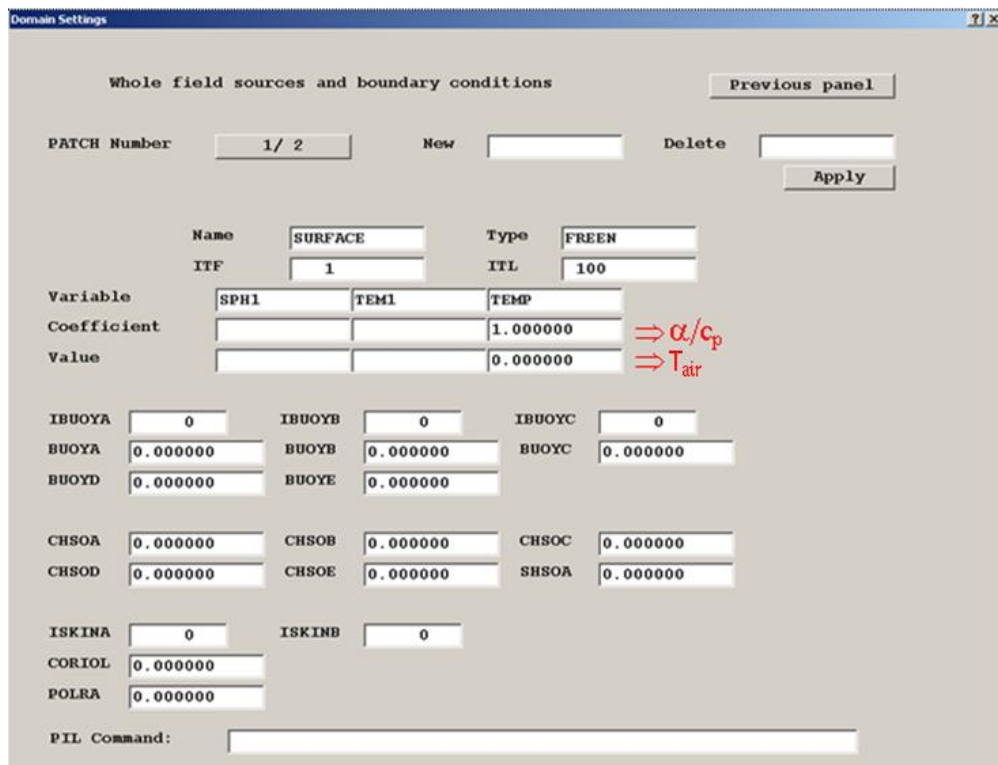


Рис.15

Жмем на кнопку *Numerics* панели *Domain Settings* и в поле *Total number of iterations* вводим 1.

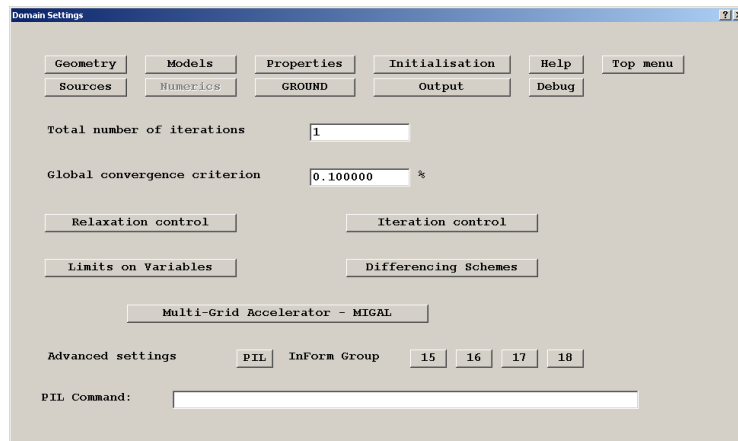


Рис. 16

Теперь щелкаем кнопку **Output** в панели **Domain Settings**, а затем кнопку **settings**, расположенную напротив строки **Field printout**.

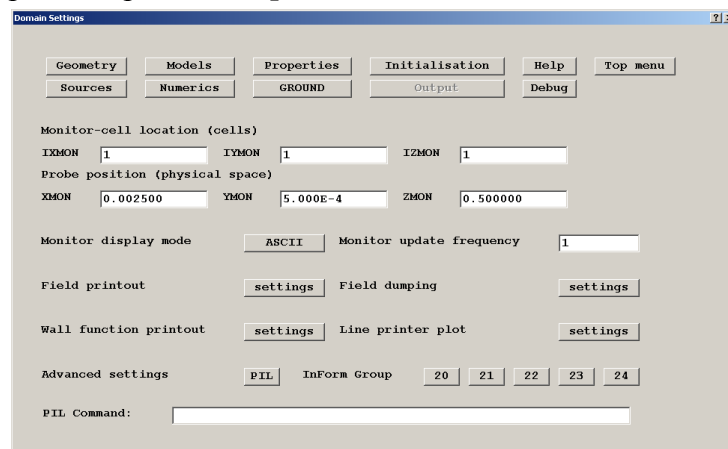


Рис. 17

Сверяем новый вид панели **Domain Settings** с её изображением на рис. 18 и вводим необходимые изменения. Жмем кнопку **Page Dn** и в окно **NT PRIN** вводим число 10 - длину временного шага для вывода в файл **result** распределения температуры в ребре. Затем щелкаем по кнопкам **Page Up** и **Previous panel** для возврата к предыдущему виду панели **Domain Settings**.

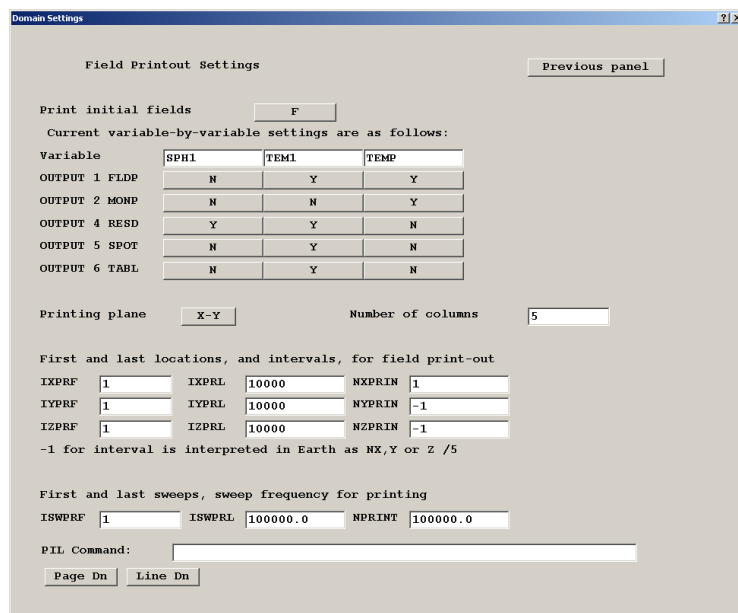


Рис. 18

Теперь щелкая кнопку *settings*, расположенную напротив строки *Field dumping*, введем в поля Last step и step frequency значения 100 и 1, соответственно.

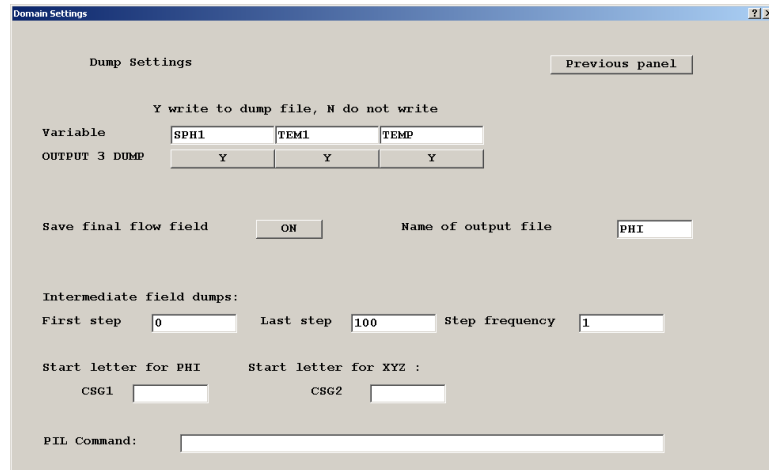


Рис. 19

Для возвращения к панели *Domain Settings* к прежнему виду жмем на кнопку *Previous panel*. Щелчком по кнопке Top menu и ОК закрываем панель *Domain Settings*.

Для запуска вычислительных процедур *PHOENICS* щелкаем по опции *Run* в линейке главного меню и в выпавшем меню выбираем строку *Solve* так, как это показано на рис. 20.

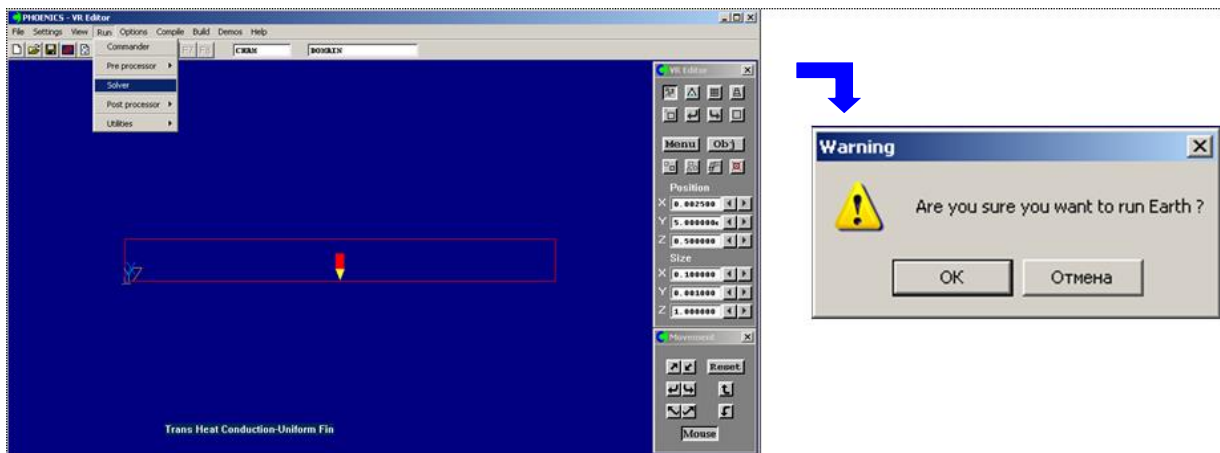


Рис. 20

Жмем *OK*, на панели *Warning*.

После завершения расчетов на экране опять появится панель PHOENICS VR-Editor. Для просмотра результатов расчета необходимо пройти путь, представленный на рис. 21.

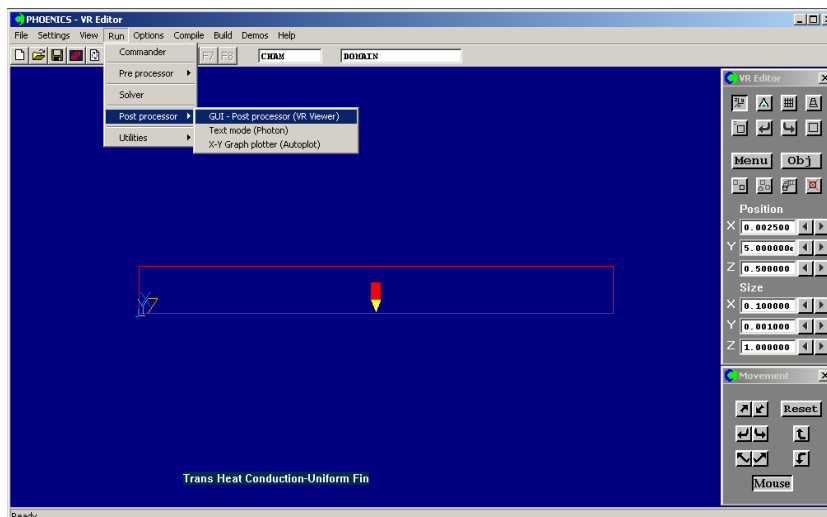


Рис. 21

В появившейся панели **File names** предлагается выбрать файл, содержащий результаты расчета на последнем временном шаге либо файл с информацией для каждого временного шага. В последнем случае в графической интерпретации результатов расчета временной осью будет ось Z.

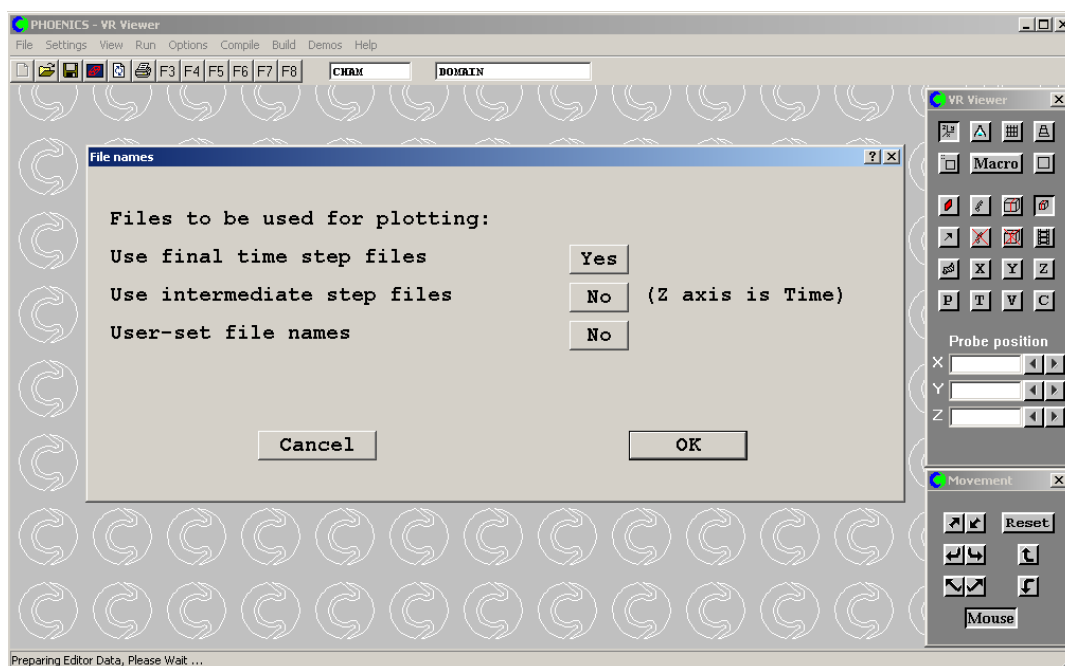


Рис. 22

После выбора одного из двух вариантов панель PHOENICS-VR Viewer принимает вид, представленный на рис. 23.

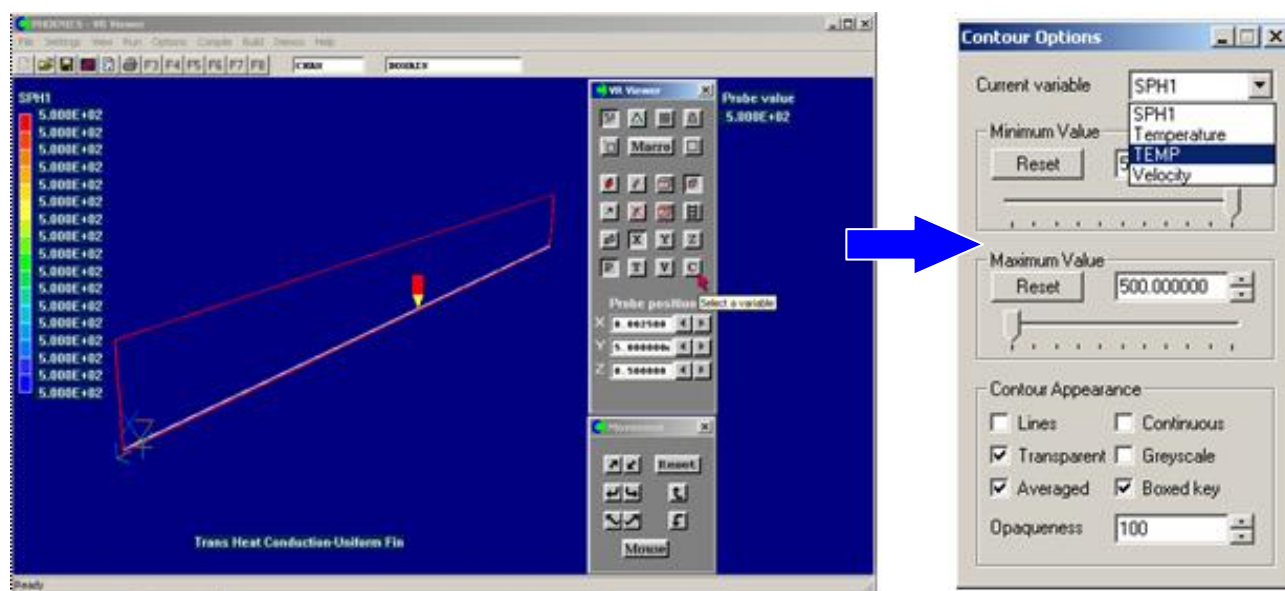


Рис. 23

Теперь необходимо в панели **VR Viewer** нажать кнопку «C», как это показано на рис. 23. В появившейся панели **Contour Options** надо открыть окно **Current variable** и в выпавшем меню выбрать строку **TEMP**, а затем закрыть эту панель.

Для визуализации результатов расчета необходимо нажать кнопки **Y** и **Probe** на панели **VR Viewer**. На рис. 24-25 представлен результат этих действий для двух разных вариантов обработки выходных данных численного моделирования.

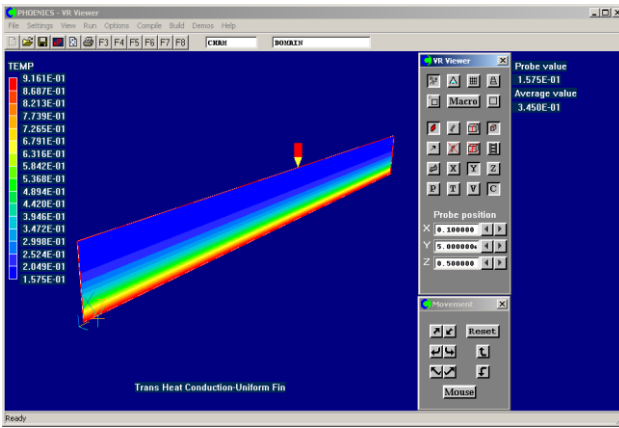


Рис. 24

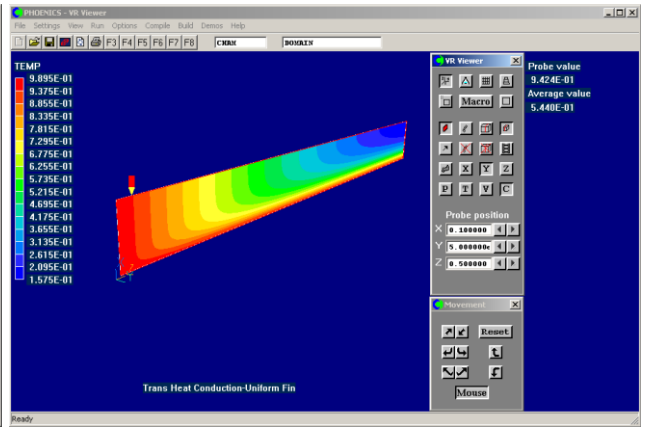


Рис. 25

Численные результаты выполненного расчета представлены в файле *result*. Что бы к нему перейти необходимо с начало выполнить действия, представленные на рис. 26, а затем совершить шаги, указанные на рис.27.

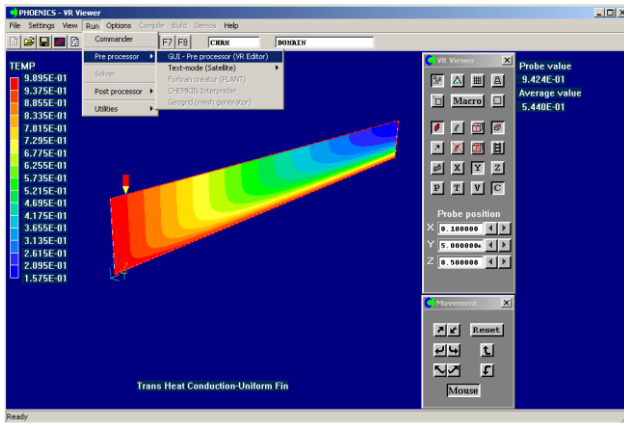


Рис. 26

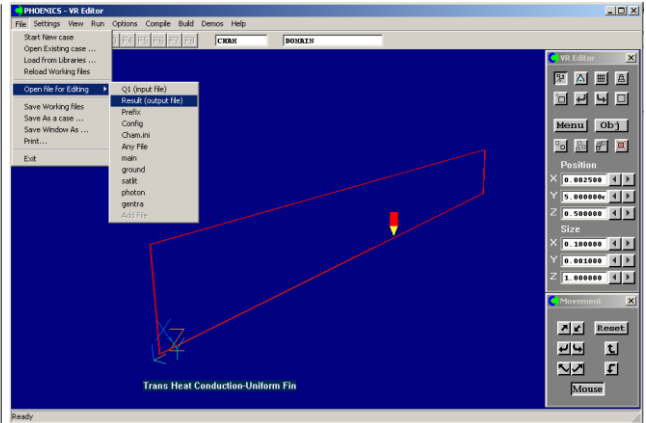


Рис. 27

На рис. 28 представлен фрагмент файла *result*.

```

result - Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
-----
      CCCC HHH      PHOENICS version 3.5.1 - EARTH
      CCCCCCCC     H      (C) Copyright 2003
      CCCCCCCC     see H      Concentration Heat and Momentum Ltd
      CCCCCCCC     our new H    All rights reserved.
      CCCCCCCC     Web-site H   Address: Bakery House, 40 High St
      CCCCCCCC     www.cham. H   Wimbledon, London, SW19 5AU
      CCCCCCCC     co.uk H     Tel:   : 0208-947-7651
      CCCCCCCC     H         Fax:    : 0208-879-3497
      CCCC HHH      E-mail:   : phoenics@cham.co.uk
-----
This program forms part of the PHOENICS installation for:
      CHAM
The code expiry date is the end of : may 2014
-----

Property-related data from gxprutil:
PRPS is not stored
material properties used are...
dens1m
visclm
temp1r
speht1
also, other related settings are ...
usegrx = T
usegrd = T
end of property-related data

Number of F-array locations available is      33600000
Number used before BFC allowance is          2238
Number used after BFC allowance is           2238
-----
Group 1. Run Title and Number
-----
TEXT(Trans Heat Conduction-Uniform Fin      )
-----
IRUNN =          1 ;LIBREF =          110
-----
Group 2. Time dependence
STEADY = F
* set overall time and no. of steps
  
```

Рис. 28

Обработка данных файла result в среде MathCad и сравнение результатов расчета с аналитическим решением

Запускаем **MathCad** и вводим в верхней части рабочей области листа следующий заголовок:


Обработка данных файла **result**, полученного входе моделирования охлаждения
прямоугольного ребра в программе PHOENICS

студент _____ Ф.И.О. _____ группа _____

Дальнейшие действия совершаются в следующей последовательности:

1. Считывание данных из файла result в MathCad.

1.1. Импорт координат центров ячеек.

Щёлкаем по пиктограмме , в появившемся окне выбираем опцию **Мастер импорта данных (Data Import Wizard)** и щелкаем кнопку **Далее >**. В новом окне щелкаем кнопку **Обзор...** и перемещаемся к папке, где находится файл **result**.

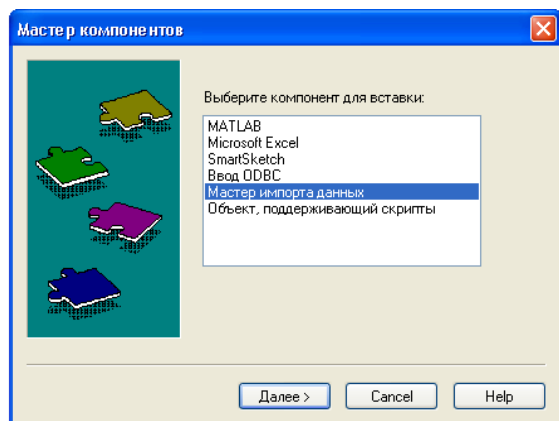


Рис. 29 – Окно «Мастер компонентов»

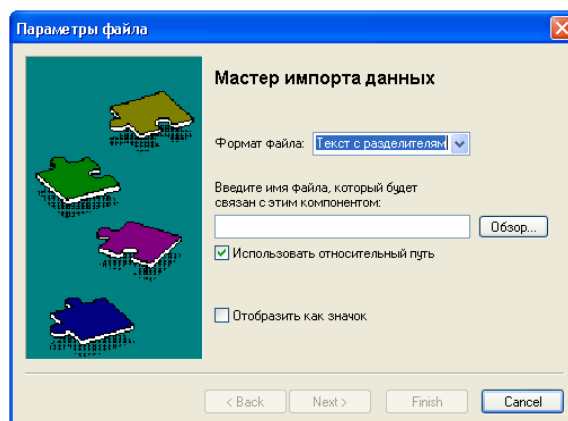


Рис. 30 – Окно «Параметры файла»

Чтобы увидеть этот файл нужно открыть окно **Files of type** так, как показано на рис.3 и выбрать строку **Все файлы (*.*)**. В окне появится группа файлов, содержащихся в Вашей рабочей папке. Выделите искомый файл и щелкните кнопку **Open**.

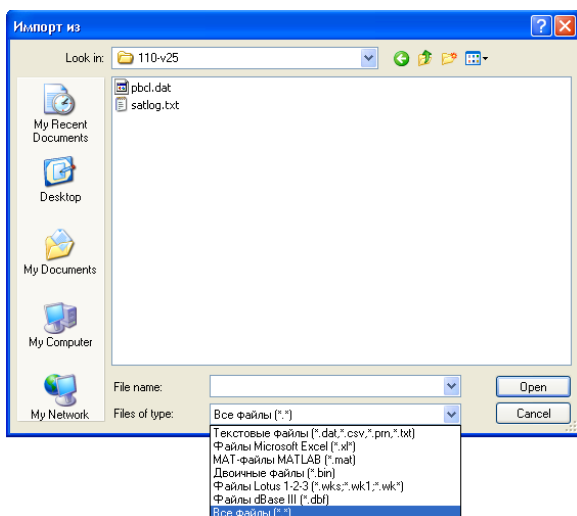


Рис. 31 – Окно «Импорт из» для *.txt и *.dat файлов

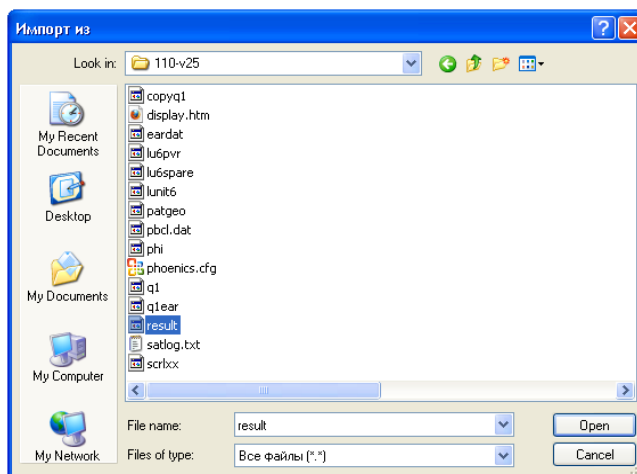


Рис. 32 – Окно «Импорт из» для *.* файлов

В появившемся окне **Параметры файла** щелкаем кнопку **Next >**. В окнах **Параметры текста с разделителями** и **Параметры текста** также давим на кнопку **Next >**.

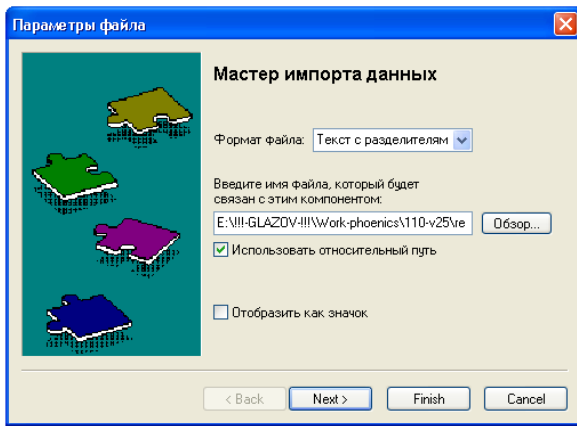


Рис. 33 – Окно «Параметры файла»

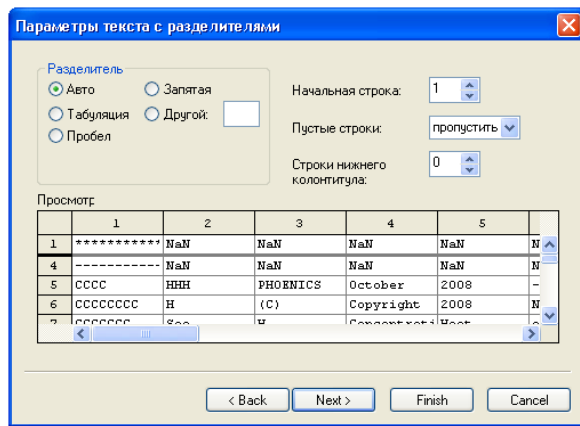


Рис. 34 – Окно «Параметры теста с разделителями»

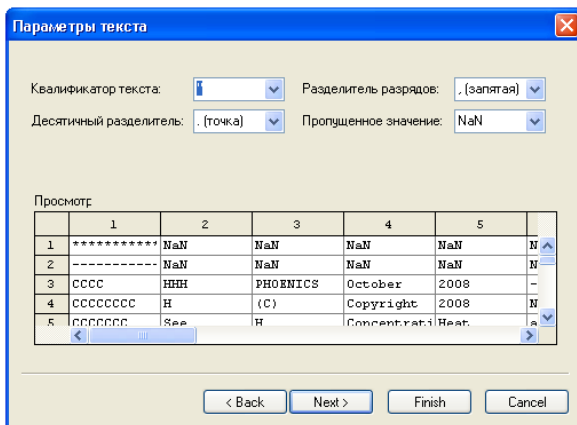


Рис. 35 – Окно «Параметры теста»

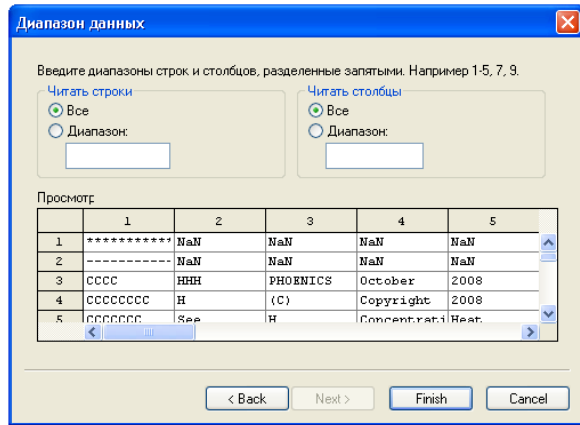


Рис. 36 – Окно «Диапазон данных»

В новом окне **Диапазон данных** находим **Group 24. Dumps For Restarts** и выделяем массив данных под строкой **X-coordinates of the (higher) cell faces** как показано на рис. 9 и щелкаем кнопку **Finish**.

В поле черного маркера, появившейся таблицы на рабочей странице **MathCad** (рис.10), вводим имя переменной X_{dat} . Для того чтобы нумерация строк и столбцов **MathCad** таблицы начиналась с 1, необходимо переменной **ORIGIN** задать значение 1. Для этого надо попасть на вкладку **Встроенные переменные** окна **Параметры документа**, которое открывается после щелчка на опции **Инструменты** главного меню или задать значение этой переменной в поле рабочего листа. Следует помнить, что **MathCad** читает слева на право и сверху вниз.

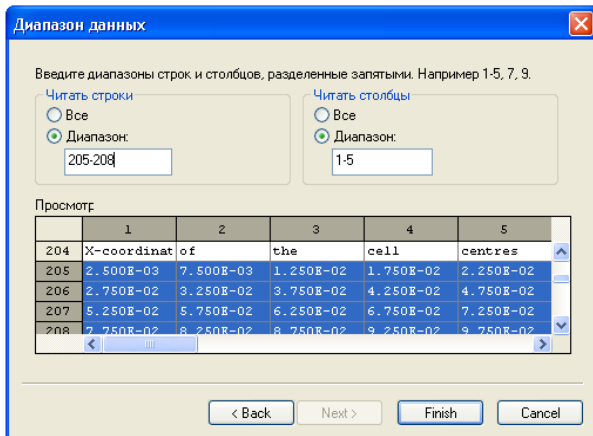



Рис. 37 – Окно «Диапазон данных» с выделенным массивом x - координат

$$X_{dat} :=$$

	1	2	3	4	5
1	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	0.013	0.018	0.023
2	0.028	0.033	0.038	0.043	0.048
3	0.053	0.058	0.063	0.068	0.073
4	0.078	0.083	0.088	0.093	0.098

Рис. 38 – Матрица импортированных данных

1.2. Импорт значений температур, соответствующих импортированным координатам центров ячеек.

Повторяем процедуру перевода данных из файла **result** в **MathCad** документ. Щёлкаем по пиктограмме , в появившемся окне выбираем опцию **Мастер импорта данных (Data Import Wizard)** и щелкаем кнопку **Далее >**. В новом окне щелкаем кнопку **Обзор...** и перемещаемся

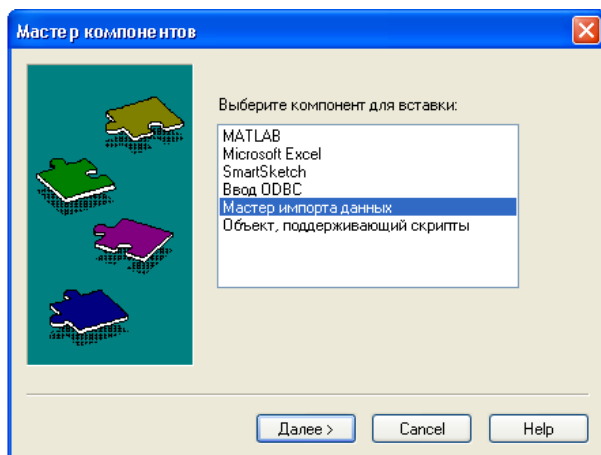


Рис. 39 – Окно «Мастер компонентов»

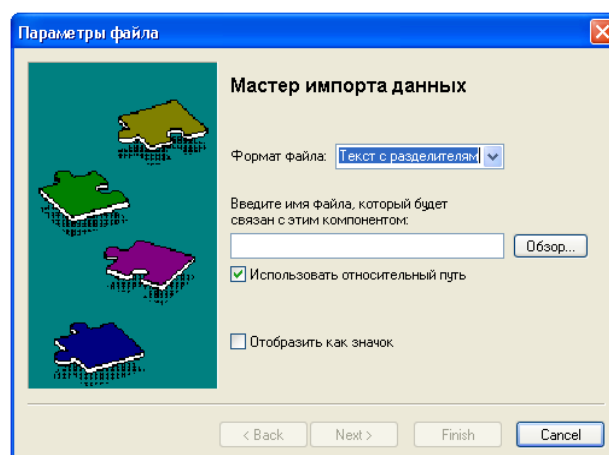


Рис. 40 – Окно «Параметры файла»

к папке, где находится файл **result**. Чтобы увидеть этот файл нужно открыть окно **Files of type** так, как показано на рис.13 и выбрать строку **Все файлы (*.*)**. В окне появится группа файлов, содержащихся в Вашей рабочей папке. Выделите искомый файл и щелкните кнопку **Открыть**.

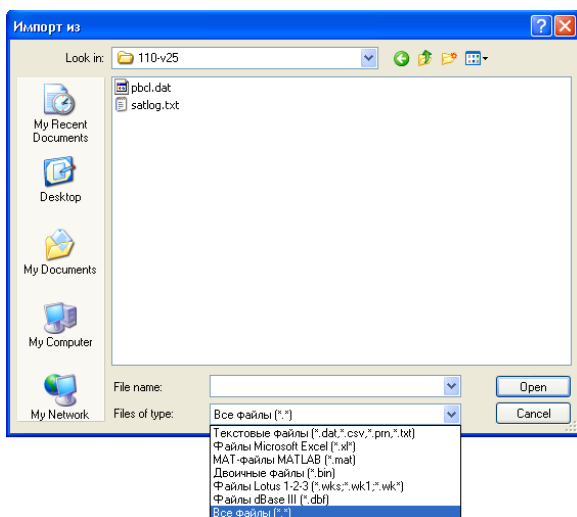


Рис. 41 – Окно «Импорт из» для *.txt и *.dat файлов

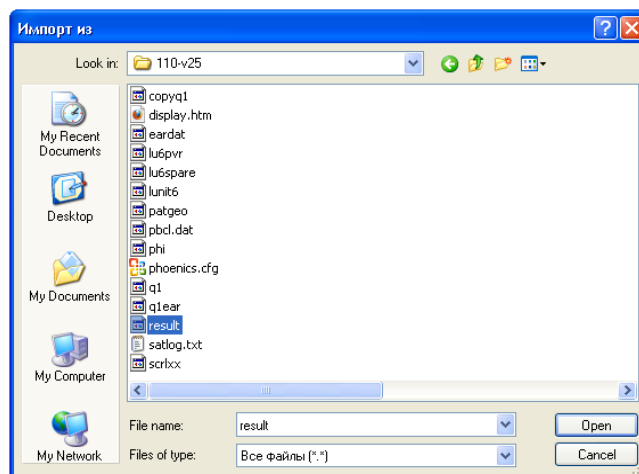


Рис. 42 – Окно «Импорт из» для *.* файлов

В появившемся окне **Параметры файла** щелкаем кнопку **Next >**. В окнах **Параметры текста с разделителями** и **Параметры текста** также давим на кнопку **Next >**.

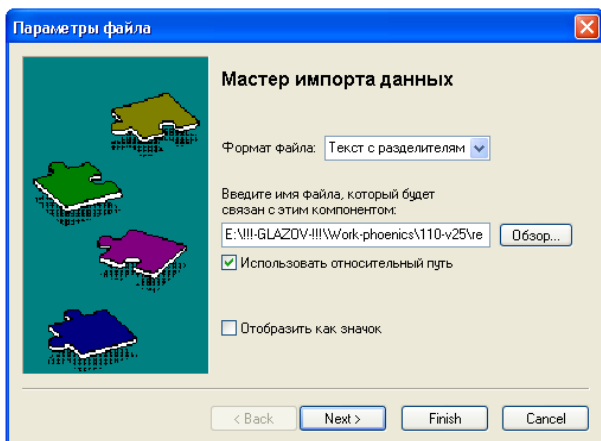


Рис. 43 – Окно «Параметры файла»

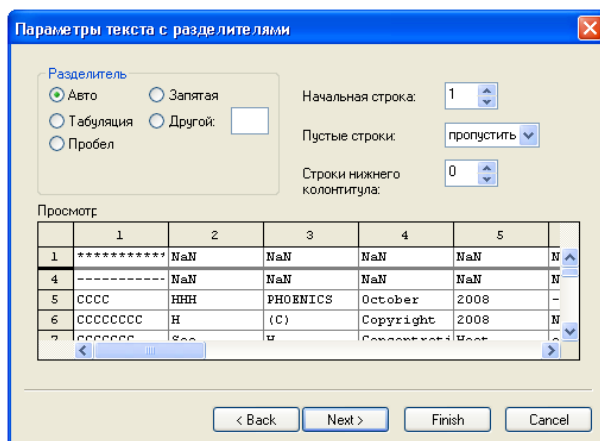


Рис. 44 – Окно «Параметры теста с разделителями»

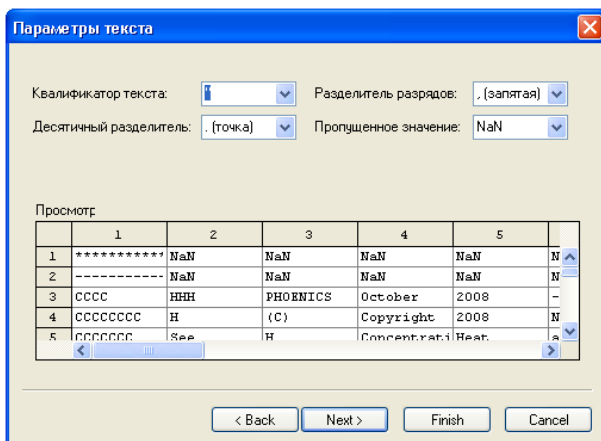


Рис. 45 – Окно «Параметры теста»

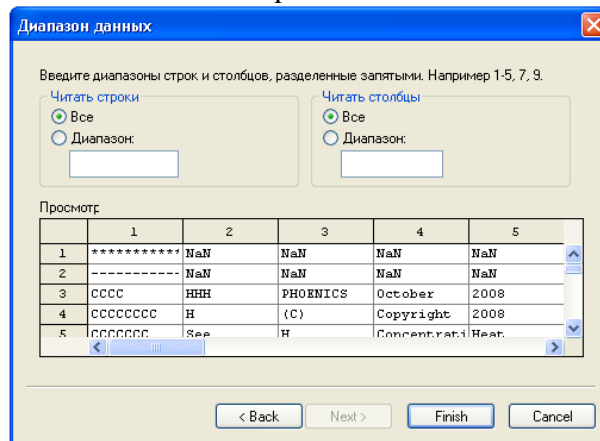


Рис. 46 – Окно «Диапазон данных»

В новом окне **Диапазон данных** находим строку, начинающуюся словами **TIME STP= 10**, и выделяем массив данных под строкой **Field Values of TEMP**, как показано на рис. 19 и щелкаем кнопку **Finish**.

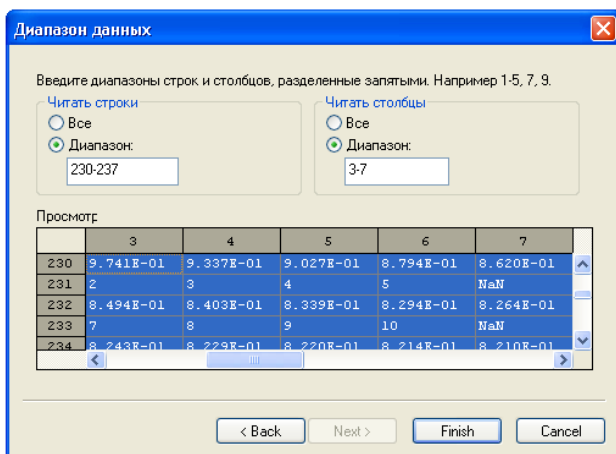


Рис. 47 – Окно «Диапазон данных» с выделенным массивом x - координат

TimeStep₁₀ :=

	1	2	3	4	5
1	0.974	0.934	0.903	0.879	0.862
2	2	3	4	5	NaN
3	0.849	0.84	0.834	0.829	0.826
4	7	8	9	10	NaN
5	0.824	0.823	0.822	0.821	0.821
6	12	13	14	15	NaN
7	0.821	0.821	0.821	0.821	0.82
8	17	18	19	20	NaN

Рис. 48 – Матрица импортированных данных

Аналогичные действия проводим при импортировании температур для временных шагов 20, 30, 40, 50 и 100.

2. Форматирование импортированных данных в среде MathCad.

2.1. Преобразование матриц импортированных данных в вектор-столбцы.

Для удобства обработки импортированных массивов данных преобразуем их в вектор-столбцы с помощью следующих функций:

$$x := \begin{cases} A \leftarrow \text{submatrix}(X_{\text{dat}}, 1, 1, 1, \text{cols}(X_{\text{dat}})) \\ \text{for } i \in 2.. \text{rows}(X_{\text{dat}}) \\ \quad A \leftarrow \text{augment}(A, \text{submatrix}(X_{\text{dat}}, i, i, 1, \text{cols}(X_{\text{dat}}))) \\ A^T \end{cases}$$

$$t(t_{\text{tab}}) := \begin{cases} A \leftarrow \text{submatrix}(t_{\text{tab}}, 1, 1, 1, \text{cols}(t_{\text{tab}})) \\ \text{for } i \in 2.. \text{rows}(t_{\text{tab}}) - 4 \\ \quad A \leftarrow \text{augment}(A, \text{submatrix}(t_{\text{tab}}, 2 \cdot i - 1, 2 \cdot i - 1, 1, \text{cols}(t_{\text{tab}}))) \\ A^T \end{cases}$$

2.2. Иллюстрация распределения температуры по высоте (вдоль координаты X) ребра в разные моменты времени.

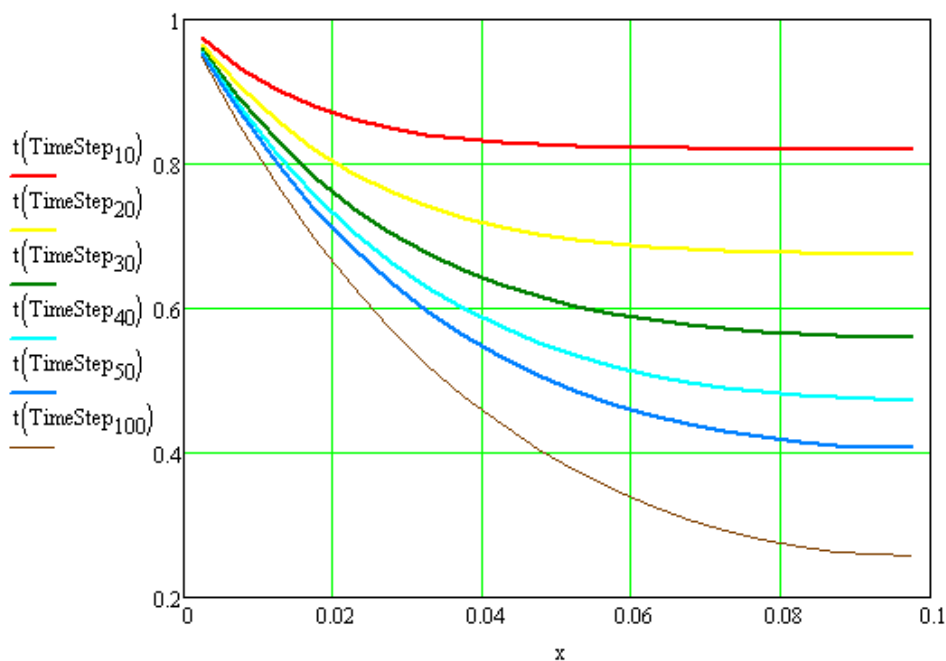


Рис. 49 - Распределение температуры по высоте ребра на 10, 20, 30, 40, 50 и 100 временном шаге

3. Сопоставительный анализ результатов численного моделирования в среде PHOENICS с аналитическим решением стационарного охлаждения прямоугольного ребра.

3.1. Математическая модель и аналитическое решение

Дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности для одиночного ребра:

$$d\theta(X)/dX = Bi \cdot \theta(X), \quad 0 < X < 1, \quad (1)$$

где $X = x/H$, $0 < x < H$, $\theta(X) = \frac{t(x) - t_e}{t_o - t_e}$, $Bi = \frac{\alpha \cdot \Pi \cdot H^2}{\lambda \cdot F}$, $F = \delta \cdot L$.

Граничные условия:

$$\theta(X)|_{x=0} = 0, \quad (2) \quad d\theta(X)/dX|_{x=1} = 0 \quad (3)$$

Решение:

$$\theta(X) = \frac{\cosh[(1-X) \cdot \sqrt{Bi}]}{\cosh[\sqrt{Bi}]} \quad (4) \quad Q_{pe\delta} = \sqrt{Bi} \cdot \frac{\lambda \cdot F}{H} \cdot (t_o - t_e) \cdot \tanh(\sqrt{Bi}) \quad (5)$$

Исходные данные, расчет и сравнение

Характеристика ребра	Обозначение	Величина	Размерность	Примечание
Номер варианта	-	25	-	-
Толщина	δ	0,001	м	по оси y
Высота	h	0,1	м	по оси x
Ширина	l	1	м	по оси z
Коэффициент теплопроводности	λ	400	Вт/(м·К)	-
Удельная теплоемкость	c_p	500	Дж/(кг·К)	-
Коэффициент теплоотдачи	α	500	Вт/(м ² ·К)	-
Температура основания	t_o	1	°C	-
Температура среды	t_b	0	°C	-

MathCad функция для определения распределения температуры по высоте ребра

$$t_{an}(x) := \begin{cases} \text{if } 0 \leq x \leq H \\ \chi \leftarrow \frac{x}{H} \\ Bi \leftarrow \frac{\alpha \cdot 2 \cdot (\delta + L) \cdot H^2}{\lambda \cdot L \cdot \delta} \\ \Theta \leftarrow t_b + (t_o - t_b) \cdot \frac{\cosh[\sqrt{Bi} \cdot (1 - \chi)]}{\cosh(\sqrt{Bi})} \\ \Theta \leftarrow \text{"Выход из ОДЗ"} \quad \text{otherwise} \end{cases}$$

Визуальное сравнение результатов расчета по PHOENICS и аналитическому решению

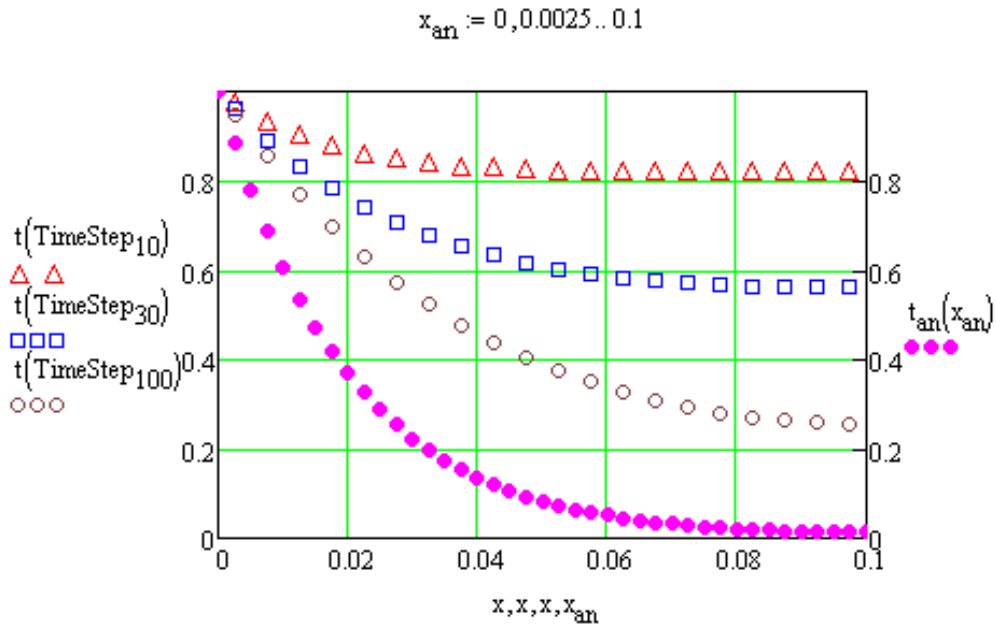


Рис. 50 – Распределение температуры по высоте ребра при численном и аналитическом моделировании соответственно нестационарного и стационарного процесса теплообмена

Видно, что двух секунд не достаточно чтобы нестационарное охлаждение ребра, моделируемого в программе PHOENICS, перешло к стационарному режиму.

4. Вывод.

В ходе выполнения лабораторной работы № 1 рассмотрены основные этапы численного моделирования в программе PHOENICS нестационарного процесса охлаждения прямоугольного ребра. Полученные результаты сопоставлены с известным аналитическим решением охлаждения ребра при стационарных условиях. Установлено, что нестационарный процесс охлаждения ребра имеет длительность более 2 секунд.

Примечание: Если за заданное время (2 сек) процесс охлаждения ребра успевает перейти в стадию стационарного охлаждения, то в выводе следует указать погрешность численного расчета на этом последнем этапе по сравнению с аналитическим решением.