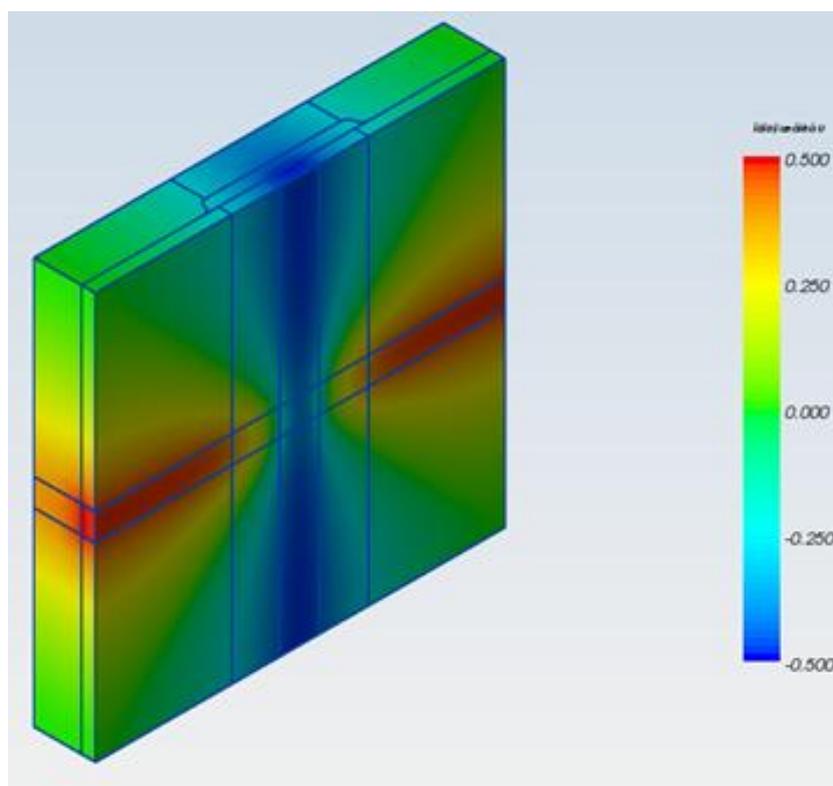


**Е.Б. Романова, С.К. Евстропьев,
А.Ю. Кузнецов**

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ В СИСТЕМЕ ELCUT

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Е.Б. Романова, С.К. Евстропьев,
А.Ю. Кузнецов**

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ В СИСТЕМЕ
ELCUT**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2016

Романова Е.Б., Евстропьев С.К., Кузнецов А.Ю. Практические задания в системе ELCUT. – СПб: Университет ИТМО, 2016. – 47 с.

В учебно-методическое пособие включены задачи: расчет на растяжение перфорированной пластины, расчет собственной емкости двухпроводной линии передачи, анализ распределения температуры в цилиндре, анализ распределения температуры в проводнике с током, расчет паразитной взаимной емкости. Пособие включает практические задачи, решение которых необходимо в ходе конструирования электронно-вычислительных средств.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств» по бакалаврской программе «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств» по дисциплине «Автоматизированное конструирование электронно-вычислительных средств».

Рекомендовано к печати Ученым советом мегафакультета КТиУ (протокол №9 от 15 ноября 2015 года).



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2016

© Е.Б. Романова, С.К. Евстропьев, А.Ю. Кузнецов, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСНОВЫ РАБОТЫ В ELCUT	5
1.1. Назначение пакета ELCUT и обзор основных типов задач	5
1.2. Создание задач.....	6
1.3. Создание геометрических объектов.....	7
1.4. Технология дискретизации области.....	8
2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ	11
2.1. Растяжение перфорированной пластины	11
2.2. Собственная емкость двухпроводной линии передачи.....	18
2.3. Распределение температуры в цилиндре.....	25
2.4. Распределение температуры в проводнике с током	29
2.5. Паразитная взаимная емкость	35
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	45

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизированное конструирование электронно-вычислительных средств включает этап инженерного анализа в системах САЕ (Computer-aided engineering – программных продуктов, предназначенных для решения различных инженерных задач). Практические задания, описанные в данном пособии, охватывают ряд задач, решаемых конструктором при проектировании электронно-вычислительных средств. В пособии рассмотрено 5 задач: расчет на растяжение перфорированной пластины, расчет собственной емкости двухпроводной линии передачи, анализ распределения температуры в цилиндре, анализ распределения температуры в проводнике с током, расчет паразитной взаимной емкости.

Выполнение практических работ предполагает закрепление теоретических знаний и получение практических навыков по дисциплине «Автоматизированное конструирование электронно-вычислительных средств». При этом студент должен показать навыки обобщения материала в форме выводов.

Цель решения задач состоит в овладении студентом методики решения инженерных задач в САЕ-системах. А также студент должен освоить методы анализа автоматизированных решений и получить навыки формулирования выводов по результатам решений. Практическая ориентация задач заключается в следующем: расчет на растяжение перфорированной пластины применяется при проектировании корпусов, стоек, рам и т.п. конструкций; расчет собственной емкости двухпроводной линии передачи используется в схемотехническом моделировании; анализ распределения температуры в цилиндре применяется при конструировании цилиндрических изделий, внутрь которых могут быть установлены печатные платы, навесные проводники и т.д; анализ распределения температуры в проводнике с током используется при анализе тепловых режимов навесных проводников; расчет паразитной взаимной емкости применяется при анализе целостности сигналов печатных плат. Задачи, представленные в данном пособии, применяются при выполнении научно-исследовательских, опытно-конструкторских и выпускных квалификационных работ.

Задания предназначены как для самоконтроля студентов по теоретическому курсу, так и для проведения преподавателем текущего контроля знаний студентов.

1. ОСНОВЫ РАБОТЫ В ELCUT

1.1. Назначение пакета ELCUT и обзор основных типов задач

ELCUT – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов [1]. Редактор модели позволяет достаточно быстро создать модель исследуемых объектов. Кроме того, фрагменты модели можно импортировать из системы AutoCAD или других систем проектирования. Результаты расчета можно просматривать в различных формах представления: линии поля, цветные карты, графики различных величин вдоль произвольных контуров и пр. Можно вычислять различные интегральные величины на заданных пользователем линиях, поверхностях или объемах. Постпроцессор обеспечивает вывод таблиц и рисунков в файлы для дальнейшей обработки или качественной графической печати.

ELCUT позволяет решать плоские и осесимметричные задачи по следующим темам:

- Электростатика;
- Электрическое поле переменных токов в неидеальном диэлектрике;
- Растекание токов в проводящей среде;
- Линейная и нелинейная магнитостатика;
- Магнитное поле переменных токов (с учетом вихревых токов);
- Нестационарное магнитное поле;
- Линейная и нелинейная, стационарная и нестационарная теплопередача;
- Линейный анализ напряженно-деформированного состояния;
- Связанные задачи.

С помощью ELCUT пользователь, имеющий определенные навыки, может в течение достаточно короткого времени описать задачу – ее геометрию, свойства сред, источники поля, граничные и другие условия, решить ее с высокой точностью и проанализировать решение с помощью средств цветной графики. С помощью ELCUT решаются двумерные краевые задачи математической физики, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной (потенциальной) или однокомпонентной векторной функции. Рассматриваются плоские (плоскопараллельные) и осесимметричные классы двумерных задач. В плоскопараллельной постановке обычно используют декартову систему координат x, y, z , причем предполагается, что геометрия расчетных областей, свойства сред и параметры, характеризующие источники поля, неизменны в направлении оси z . Вследствие этого описание геометрии, задание свойств, граничных условий и источников, а также обработку результатов можно проводить в плоскости x, y , называемой плоскостью модели. Принято, что ось x направлена слева направо, а ось y – снизу вверх. Вместо декартовой может

быть использована и полярная система координат. Осесимметричные задачи решаются в цилиндрической системе координат $z\theta r$, порядок следования осей выбран по аналогии с плоскопараллельными задачами. Физические свойства и источники поля предполагаются не зависящими от угловой координаты. Работа с моделью проводится в плоскости zr (точнее в полуплоскости $r \geq 0$). Ось вращения z направлена слева направо, ось r - снизу вверх. Для применения пакета ELCUT его нужно установить на персональный компьютер. Пакет ELCUT в студенческом варианте распространяется бесплатно. Его можно скачать на сайте производителя: <http://www.tor.ru/elcut/> .

1.2. Создание задач

Вначале необходимо создать новое пустое описание задачи, для этого надо выбрать позицию Создать из меню Файл и затем указать Задача ELCUT в списке предлагаемых типов документов [2]. Затем ввести имя задачи и указать путь к папке, в которой будут храниться файлы задачи. Затем выбрать параметры новой задачи: тип анализа, класс симметрии, точность решения, единицы измерения длины и др. Можно также создать новую задачу как копию одной из задач, открытых в данный момент в ELCUT. В этом случае вновь создаваемая задача унаследует все свойства задачи-образца, а файлы модели и свойств будут скопированы.

Открытие существующего документа осуществляется посредством команды Открыть из меню Файл или можно перетащить файл в окно ELCUT из Проводника Windows. Открытая задача отображается в окне описания задачи, которое расположено слева от главного окна ELCUT. В окне описания задачи можно задавать параметры задачи, такие как свойства материалов, источники поля и граничные условия. Дерево задачи показывает также имена файлов, на которые ссылается описание задачи. Ветви дерева «Физические свойства» и «Библиотека свойств» содержат списки меток, присвоенных блокам, вершинам и ребрам модели при двумерном моделировании, либо списки меток тел, граней, ребер и вершин модели при трехмерном моделировании.

Изменение свойств задачи или имен файлов осуществляется посредством команды Свойства задачи в меню Задача или в контекстном меню (которое вызывается правой кнопкой мыши).

Переход к работе с документом, на который ссылается описание задачи (геометрическая модель или другая задача – источник данных), осуществляется двойным щелчком на имени файла в дереве, или выбором команды Открыть в контекстном меню, или выбором соответствующего пункта в меню Задача.

Решение задачи осуществляется посредством команды Решить задачу в меню Задача или в контекстном меню.

Просмотр результата решения осуществляется выбором пункта Анализ результатов в меню Задача или в контекстном меню.

1.3. Создание геометрических объектов

При описании геометрии модели сначала создаются вершины и ребра, ограничивающие блоки с различными физическими свойствами. Для корректировки положения и формы объектов используются операции перемещения и копирования. Для выполнения операции над несколькими объектами одновременно, эти объекты перед операцией нужно выделить. Свойства сред, источники и граничные условия задаются путем привязывания меток, имеющих соответствующие свойства, к геометрическим объектам. Сетку конечных элементов можно создавать автоматически. При этом, с учетом размеров геометрических объектов, будет построена гладкая сетка с плавным переходом от мелких элементов к более крупным. Для этого не требуется вводить какую-либо информацию. Вместо автоматического построения сетки можно регулировать размеры конечных элементов сетки вручную. Для этого нужно указать шаги дискретизации в одной или нескольких вершинах. Значения шагов дискретизации в остальных вершинах будут автоматически построены так, чтобы получить достаточно гладкую сетку.

Создание нового ребра включает следующие действия:

1. Выбрать команду Режим вставки в меню Правка или команду Вставка вершин/ребер в контекстном меню (правая кнопка мыши), либо нажать кнопку на панели инструментов Вставлять вершины и ребра или клавишу INS, чтобы перейти в режим вставки.
2. Указать раствор нового ребра в окне Раствор дуги инструментальной панели. Выбрать одно из значений, находящихся в выпадающем списке или ввести новое значение. Для создания прямолинейного ребра выбрать нулевой угол.
3. В начальной точке создаваемого ребра: либо нажать левую кнопку мыши и, не отпуская ее, перетащить указатель мыши к конечной точке, либо нажать клавишу SHIFT и, не отпуская ее, передвинуть указатель к конечной точке с помощью клавиш со СТРЕЛКАМИ. Если один или оба конца нового ребра не совпадают с уже существующими вершинами, недостающие вершины будут автоматически добавлены к модели перед созданием ребра. Если не выключать включенный по умолчанию режим привязки к решетке, новые вершины будут создаваться только в узлах координатной решетки. При перемещении указателя с помощью клавиатуры использование клавиши CTRL позволяет позиционировать его точнее.

Создание новой вершины включает следующие действия:

1. Выбрать команду Режим вставки из меню Правка или команду Вставка вершин/ребер из контекстного меню, либо нажать клавишу INS или кнопку Вставлять вершины и ребра на панели инструментов, чтобы перейти в режим вставки.
2. Убедиться, что текущие параметры сетки привязки подходят для ввода координат создаваемых вершин.
3. Используя мышь или клавиши со СТРЕЛКАМИ, передвинуть указатель в точку, где нужно создать новую вершину, и нажать левую кнопку мыши или клавишу ENTER.

Или:

1. Выбрать команду Добавить вершины из меню Правка.
2. Ввести координаты новой вершины и нажать кнопку Добавить. Повторять до тех пор, пока не будут введены координаты всех добавляемых вершин.
3. Нажать кнопку Закрыть.

Дистанция притяжения. Чтобы избежать неразличимых зазоров при описании геометрии, новые вершины или ребра не могут быть созданы слишком близко от существующих вершин и ребер. Создание новых геометрических объектов контролируется величиной, которую обозначают ϵ и называют дистанцией притяжения.

При создании новых вершин и ребер действуют следующие правила:

- Создание новой вершины возможно на расстоянии не менее 2ϵ от существующей вершины.
- Новое ребро не может быть добавлено в геометрическую модель, если оно объединяет те же вершины, что и существующее ребро, и расстояние между этими ребрами не превосходит ϵ .
- Если расстояние между новой вершиной и существующим ребром не превосходит ϵ , вершина проектируется на ребро, автоматически разбивая его на две части. Аналогично, при добавлении нового ребра, проходящего на расстоянии не более ϵ от существующей вершины, к модели добавляются два ребра, соединяющихся в этой вершине.

Дистанция притяжения пропорциональна размеру видимой части модели, поэтому, чтобы при создании особенно мелких объектов избежать притягивания различных вершин и ребер друг к другу, нужно предварительно увеличить масштаб изображения.

1.4. Технология дискретизации области

После описания геометрии области или ее части можно приступить к построению конечно-элементной сетки. Можно построить весьма густую сетку в одних областях и редкую в других, поскольку метод геометрической декомпозиции обеспечивает плавный переход от

маленьких элементов к более крупным. Стоит отметить, что вместо ручного управления густотой сетки в областях со значительным изменением поля, можно воспользоваться адаптивным улучшением сетки. Густота сетки непосредственно влияет на точность решения в тех или иных частях расчетной области. Сетка должна быть особенно густой в местах сильной неоднородности поля, а также в тех местах расчетной области, где требуется получить наивысшую точность. При решении задач с несложной геометрией области и для прикидочных расчетов сетка может быть полностью построена в автоматическом режиме. Для этого надо выбрать команду Построить сетку из меню Правка или контекстного меню, и подходящая сетка конечных элементов будет построена без дополнительной настройки. Однако, в некоторых случаях качество построенной автоматически сетки может оказаться неудовлетворительным. В таких случаях ELCUT позволяет управлять густотой сетки вручную, задавая шаги дискретизации в определенных вершинах модели. Шаг дискретизации определяет примерное расстояние между соседними узлами сетки, находящимися в окрестности данной вершины. Нет необходимости задавать шаги во всех вершинах модели. Для получения равномерной сетки во всей области достаточно задать шаг дискретизации в одной вершине. Это значение автоматически распространится на все остальные вершины. Если необходима неравномерная сетка, то надо задать шаги в тех вершинах, где требуемая точность минимальна и максимальна. В этом случае шаги в остальных вершинах автоматически интерполируются вдоль сторон и внутрь блоков таким образом, чтобы обеспечить наиболее плавное изменение размеров ячеек в сетке. Чтобы задать одинаковые шаги дискретизации в нескольких вершинах сразу, надо выделить эти вершины перед тем, как изменять шаги. После задания шагов дискретизации можно приступить к построению сетки и после этого переходить к решению задачи. Зачастую приходится менять густоту уже построенной сетки, например, если по результатам расчета оказалось, что в каком-нибудь месте необходима большая точность. При изменении шагов дискретизации необходимо помнить о следующих правилах:

- сетка удаляется автоматически из блоков, примыкающих к вершинам, где изменяется шаг;
- вдоль границ тех блоков, в которых сетка не удаляется, шаги дискретизации не будут подвергнуты автоматическому пересчету, как если бы они были заданы вручную. Поэтому для кардинального изменения густоты сетки сначала надо удалить ее из всех блоков модели.

Чтобы задать густоту сетки необходимо:

1. Выделить вершины, ребра или блоки, по соседству с которыми требуется установить одинаковое значение шага дискретизации.
2. Выбрать команду Свойства из меню Правка или контекстного меню.

3. Ввести значение шага и нажать ОК.

Если при задании шага дискретизации выделены ребра или блоки, выбранный шаг устанавливается во всех вершинах, расположенных на этих ребрах или границах этих блоков.

Чтобы построить сетку конечных элементов, надо выполнить одно из следующих действий:

- Выбрать подходящий вариант из подменю команды Построить сетку меню Правка или контекстного меню. Сетка будет построена в блоках, соответствующих выбранному варианту подменю.

- Нажать кнопку Построить сетку на панели инструментов модели. В этом случае, часть модели, в которой будет построена сетка, определяется следующим образом:

- все выделенные блоки, если такие есть;
- иначе, все помеченные блоки, если такие есть;
- иначе, все блоки модели.

Чтобы удалить сетку надо выполнить одно из следующих действий:

- 1) Выбрать подходящий вариант из подменю команды Удалить сетку меню Правка или контекстного меню. Из блоков, соответствующих выбранному варианту, сетка будет удалена.

- 2) Нажать кнопку Удалить сетку на панели инструментов модели. В этом случае, сетка будет удалена из всех выделенных блоков или из всех блоков модели, если выделенных блоков нет.

Меню Вид содержит четыре переключателя: Сетка конечных элементов, Декомпозиция области, Дискретизация ребер и Шаги дискретизации (влияющие на степень видимости дискретизации). Если все они выключены, модель изображается без дискретизации. Этот режим удобен при описании модели и расстановке меток. Если включен переключатель Шаги дискретизации, то все заданные вручную шаги дискретизации изображаются в виде окружностей соответствующего радиуса с центрами в соответствующих вершинах. В режиме Дискретизация ребер разбиение сторон изображается штриховыми метками. Одновременное использование двух последних режимов особенно удобно при расстановке шагов дискретизации. Включение переключателя Сетка конечных элементов позволяет наблюдать за процессом построения сетки, в результате которого на экране появляется полностью построенная сетка треугольников. Включение переключателя Декомпозиция области при выключенном переключателе Сетка конечных элементов показывает подобласти, получаемые в результате процесса геометрической декомпозиции.

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

2.1. Растяжение перфорированной пластины

Исходные данные: тонкая прямоугольная пластина с круглым отверстием посередине нагружена растягивающим усилием [3]. Тип задачи: расчет плоско-напряженного состояния. Геометрия пластины представлена на Рис. 1. Все размеры на рисунке в миллиметрах. Размеры, усилие и материал пластины см. в Табл. 1 (по вариантам). Толщина пластины в примере 5 мм. Для плоско-параллельной модели толщина указывается в направлении оси z (за плоскость экрана), при создании задачи – это параметр L_z . Модуль Юнга, в примере для стали: $E = 207000 \text{ Н/мм}^2$. Коэффициент Пуассона, в примере для стали: $\nu = 0.3$. Равномерное растягивающее усилие, в примере $Fr = 40 \text{ Н/мм}^2$ приложено к нижней стороне пластины.

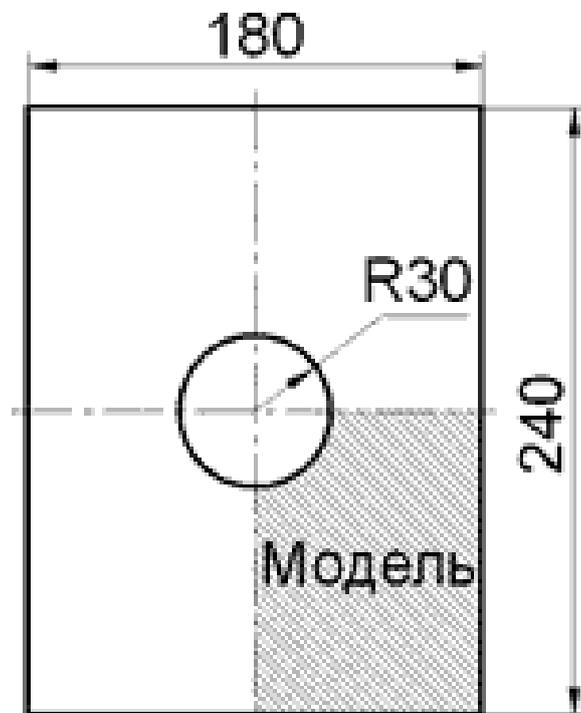


Рис. 1. Геометрия пластины

Задача: рассчитать коэффициент концентрации напряжения, обусловленный центральным отверстием.

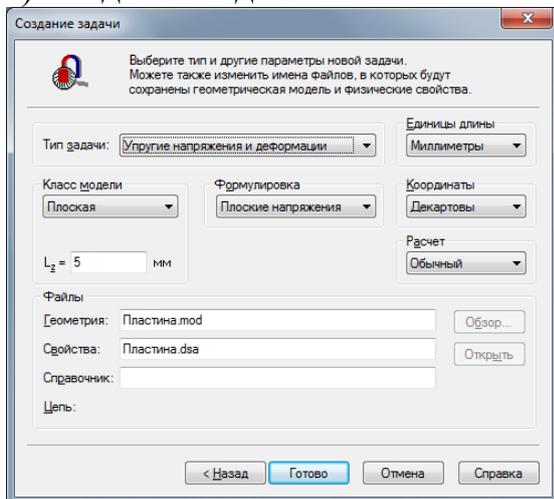
Решение: поскольку задача полностью симметрична относительно осей x и y , в модели представлена только нижняя правая четверть пластины. Отсутствующие части пластины замещены граничными условиями закрепления границ разреза. Коэффициент концентрации напряжений можно вычислить исходя из приложенной нагрузки Fr и максимального рассчитанного напряжения σ_{\max} : $k = \sigma_{\max} / Fr$.

Табл. 1 – Данные для расчета коэффициента концентрации напряжения

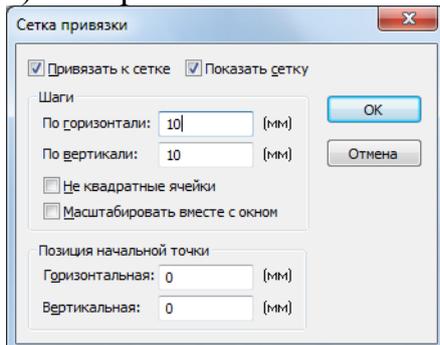
№ вар	Толщина пластины L_z , мм	Длина пластины, мм	Ширина пластины, мм	Радиус отверстия мм	Материал пластины	Растягивающее усилие F_r , Н/мм ²
1	4	230	170	20	Алюминий	35
2	6	250	190	40	FR-4	45
3	3	220	160	20	Алюминий	30
4	7	260	200	40	FR-4	55
5	4	210	170	20	Алюминий	25
6	6	270	190	40	FR-4	55
7	3	200	160	20	Алюминий	35
8	7	280	200	40	FR-4	45
9	4	190	170	20	Алюминий	30
10	6	290	190	40	FR-4	55
11	3	180	160	20	Алюминий	25
12	7	300	200	40	FR-4	55

Последовательность выполнения практического задания №1.

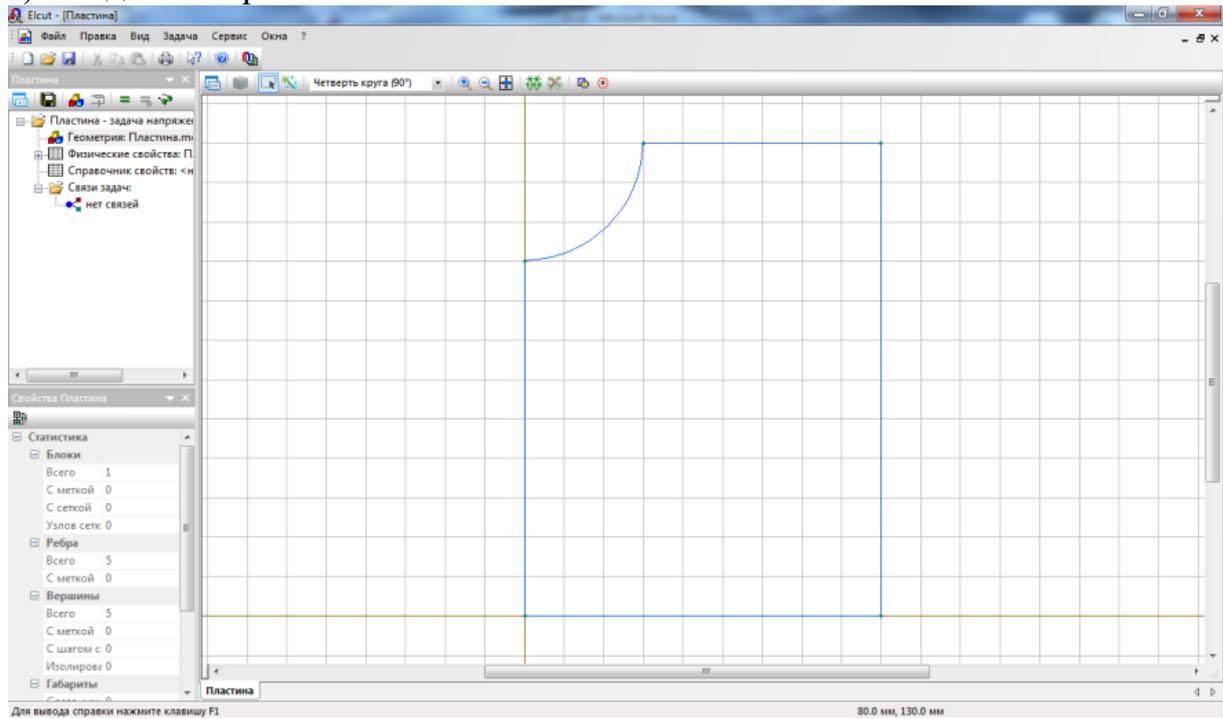
1) Создание задачи:



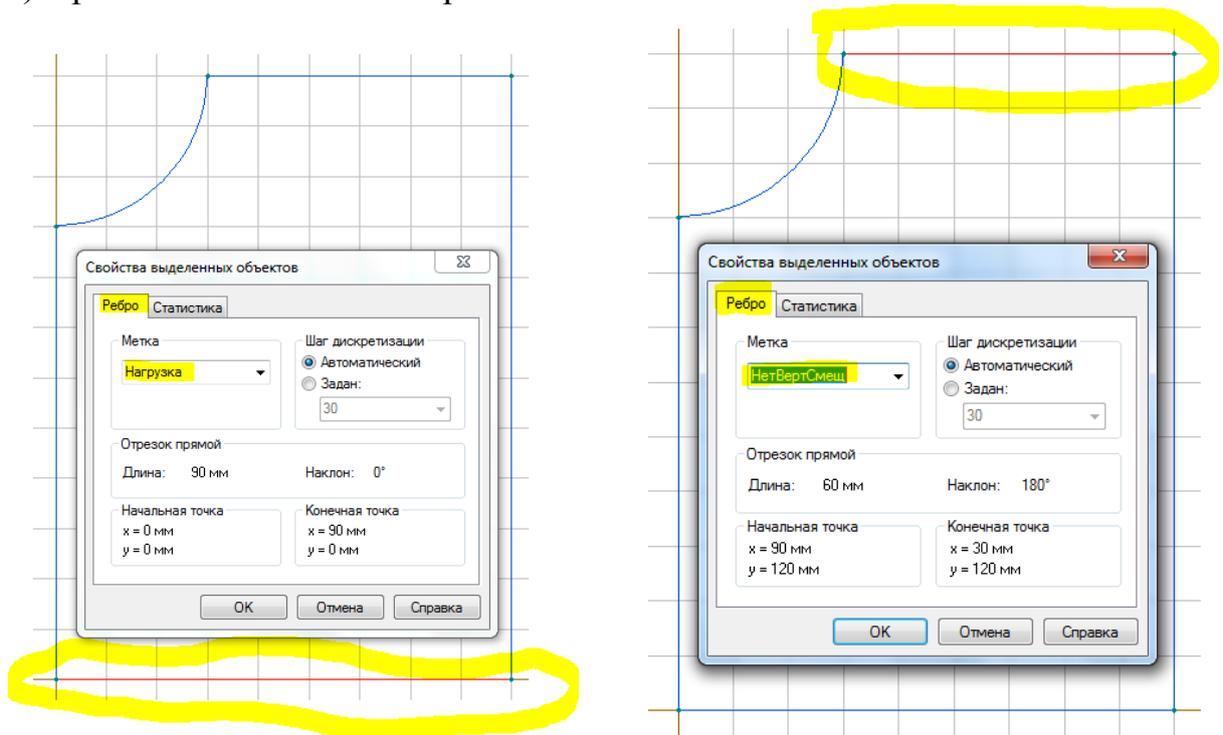
2) Настройка сетки:

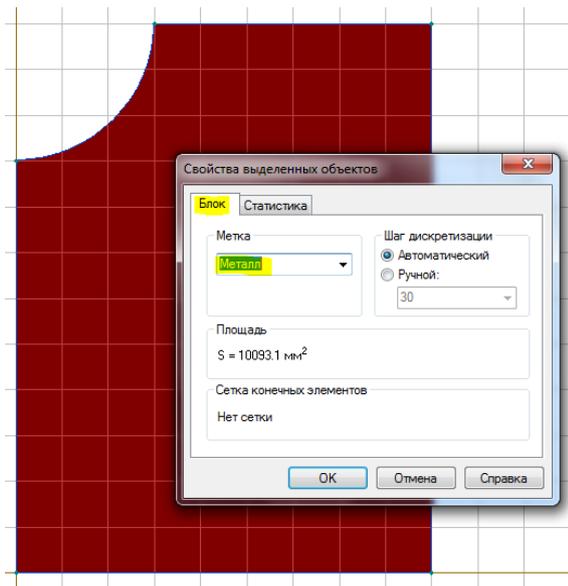
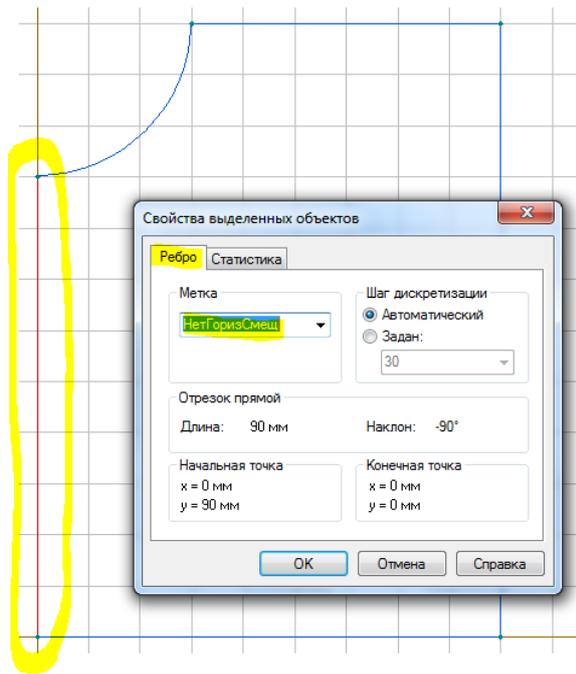


3) Ввод геометрических объектов:

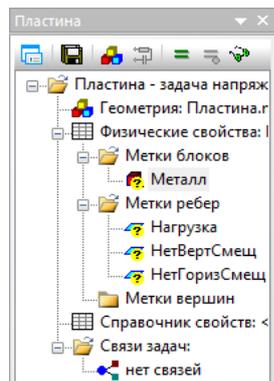


4) Привязка меток к геометрическим объектам:

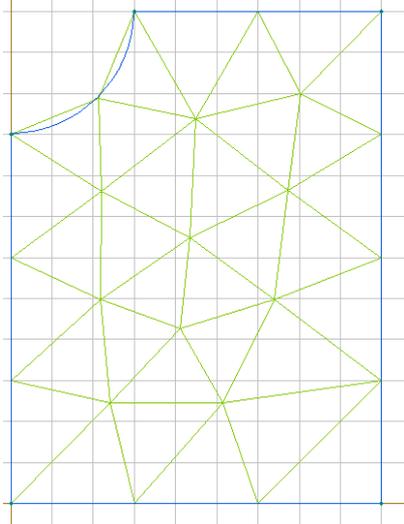




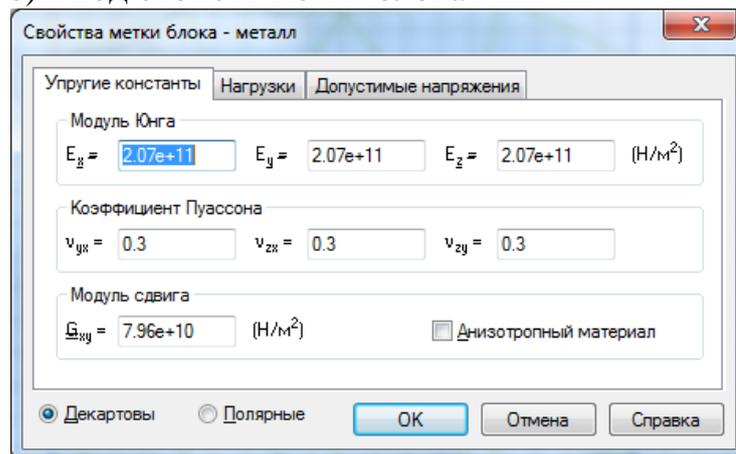
В результате в Окне описания задачи в категории Физические свойства появятся ветви с вопросительными знаками



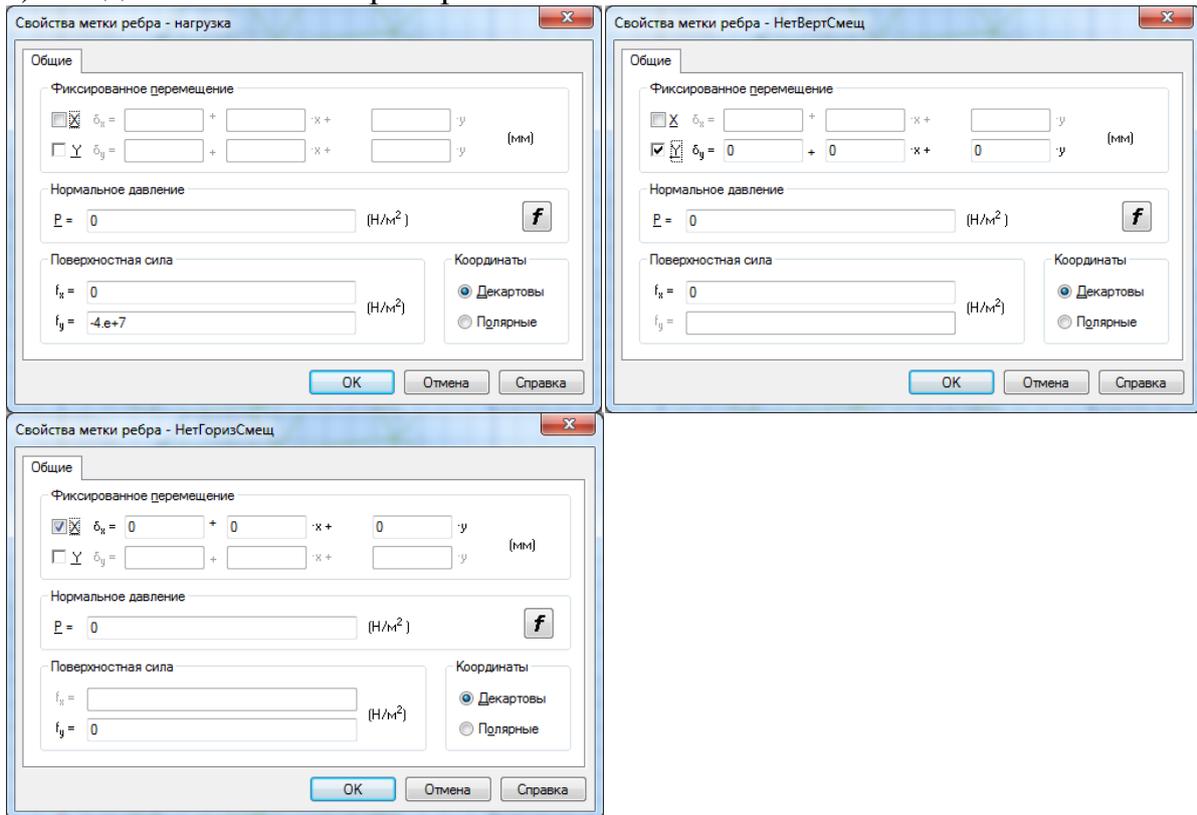
5) Создание сетки:



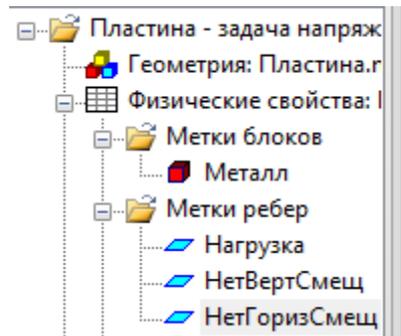
6) Ввод свойств метки блока



7) Ввод свойств меток ребер:



В результате в Окне описания задачи в категории Физические свойства вопросительные знаки исчезнут



8) Запуск анализа. Результаты расчета представлены на Рис. 2

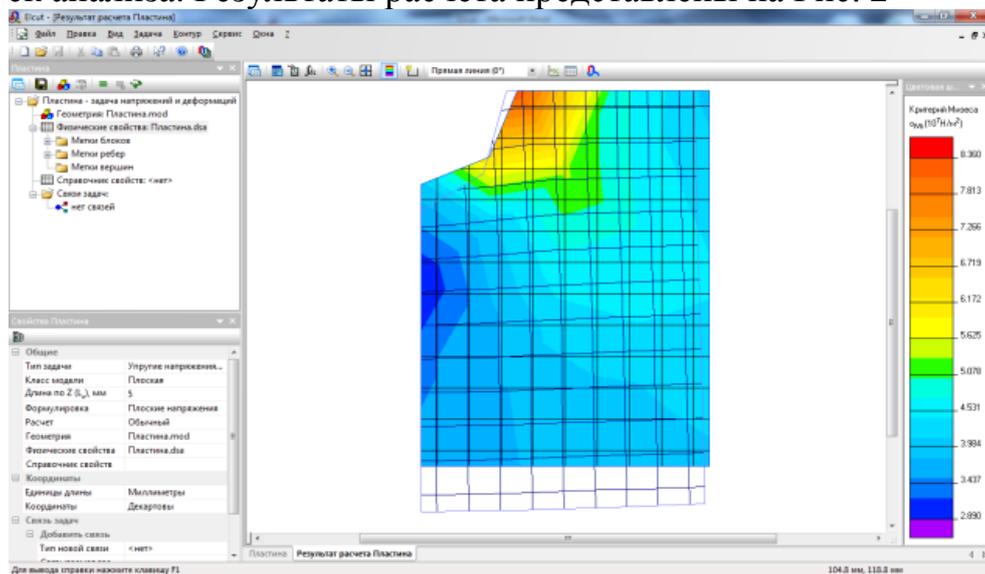


Рис. 2. Результат расчета четверти перфорированной пластины

9) Определение локальных значений для $x=40$ мм и $y=90$ мм. Данные внести в отчет.

10) Добавление контура, повторяющего исходную фигуру. Начать прорисовку контура надо с точки, в которой максимальное напряжение (начальная точка показана на Рис. 4), затем двигаться по часовой стрелке (см. Рис. 3), указывая координаты вершин (см. стрелки на рисунке, - они обведены черным маркером; красной линией показан ориентировочный контур). Вывести на экран все значения, рассчитанные интегральным калькулятором (скриншот значений с рисунком необходимо добавить в отчет).

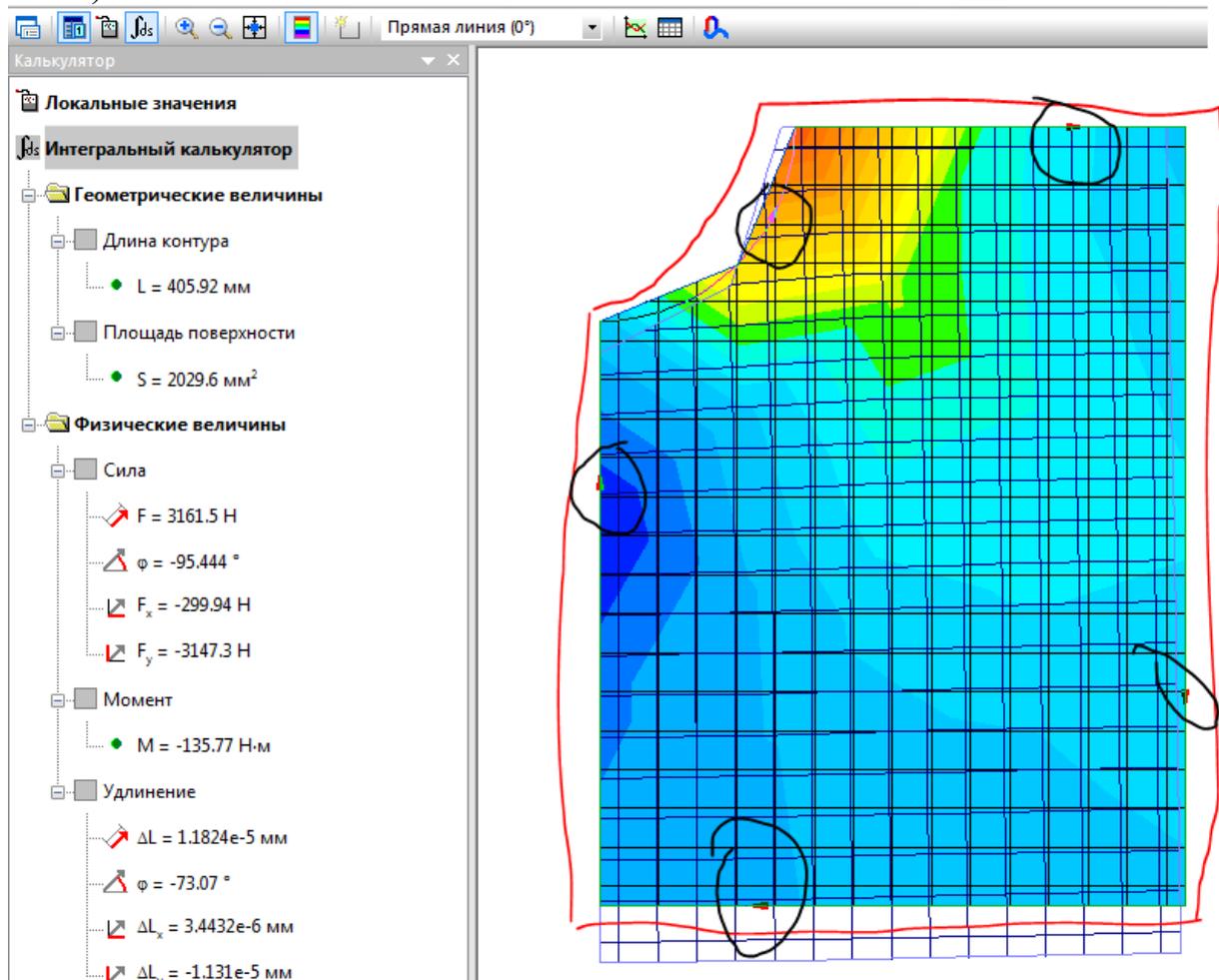


Рис. 3. Контур пластины

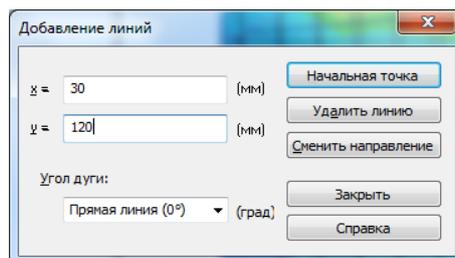
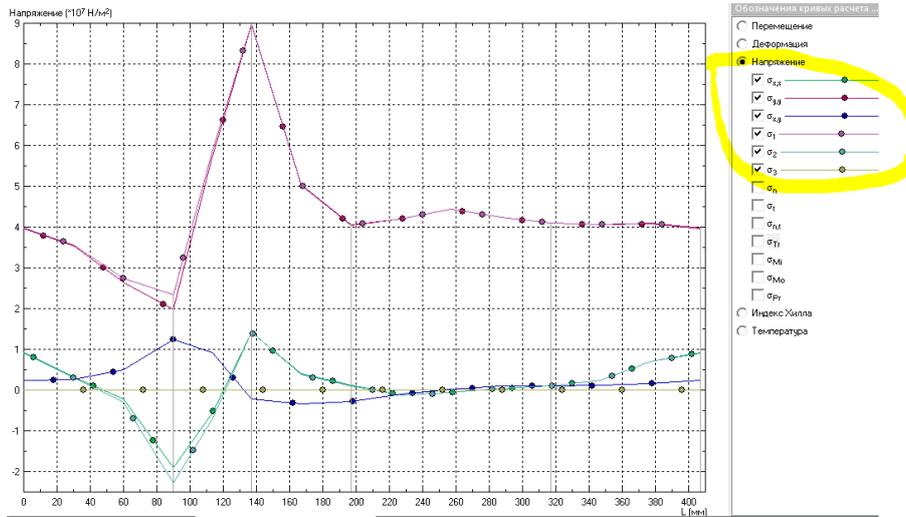
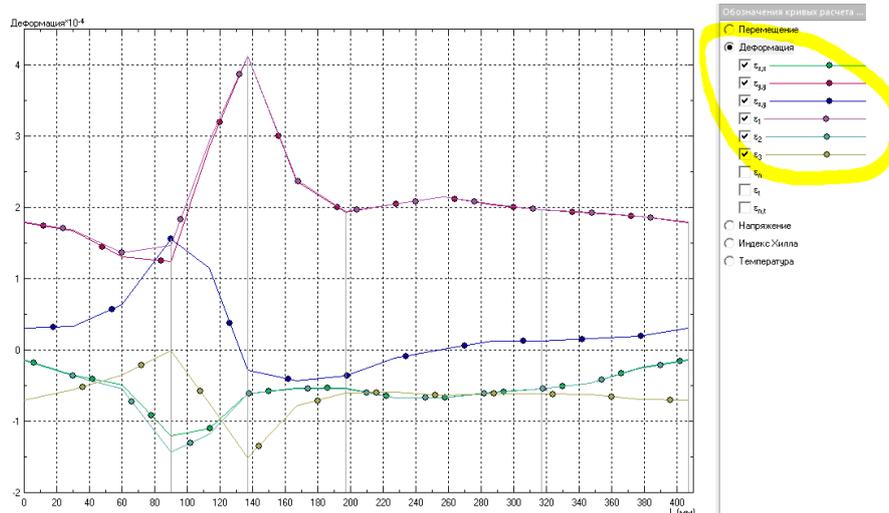


Рис. 4. Начальная точка контура

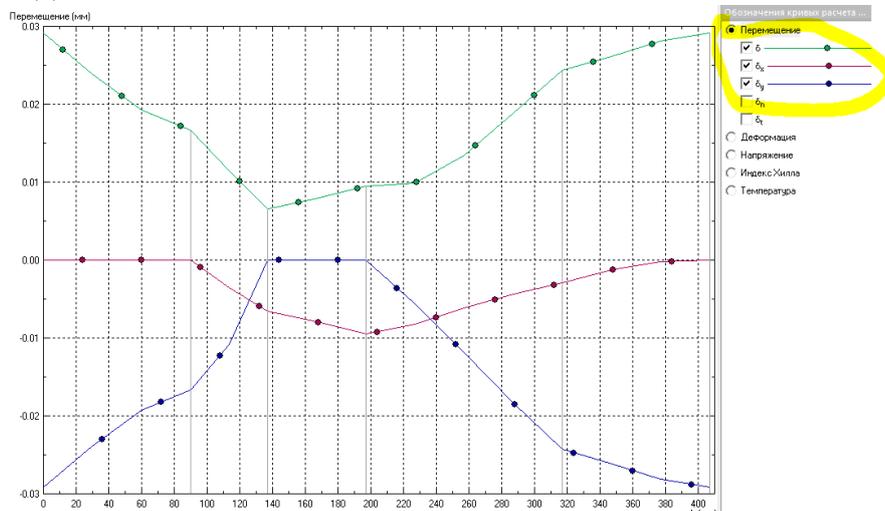
11) Вывести график шести напряжений для заданного контура, сделать скриншот и добавить его в отчет:



12) Вывести график шести деформаций для заданного контура, сделать скриншот и добавить его в отчет:



13) Вывести график трех перемещений для заданного контура, сделать скриншот и добавить его в отчет:



14) Вывести таблицу для заданного контура. В таблице оставить 3 первые величины и 9 величин (см. Рис. 5), выведенные на предыдущие графики (при этом число строк таблицы установить так, как показано на рис.6).

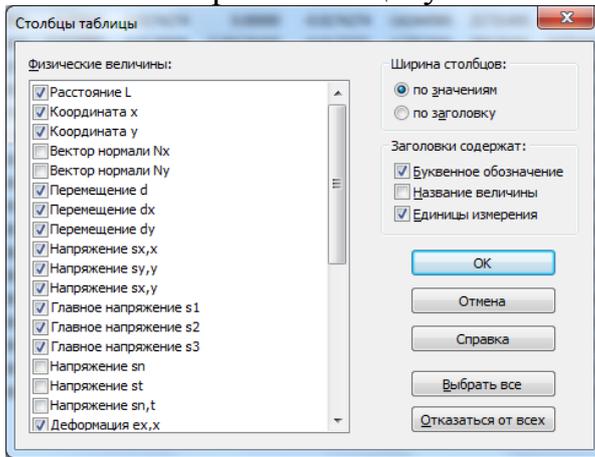


Рис. 5. Таблица физических величин

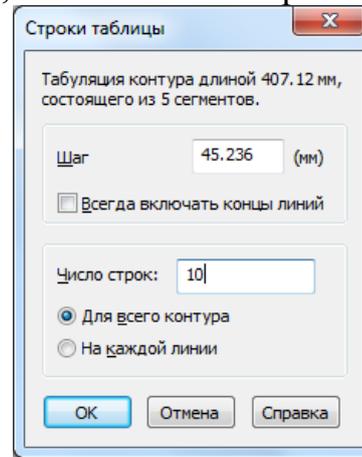


Рис. 6. Свойства таблицы

В результате получится таблица (скриншот которой необходимо добавить в отчет):

L (мм)	x (мм)	y (мм)	δ (мм)	δ _x (мм)	δ _y (мм)	σ _{xx} (Н/м²)	σ _{yy} (Н/м²)	σ _{xy} (Н/м²)	σ ₁ (Н/м²)	σ ₂ (Н/м²)	σ ₃ (Н/м²)	ε _{xx}	ε _{yy}	ε _{xy}	ε ₁	ε ₂	ε ₃
0.00000	30.0000	120.000	0.00621401	-0.00621401	0.00000	13017000.	90920800.	-815980.	90929400.	13008400.	0.00000	-6.88854e-5	4.20366e-4	-1.02490e-5	4.20581e-4	-0.0000691000	-1.50635e-4
45.2360	75.2360	120.000	0.00864210	-0.00864210	0.00000	3606950.	46012200.	-3276990.	46264000.	3355200.	0.00000	-4.92595e-5	2.17054e-4	-4.11603e-5	0.000223270	-5.54760e-5	-7.19118e-5
90.4720	90.0000	89.5280	0.00999291	-0.00810749	-0.00584181	-2565120.	42510800.	-868304.	42527600.	-2581840.	0.00000	-7.40018e-5	2.09084e-4	-1.09062e-5	2.09503e-4	-7.44214e-5	-5.78923e-5
135.708	90.0000	44.2920	0.0162471	-0.00529050	-0.0153617	-90444.3	43264000.	475439.	43269200.	-95657.5	0.00000	-6.31383e-5	2.09136e-4	5.97169e-6	2.09267e-4	-6.32692e-5	-6.25703e-5
180.944	89.0560	0.00000	0.0245372	-0.00273788	-0.0243840	2080990.	41742700.	1184940.	41778000.	2045620.	0.00000	-5.04435e-5	1.98639e-4	1.48833e-5	1.99526e-4	-5.13297e-5	-6.35125e-5
226.180	43.8201	0.00000	0.0273862	-6.62239e-4	-0.0273782	4873040.	41488700.	1668060.	41564600.	4797210.	0.00000	-3.65873e-5	1.93366e-4	2.09514e-5	0.000195260	-3.84807e-5	-6.71910e-5
271.416	0.00000	1.41593	0.0289284	0.00000	-0.0289284	7589250.	38684200.	2808330.	38935800.	7337650.	0.00000	-1.94010e-5	1.75881e-4	3.52737e-5	1.82057e-4	-2.55772e-5	-6.70630e-5
316.652	0.00000	46.6519	0.0213808	0.00000	-0.0213808	906753.	30608400.	4253340.	31205500.	309669.	0.00000	-3.99796e-5	1.46553e-4	5.34236e-5	0.000160770	-5.41967e-5	-4.56742e-5
361.727	1.68747	90.7248	0.0163025	-2.86773e-4	-0.0163000	-19085300.	20650000.	12554300.	24284100.	-22719500.	0.00000	-1.22127e-4	1.27418e-4	1.57687e-4	2.03726e-4	-1.98435e-4	-2.26761e-6
407.124	30.0000	120.000	0.00621401	-0.00621401	0.00000	13017000.	90920800.	-815980.	90929400.	13008400.	0.00000	-6.88854e-5	4.20366e-4	-1.02490e-5	4.20581e-4	-0.0000691000	-1.50635e-4

15) Вычислить коэффициент концентрации напряжений. Результаты добавить в отчет.

2.2. Собственная емкость двухпроводной линии передачи

Исходные данные:

Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon = 1$.
 Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon = 2$.
 Геометрия проводников показана на Рис. 7. Область задачи ограничена Землей снизу и бесконечна в трех других направлениях. Тип задачи: плоско-параллельная задача электростатики.

Задача:

Определить собственную емкость проводников. Согласно одному из источников [4] собственная емкость проводника $C = 9.23 \cdot 10^{-11}$ Ф. В результате расчета необходимо сравнить расчетные данные с данными из источника и сделать вывод.

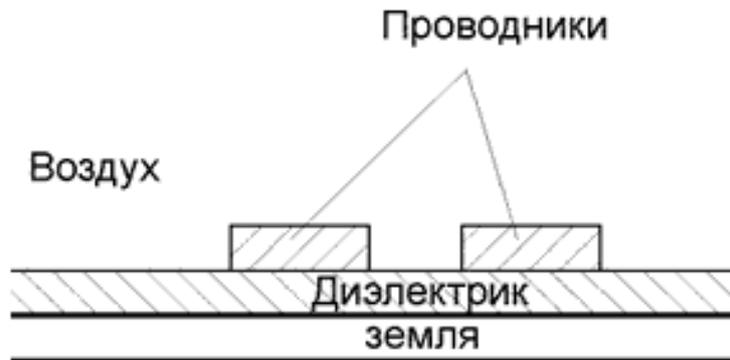


Рис. 7. Геометрия проводников

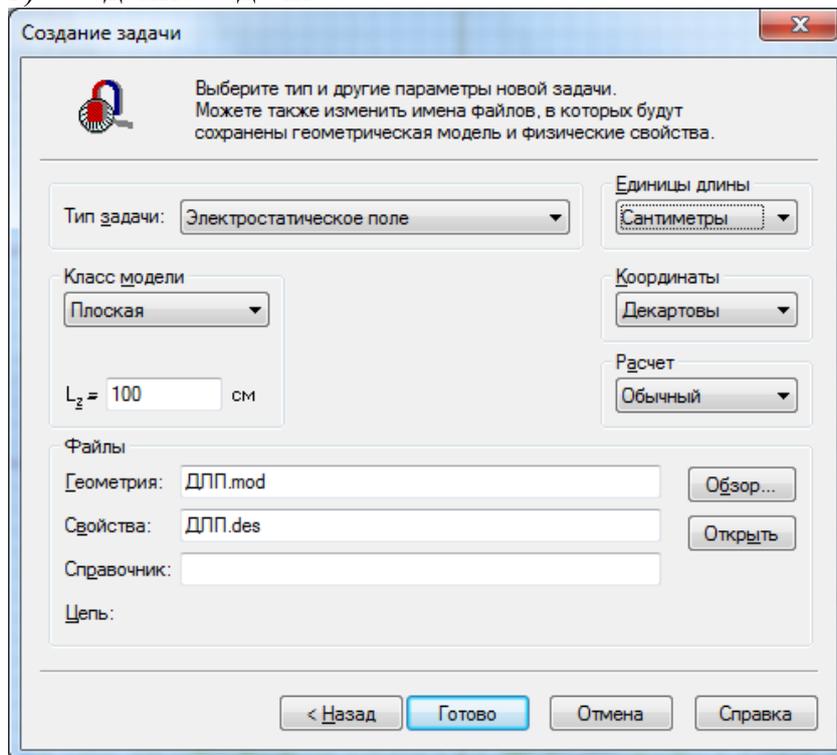
Решение:

Для решения теоретически бесконечной задачи можно определить область расчета как прямоугольник, достаточно большой для того, чтобы исключить влияние краевых эффектов. Для вычисления матрицы емкостей необходимо установить потенциалы $U = 1$ В у одного проводника, и $U = 0$ В у другого.

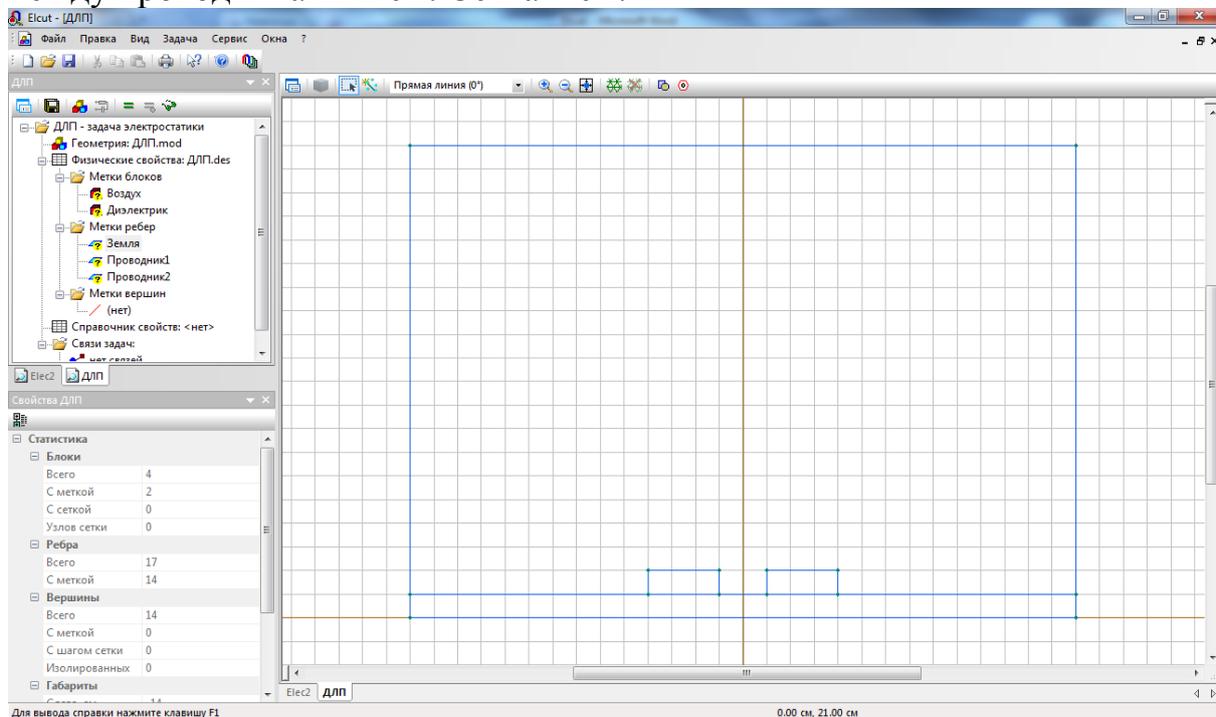
Собственная емкость $C_{11} = C_{22} = Q_1 / U_1$, где заряд проводника Q_1 вычисляется как интеграл вдоль прямоугольного контура, проведенного вокруг проводника 1 с отступом от его границ. В качестве контуров для вычисления заряда Q_1 необходимо указать прямоугольники $-6 \leq x \leq 0$, $0 \leq y \leq 4$.

Последовательность выполнения практического задания №2.

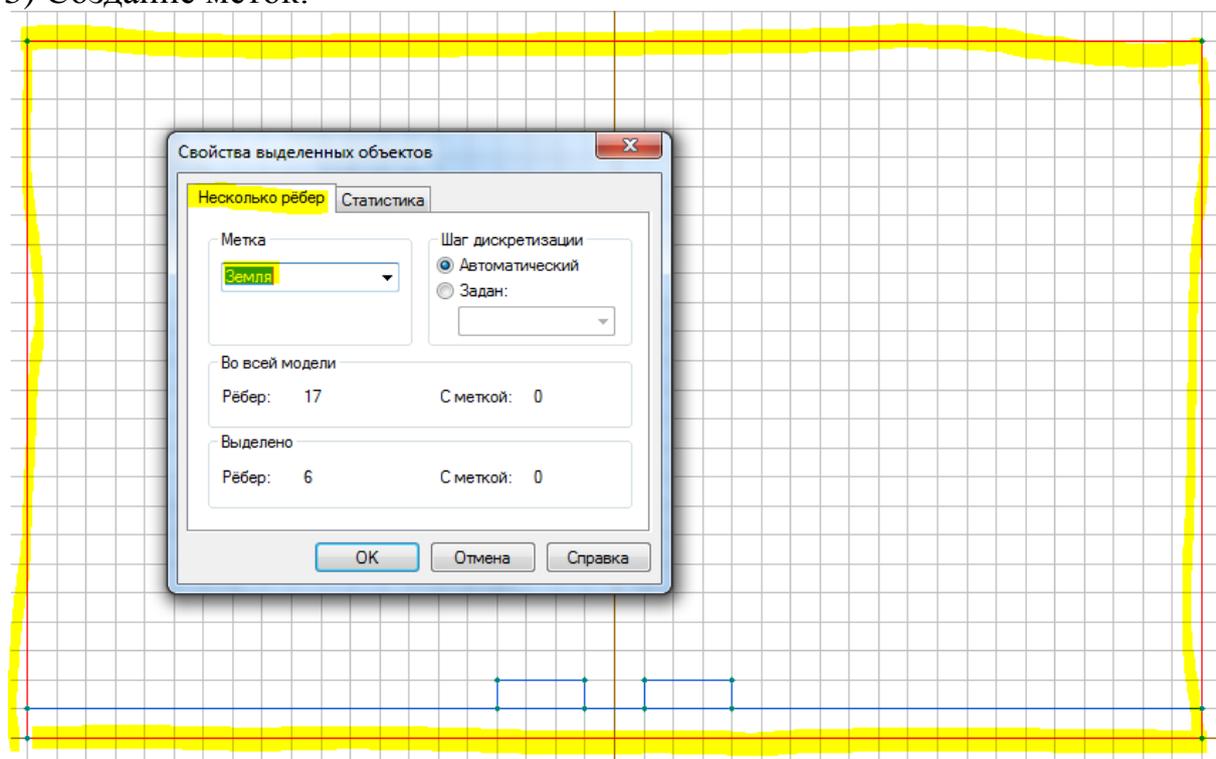
1) Создание задачи:

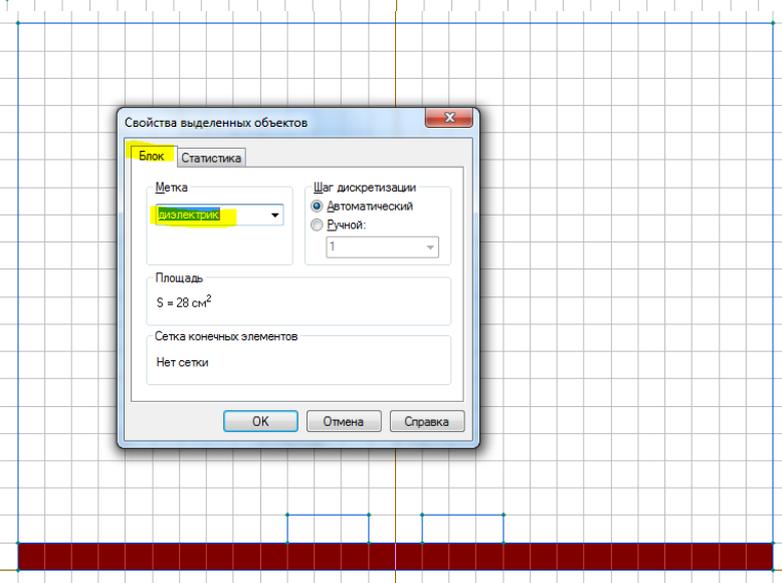
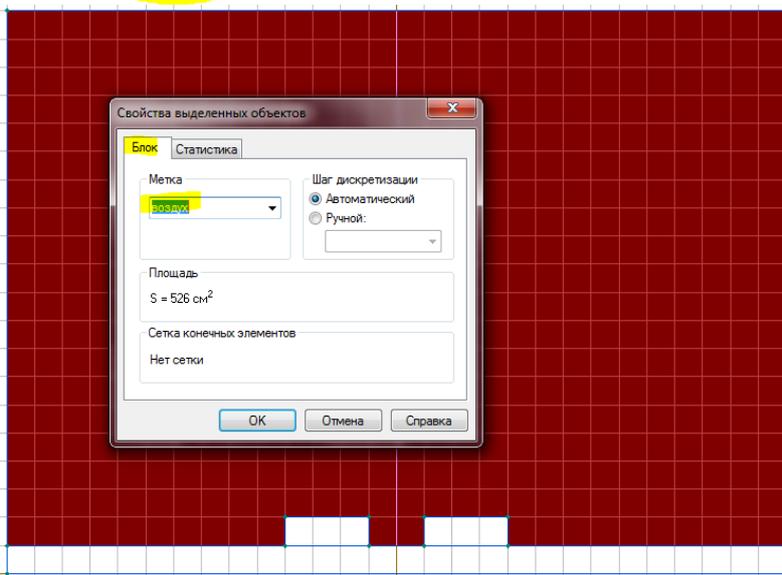
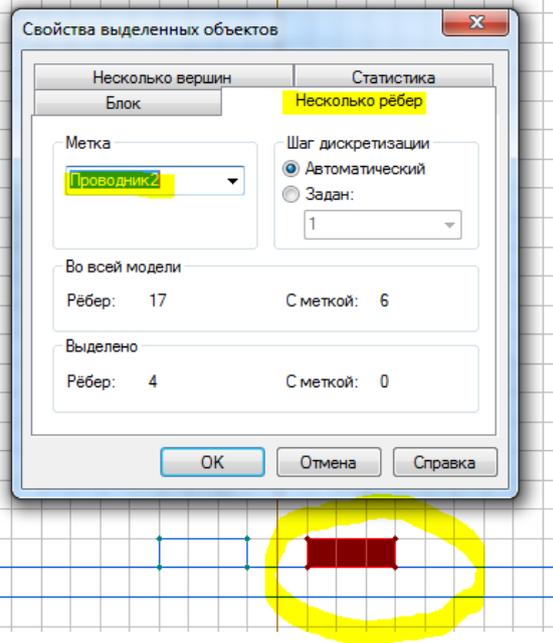
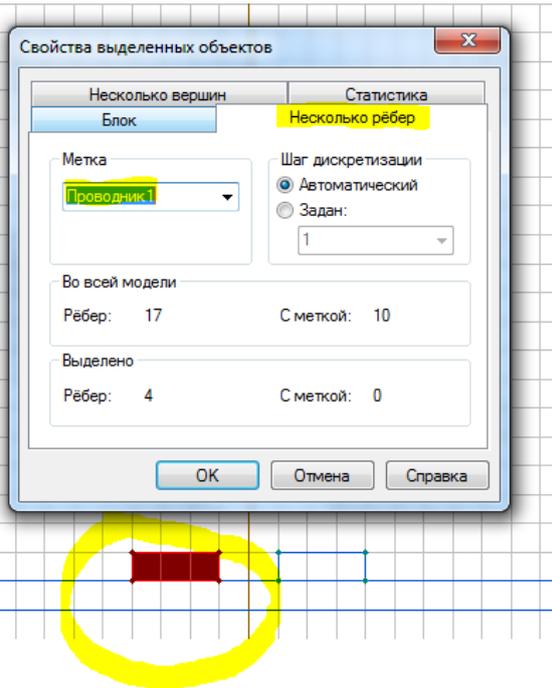


2) Разработка модели. Стороны прямоугольника: по X – 28см, по Y – 20см. Толщина диэлектрика 1см. Проводник: по X – 3см, по Y – 1см. Расстояние между проводниками 2 см. Сетка 1 см.

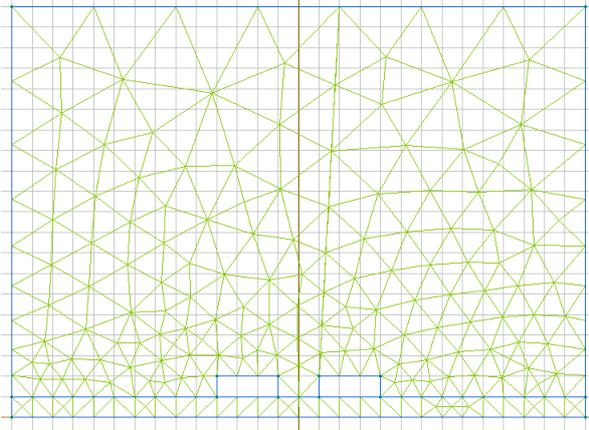


3) Создание меток:

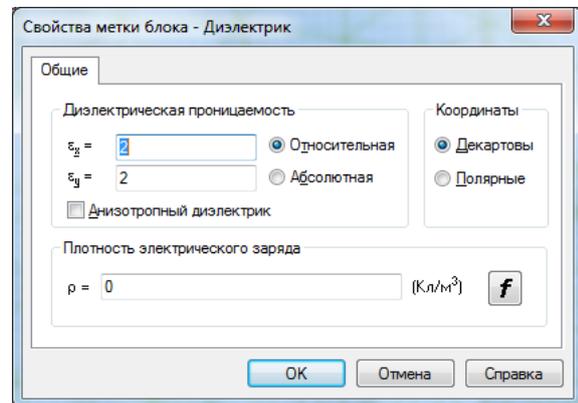
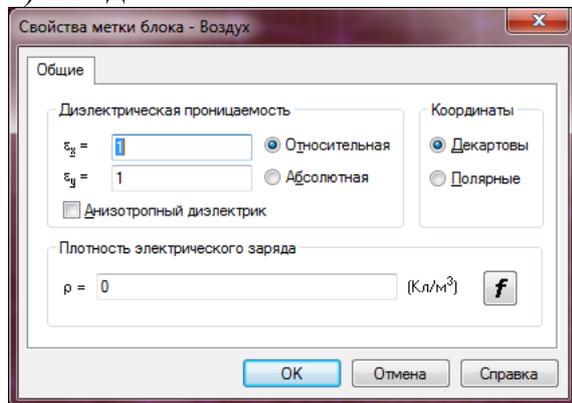




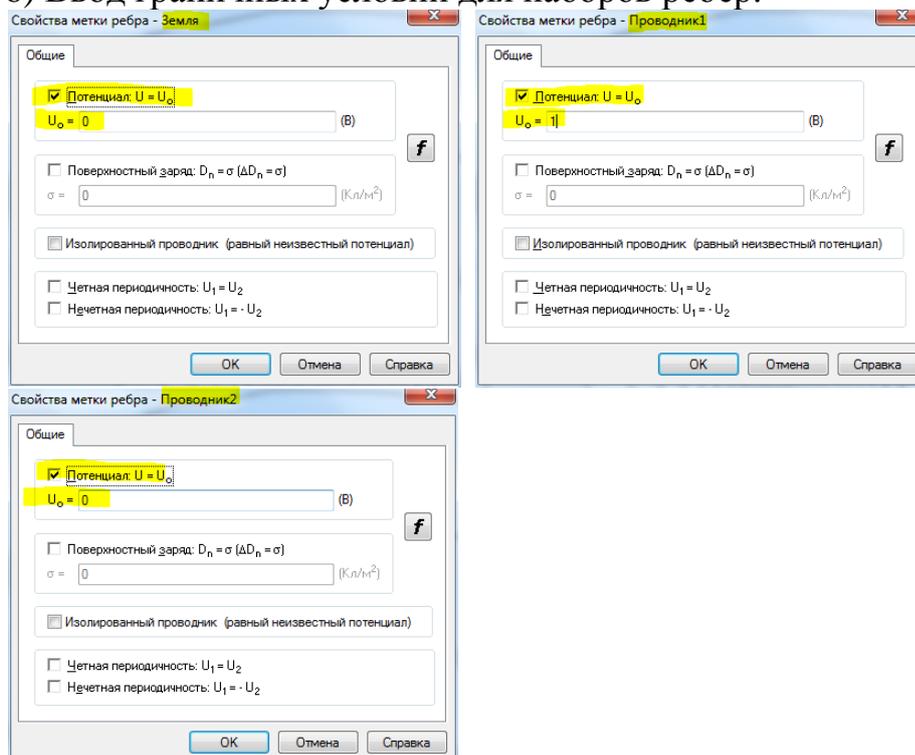
4) Создание сетки:



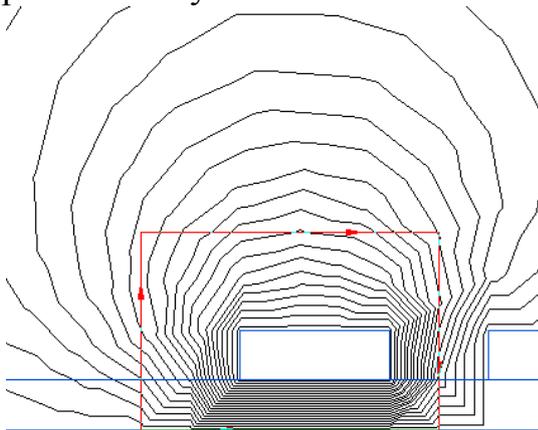
5) Ввод свойств меток:



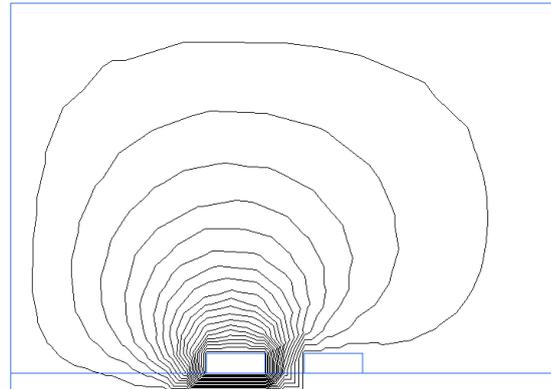
6) Ввод граничных условий для наборов ребер:



7) Запуск анализа. В результате расчета получится:



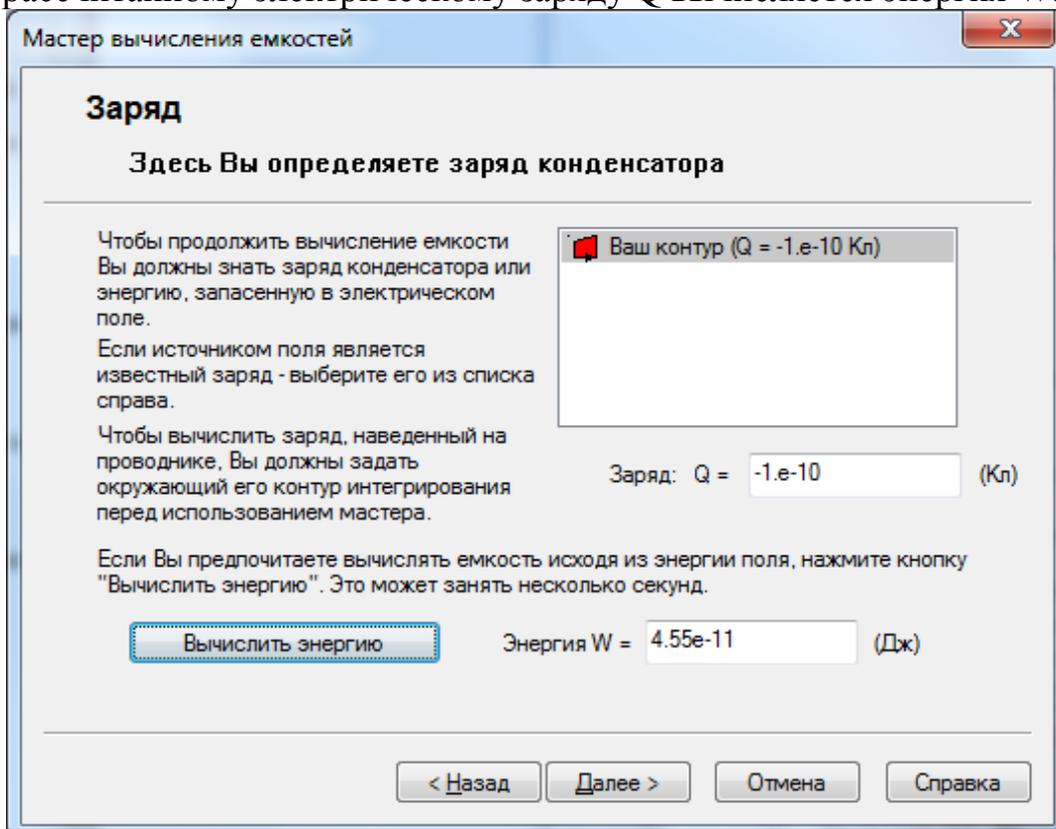
8) Создать контур $-6 \leq x \leq 0, 0 \leq y \leq 4$:



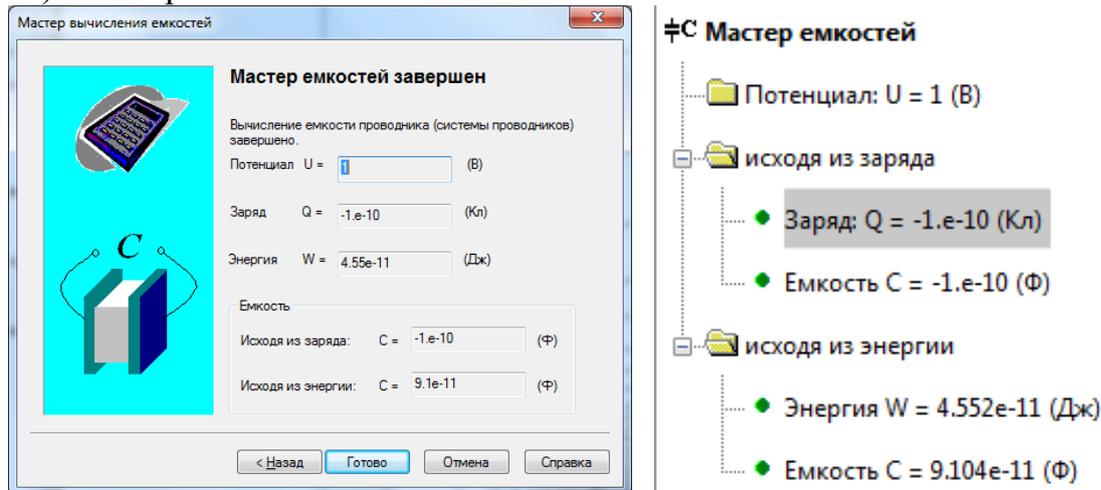
9) Проанализировать результат и ответить на вопрос: почему плотность линий под проводником гуще, чем над ним? Ответ добавить в отчет.

10) Воспользоваться интегральным калькулятором. Расчеты интегрального калькулятора добавить в отчет.

11) Запустить Мастер емкостей. Для Проводника1 в заданном контуре по рассчитанному электрическому заряду Q вычисляется энергия W :



12) Затем рассчитывается емкость:



Мастер емкостей завершен

Вычисление емкости проводника (системы проводников) завершено.

Потенциал $U = 1$ (В)

Заряд $Q = -1.e-10$ (Кл)

Энергия $W = 4.55e-11$ (Дж)

Емкость

Исходя из заряда: $C = -1.e-10$ (Ф)

Исходя из энергии: $C = 9.1e-11$ (Ф)

Потенциал: $U = 1$ (В)

исходя из заряда

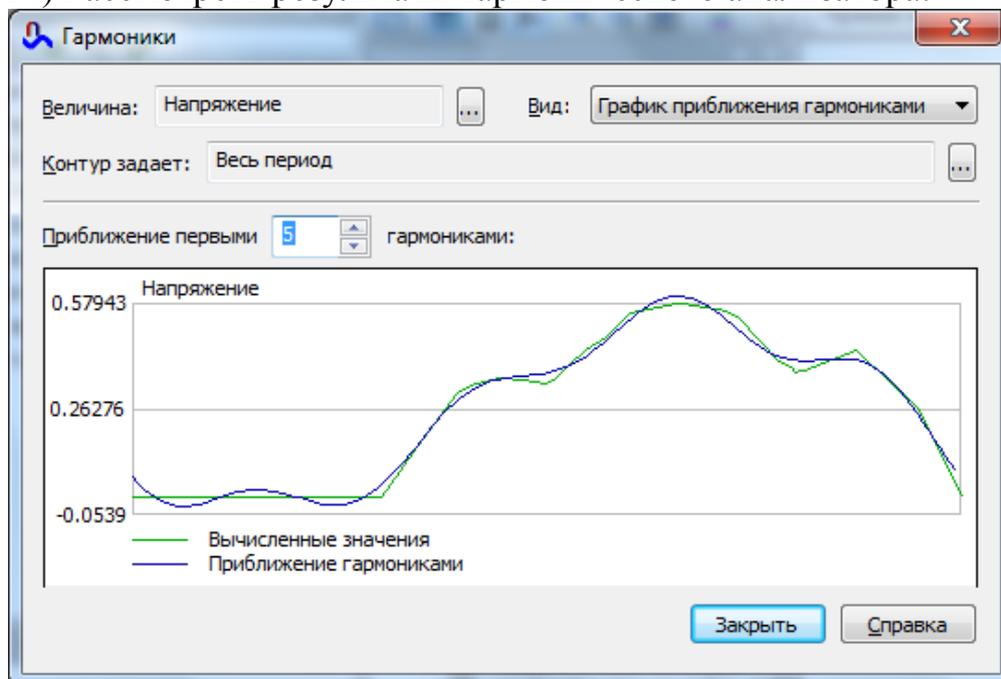
- Заряд: $Q = -1.e-10$ (Кл)
- Емкость $C = -1.e-10$ (Ф)

исходя из энергии

- Энергия $W = 4.552e-11$ (Дж)
- Емкость $C = 9.104e-11$ (Ф)

13) Сравнение собственных емкостей. Емкость, рассчитанная в программе ELCUT, довольно близка к емкости, рассчитанной в журнале вручную. Можно исходить из того, что в журнале расчет более точен. Также можно предположить, что увеличение прямоугольника, ограничивающего блок «Земля» повысит точность автоматизированного расчета. Необходимо самостоятельно проверить верность этого предположения. Для этого надо уменьшить площадь прямоугольника, ограничивающего блок «Земля» и проанализировать результаты расчетов.

14) Рассмотреть результаты гармонического анализатора:



15) Выбрать необходимое количество гармоник для того, чтобы точно описать полученную кривую. График добавить в отчет.

2.3. Распределение температуры в цилиндре

Исходные данные:

Весьма длинный цилиндр (бесконечной длины) помещен в следующие условия: на внутренней поверхности поддерживается температура T_i (значения T_i см. в Табл. 2, по вариантам) и на внешней поверхности температура $T_o=0^\circ\text{C}$. Теплопроводность цилиндра зависит от температуры по линейному закону $\lambda(T) = C_0 + C_1 \cdot T$. Геометрия цилиндра представлена на Рис. 8. Значения R_i и R_o см. в Табл. 2 (по вариантам). $C_0 = 50 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$, $C_1 = 0.5 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$. Тип задачи: осесимметричная нелинейная задача теплопроводности.

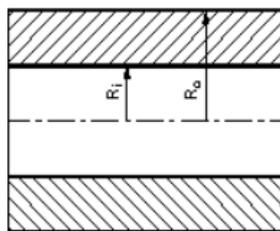


Рис. 8. Геометрия цилиндра

Табл. 2 – Данные для расчета температуры в цилиндре

№ вар	Внутренний диаметр R_i , мм	Наружный диаметр R_o , мм	Температура внутренней поверхности T_i , $^\circ\text{C}$
1	5,5	11	102
2	6	12	104
3	6,5	13	106
4	7	14	108
5	7,5	15	110
6	8	16	112
7	4,5	10	98
8	4	9	96
9	3,5	8	94
10	3	7	92
11	2,5	6	90
12	5	10	100

Задача:

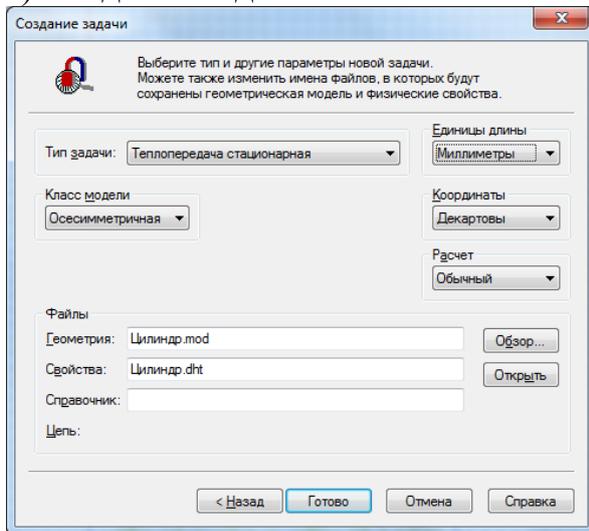
Найти распределение температуры в цилиндре.

Решение:

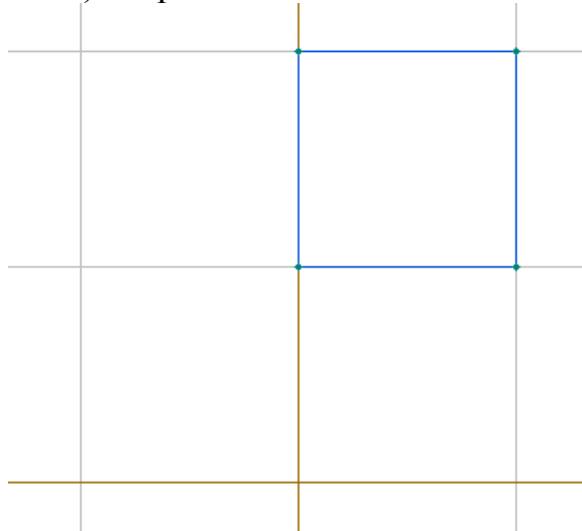
Осевую длину модели установить равной 5 мм.

Последовательность выполнения практического задания №3.

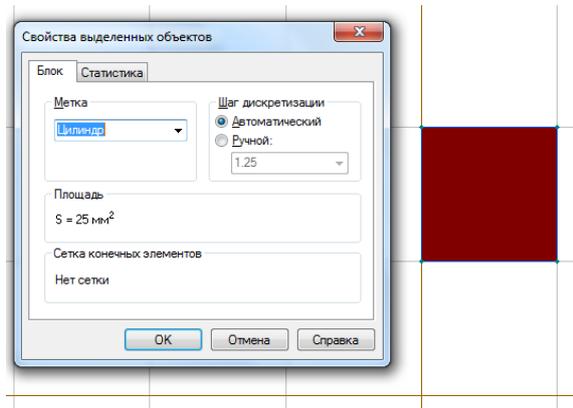
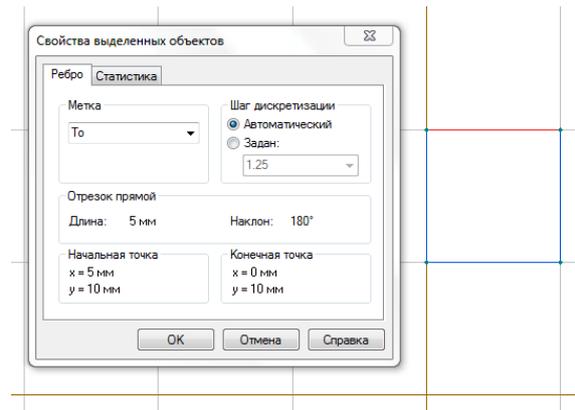
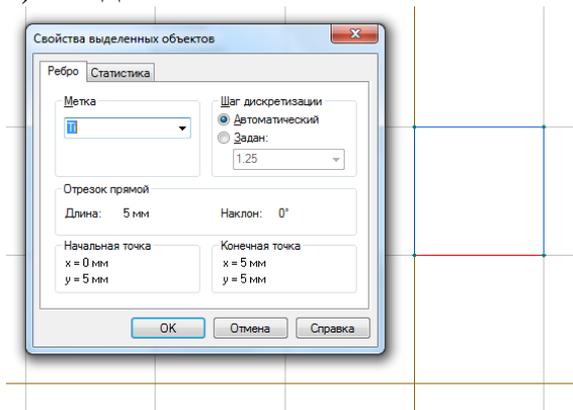
1) Создание задачи:



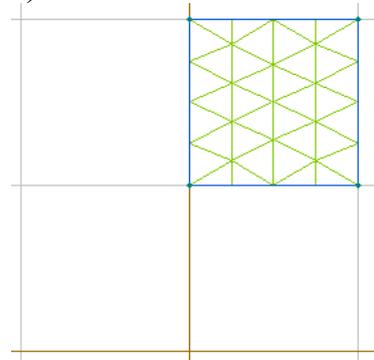
2) Разработка модели:



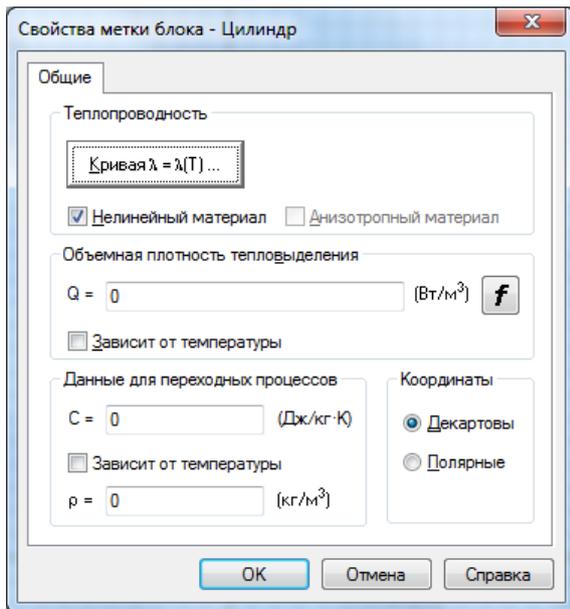
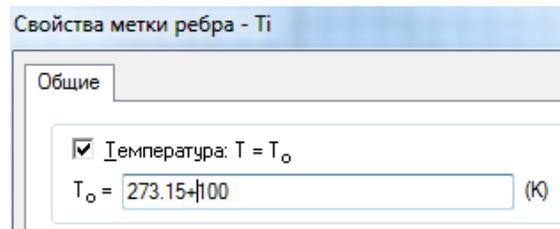
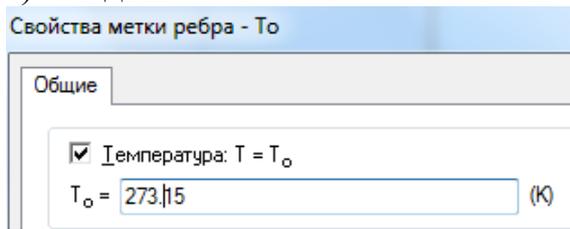
3) Создание меток:



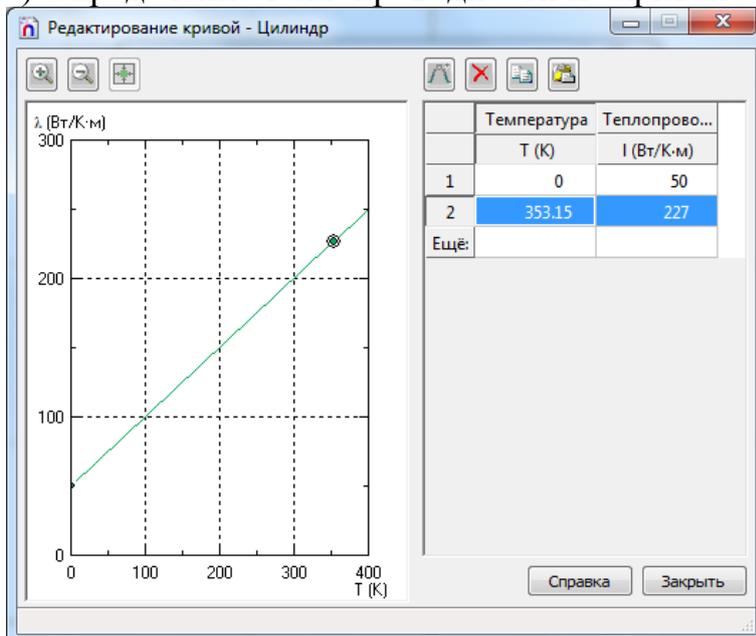
4) Создание сетки:



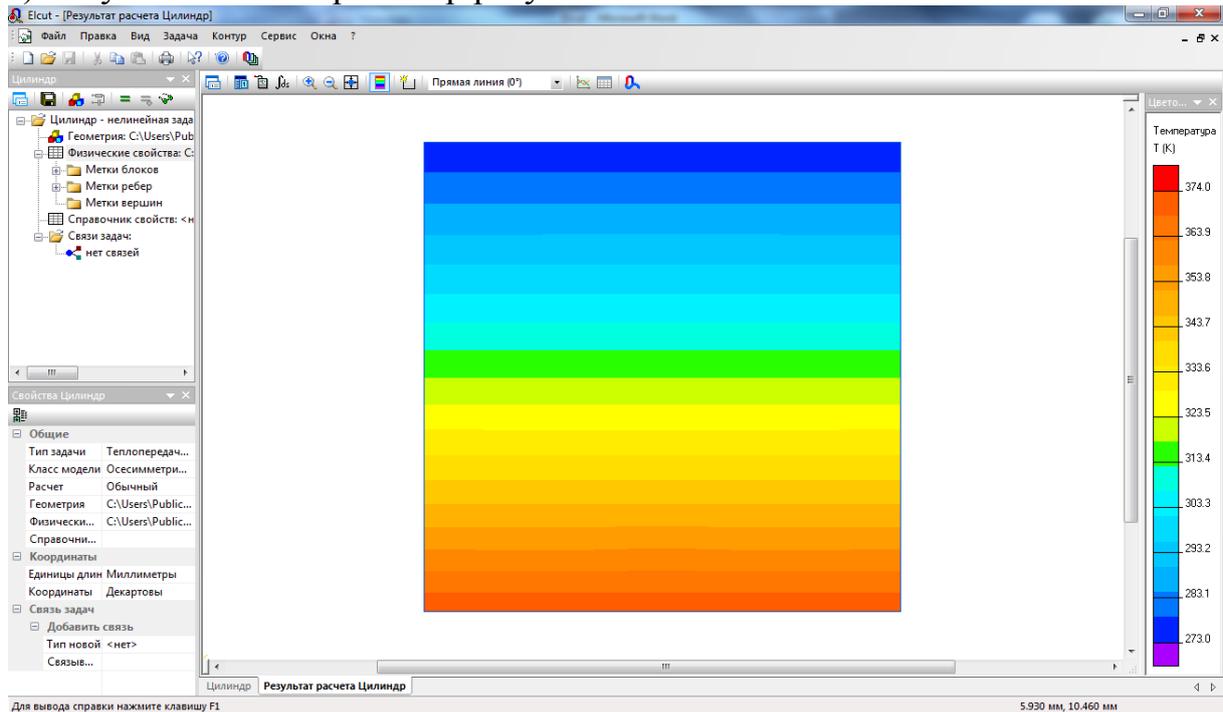
5) Ввод свойств меток:



6) Определение теплопроводности по кривой:



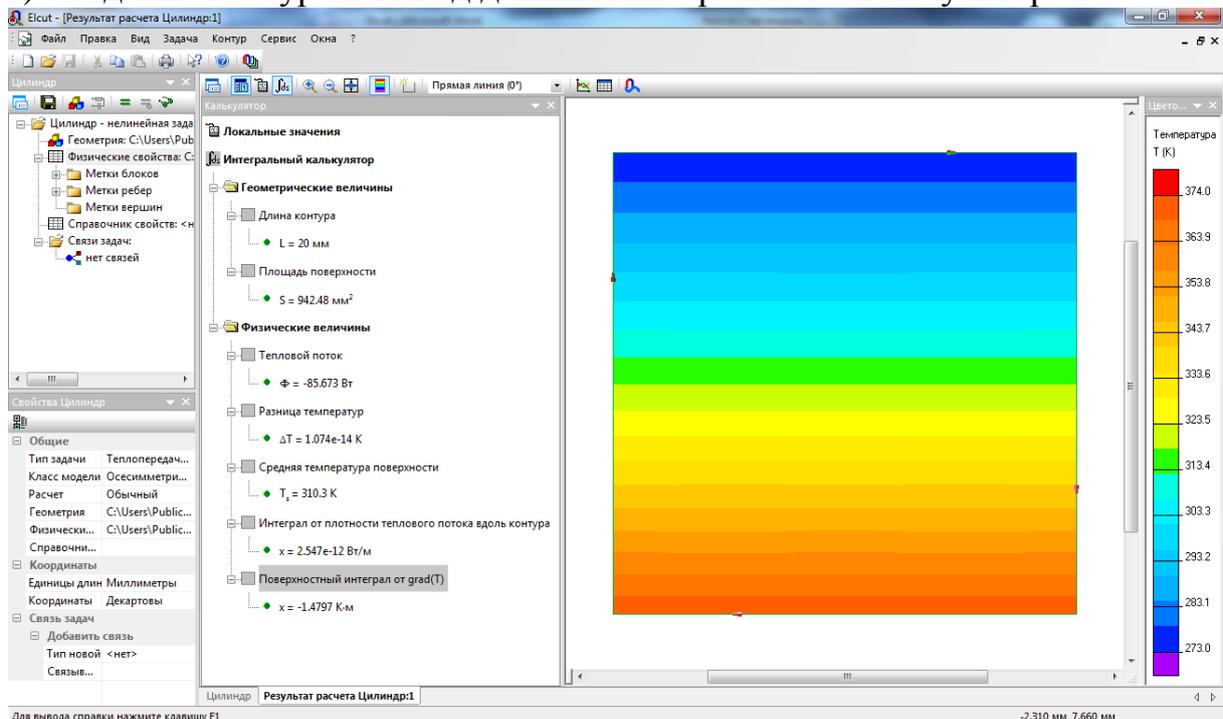
7) Запуск анализа. Просмотр результатов:



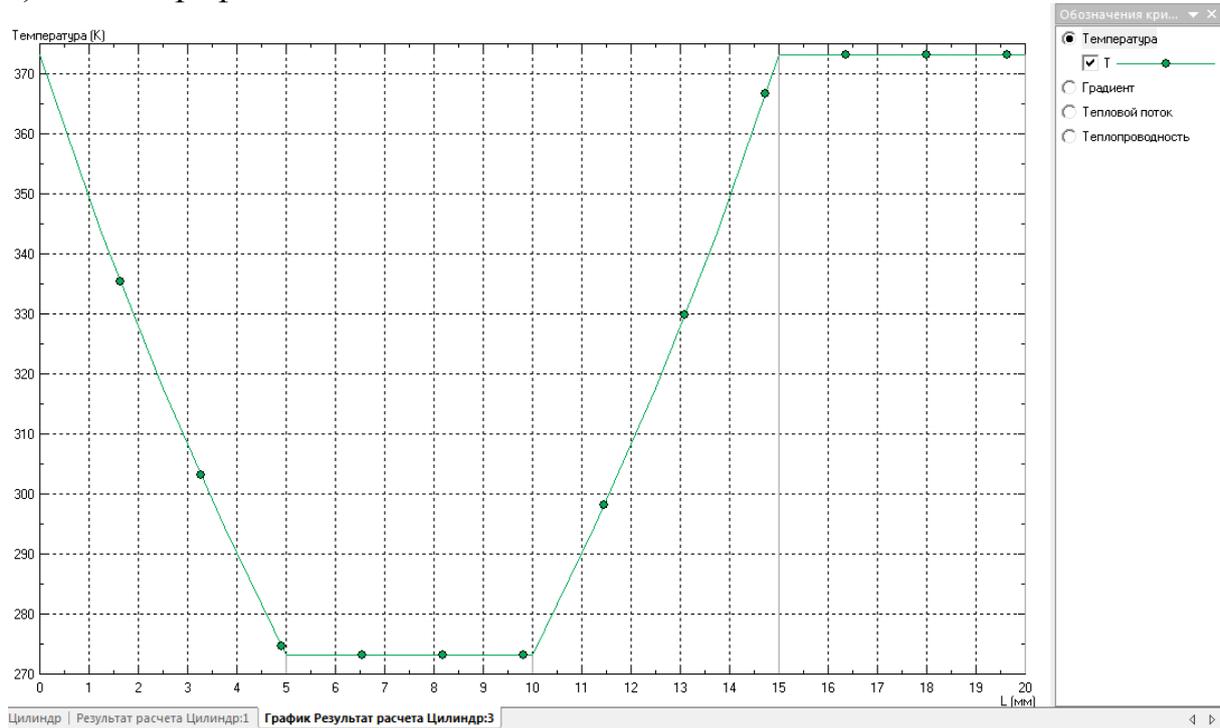
Используя инструмент «Локальные значения» необходимо заполнить в отчете таблицу результатов:

Радиус, мм	Ri+0,5	Ri+1,0	Ri+1,5	Ri+2,0
Температура, °C				

8) Создание контура и вывод данных интегрального калькулятора:



9) Вывод графика:



10) Проанализировать кривую и письменно (в отчете) объяснить перепады температур на 4х равномерных участках.

2.4. Распределение температуры в проводнике с током

Исходные данные:

Геометрия представлена на Рис. 9. Значения диаметра провода d , тока I и температуру внешней среды T_0 см. в Табл. 3 (по вариантам). Погонное электрическое сопротивление провода $R = 3 \cdot 10^{-4}$ Ом/м. Теплопроводность $\lambda = 20$ Вт/К·м. Коэффициент конвекции $\alpha = 800$ Вт/К·м². Тип задачи: осесимметричная совмещенная электротермическая задача.

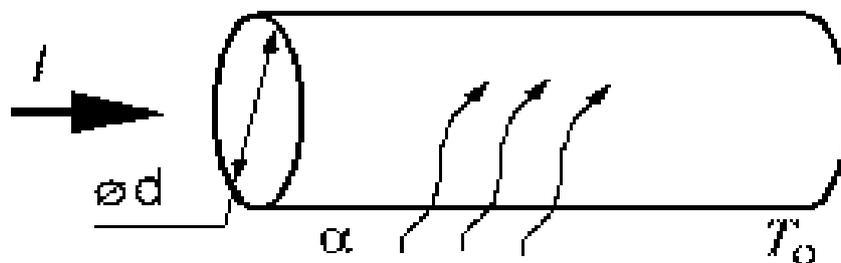


Рис. 9. Геометрия провода

Табл. 3 – Данные для расчета температуры в проводнике

№ вар	Диаметр провода d, мм	Ток I, А	Температура внешней среды T ₀ , °С
1	4,5	450	21
2	5	500	22
3	5,5	550	23
4	6	600	24
5	6,5	650	25
6	7	700	21
7	7,5	750	22
8	8	800	23
9	8,5	850	24
10	9	900	25
11	9,5	950	21
12	10	1000	20

Задача:

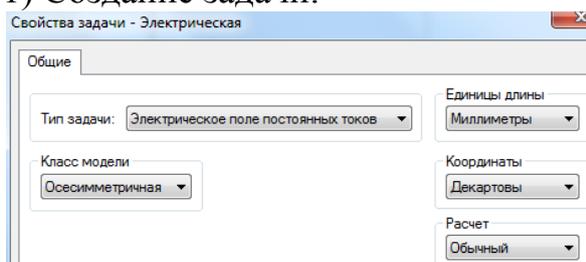
Вычислить распределение температуры в длинном проводнике с током.

Решение:

Произвольно выбрать в качестве модели кусок провода длиной 10 мм. Для ввода данных использовать радиус провода, удельное электрическое сопротивление материала провода $\rho = \pi d^2 R / 4$ (Ом·м) и падение напряжения на 10 мм отрезке провода $\Delta U = I \cdot R \cdot l$ (В). Для задачи протекания тока надо задать электрические потенциалы на двух боковых сечениях проводника и условие нулевого тока через внешнюю поверхность. Для задачи теплопроводности надо задать условие нулевого теплового потока через боковые сечения и условие конвективного теплообмена через внешнюю поверхность.

Последовательность выполнения практического задания №4.

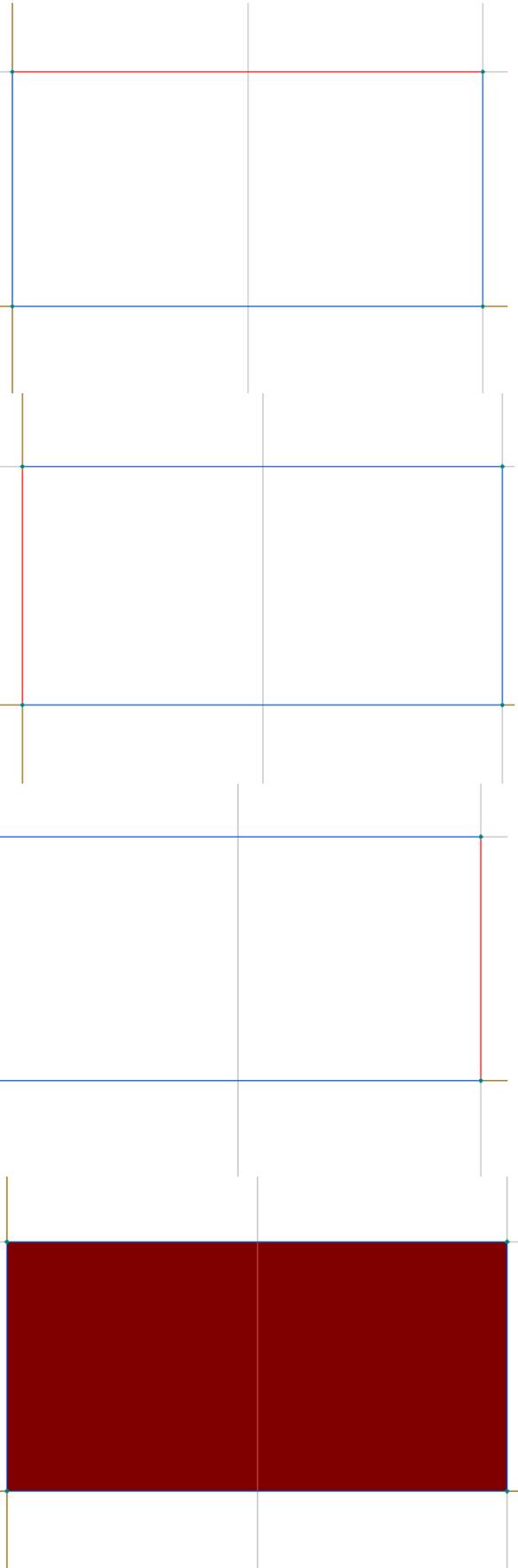
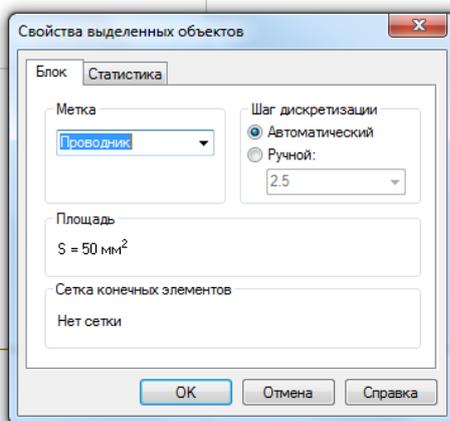
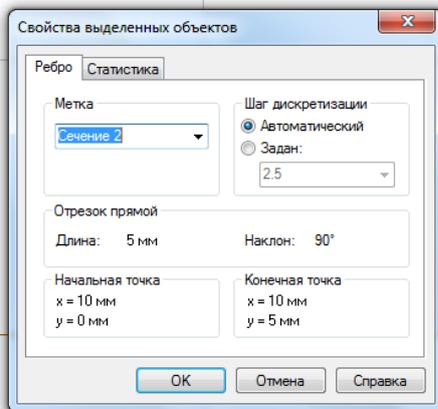
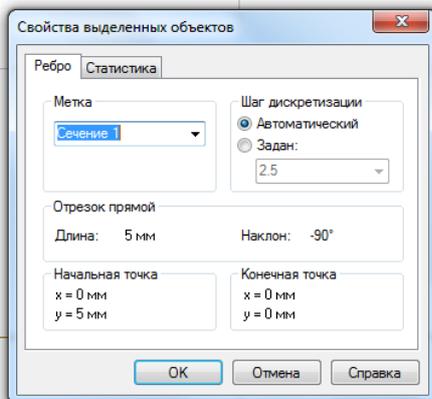
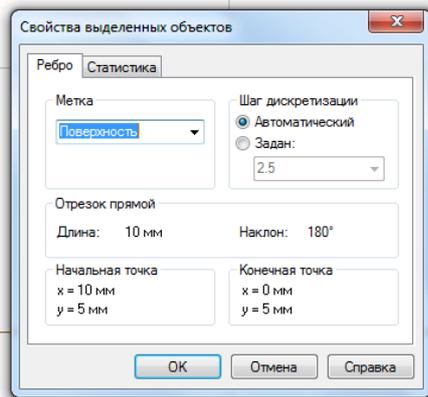
1) Создание задачи:



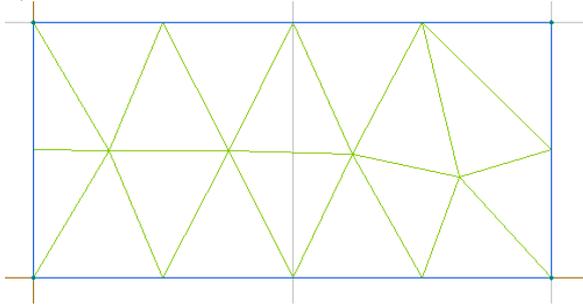
2) Разработка модели:



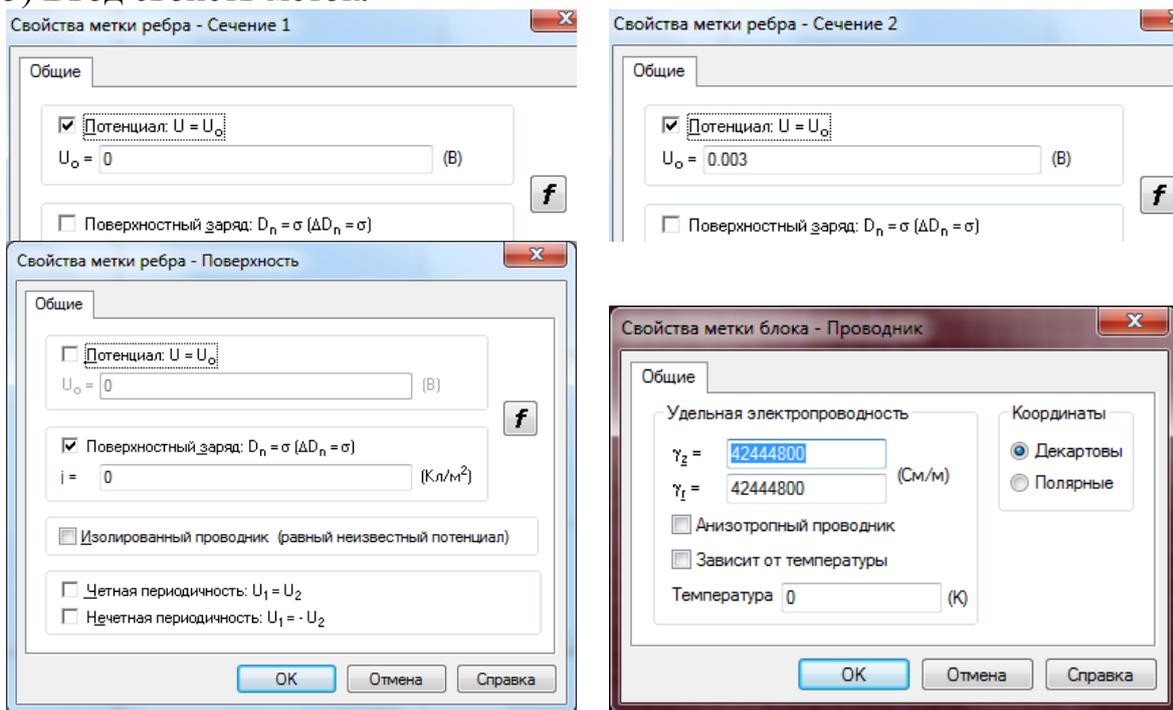
3) Создание меток:



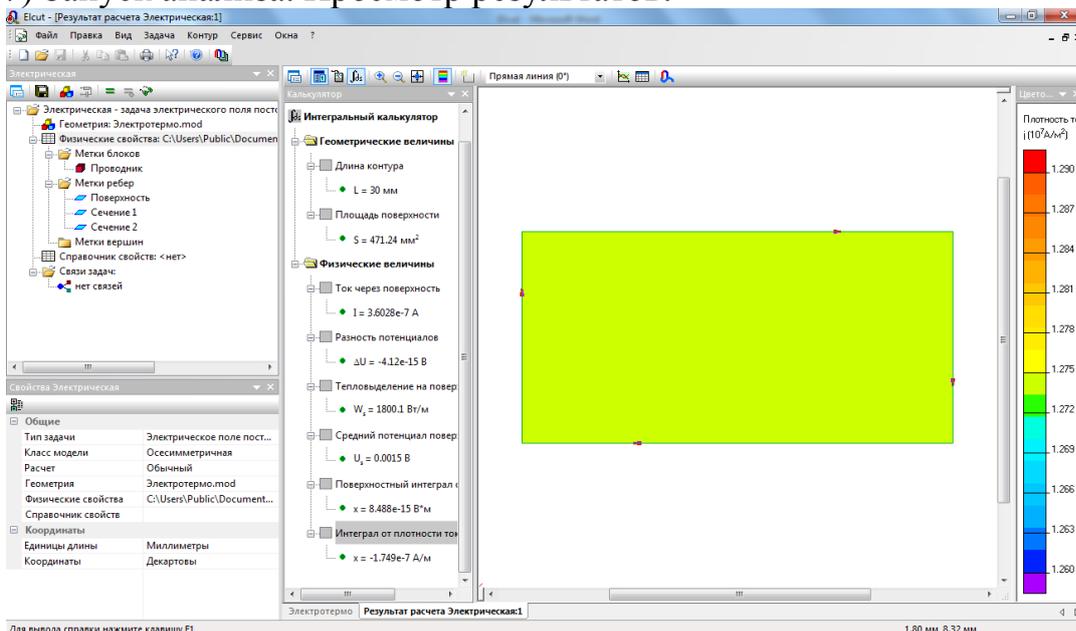
4) Создание сетки:



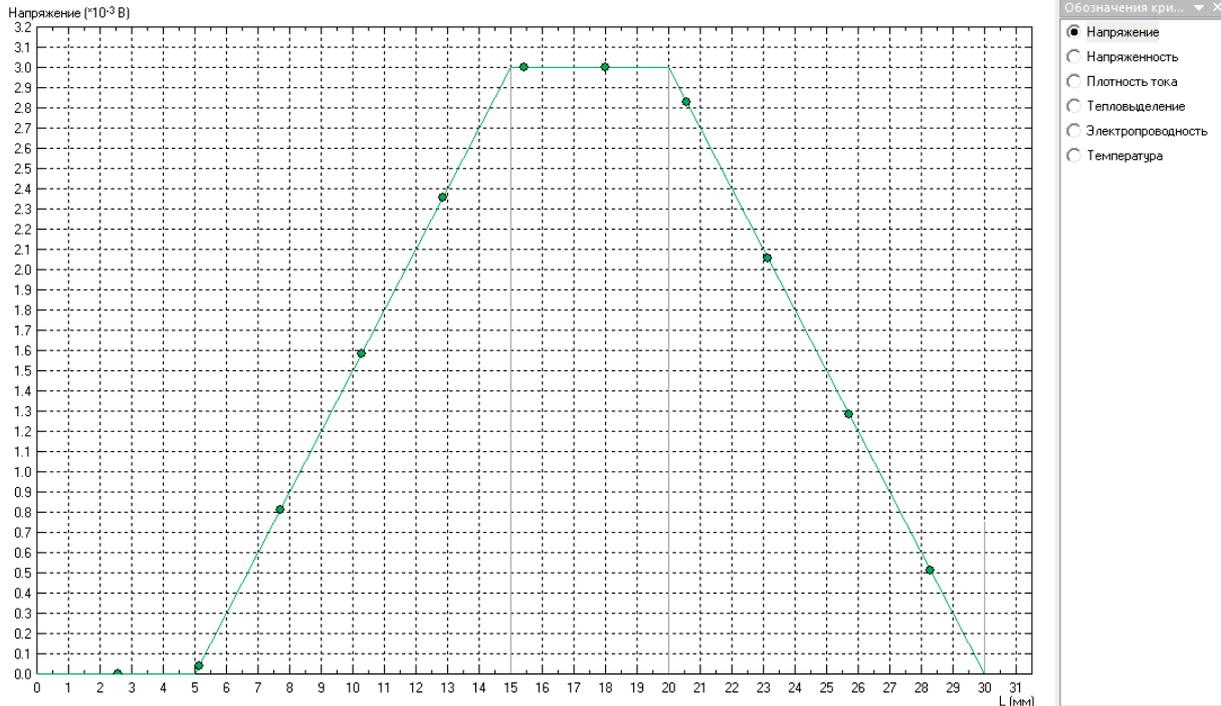
5) Ввод свойств меток:



7) Запуск анализа. Просмотр результатов:

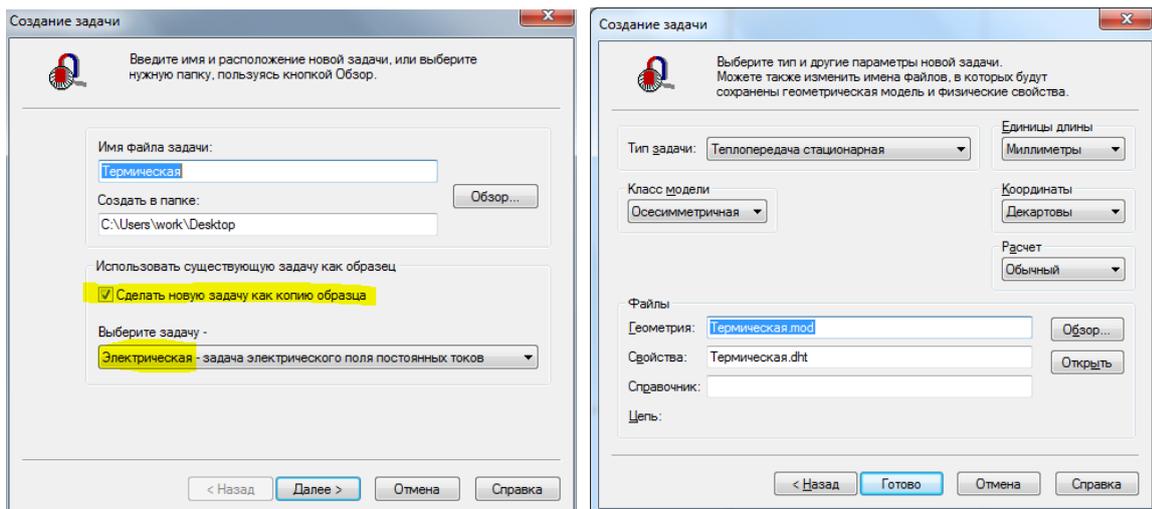


8) Вывод графика:

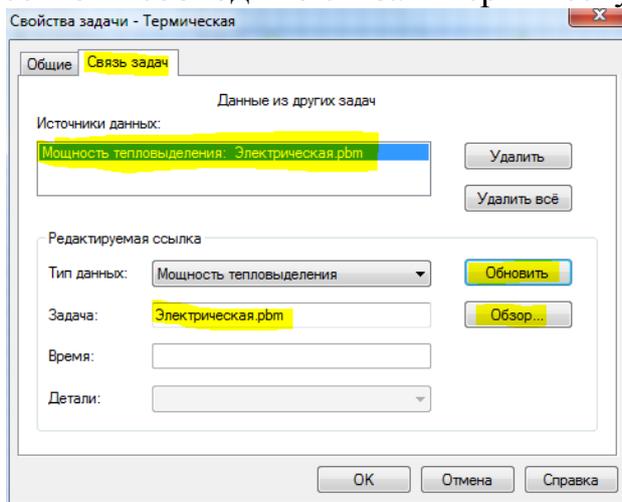


9) Проанализировать кривую и письменно (в отчете) объяснить перепады напряжений.

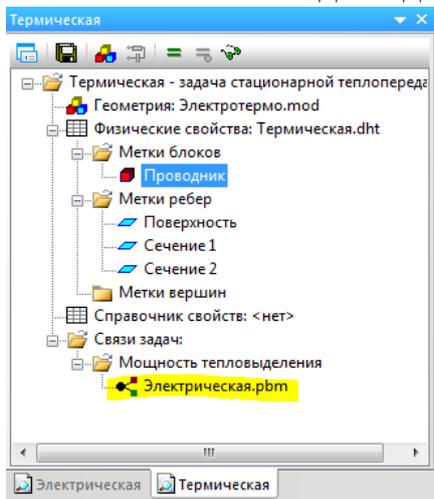
10) После выполнения электрической задачи необходимо создать термическую задачу. Затем связать эти 2 задачи. Т.к. геометрия модели будет та же, то рекомендуется создавать 2ую задачу на основе 1ой:



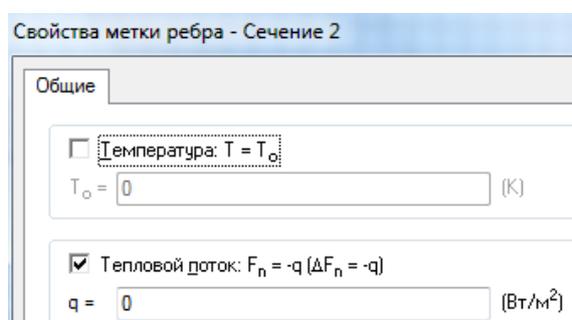
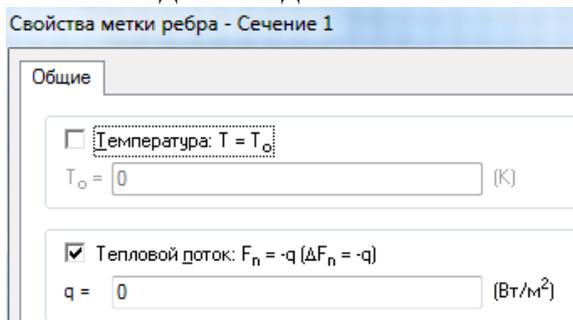
11) После автоматически полученной геометрической модели с метками и сеткой необходимо связать термическую задачу с электрической:

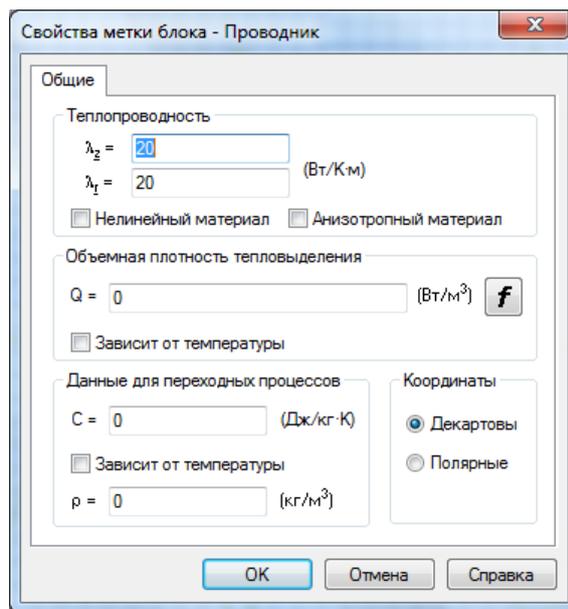
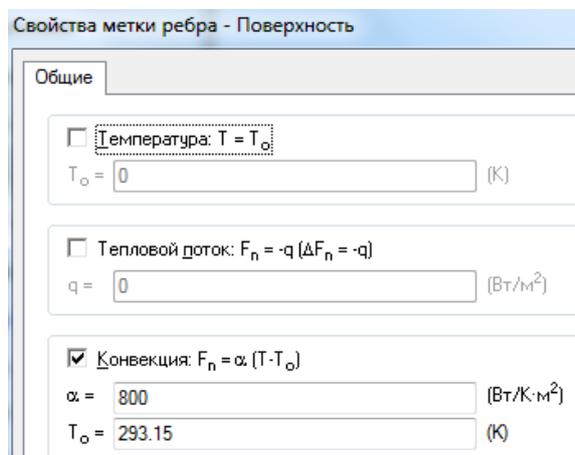


В Окне описания задачи должна появиться связь:



12) Т.к. изменился тип задачи (была электрическая, – стала термическая), то необходимо задать свойства меток:





13) С помощью инструмента «Локальные значения» вычислить температуру на оси проводника. Полученные значения внести в отчет.

2.5. Паразитная взаимная емкость

Перед выполнением задачи рекомендуется просмотреть видеоролик по ссылке <http://www.youtube.com/watch?v=v1a9vR11cLM>.

Исходные данные:

Геометрия представлена на Рис. 10. Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon = 1$, относительная диэлектрическая проницаемость подложки выбирается исходя из материала подложки, указанного в Табл. 4 (по вариантам), также в этой таблице указаны потенциалы первого и второго проводников. Тип задачи: трехмерная задача электростатики.

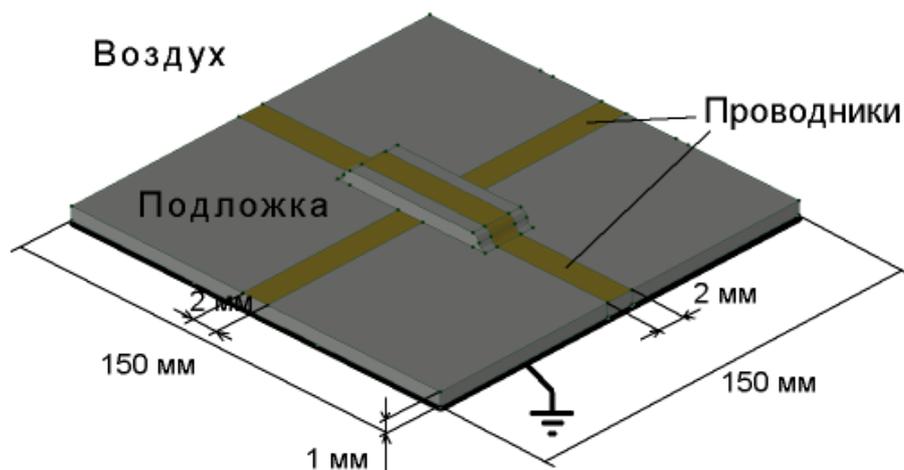


Рис. 10. Геометрия микрополосковых линий

Табл. 4 – Данные для расчета паразитной емкости

№ вар	Материал подложки	Потенциал 1го проводника U1, В	Потенциал 2го проводника U1, В
1	FR1	-1,0	0,6
2	FR2	-0,9	0,7
3	FR3	-0,8	0,8
4	FR4	-0,7	0,9
5	FR5	-0,6	1,0
6	FR1	-0,5	1,1
7	FR2	-1,0	0,5
8	FR3	-0,9	0,5
9	FR4	-0,8	0,5
10	FR5	-0,7	0,5
11	FR1	-0,6	0,5
12	FR2	-0,5	0,5

Задание:

Найти взаимную емкость C12. Эквивалентная электрическая схема представлена на Рис. 11.

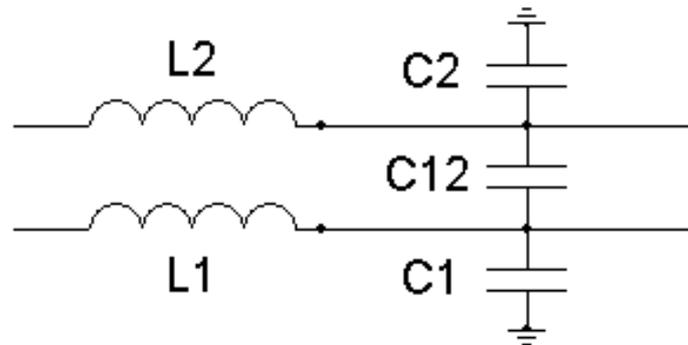


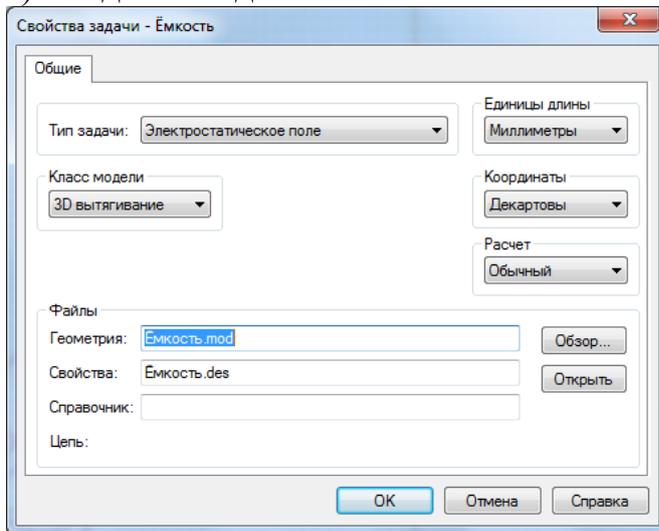
Рис. 11. Эквивалентная электрическая схема

Решение:

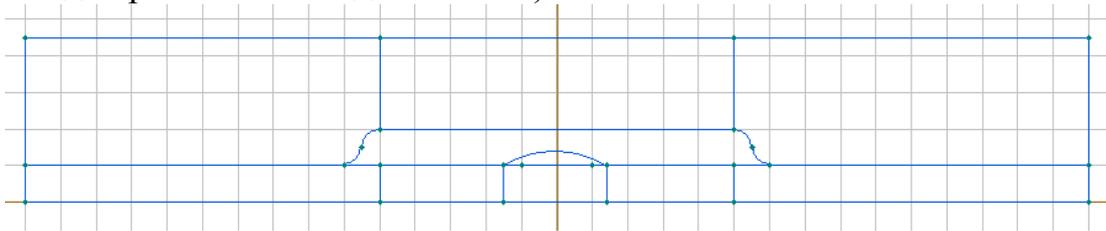
Чтобы определить взаимную емкость C12, необходимо отключить все источники напряжения и приложить к проводникам потенциалы разного знака. Моделирование в ELCUT позволяет получить распределение заряда q. Затем вычисляется емкость $C12 = q / (U2 - U1)$.

Последовательность выполнения практического задания №5.

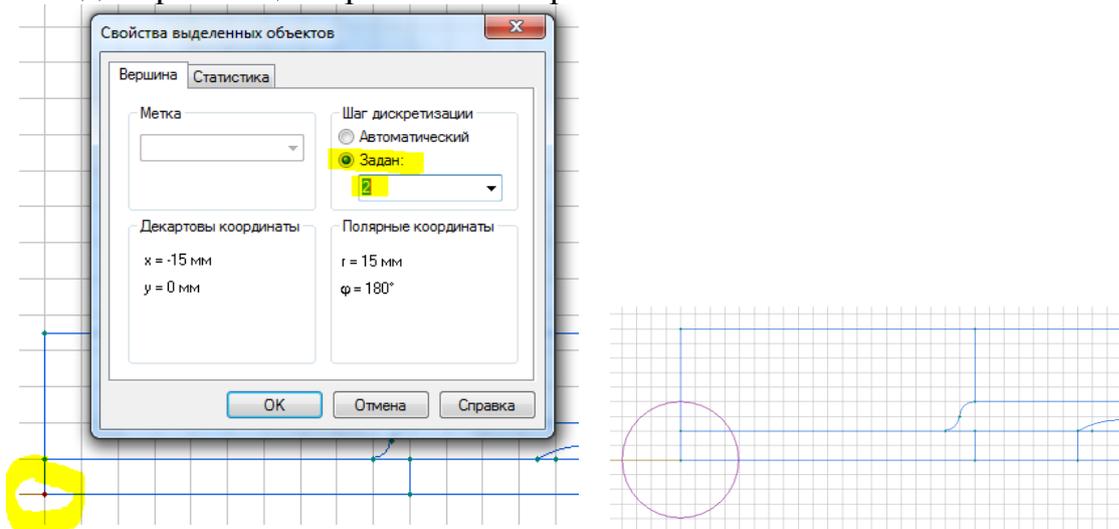
1) Создание задачи:



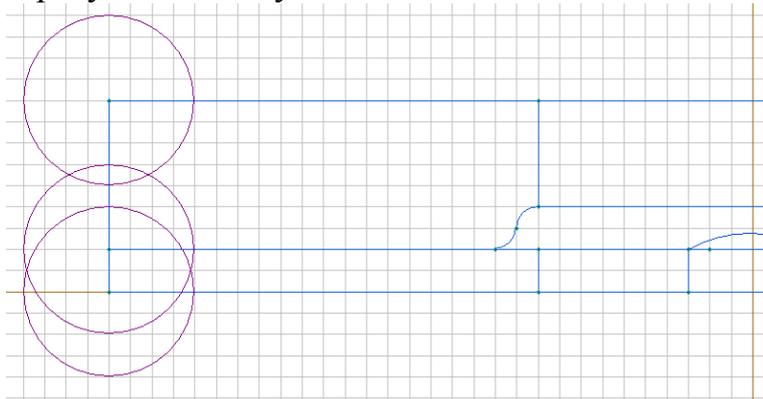
2) Разработка модели в сетке 1 мм (ширина подложки укорочена до 30 мм, т.к. для расчета этого достаточно):



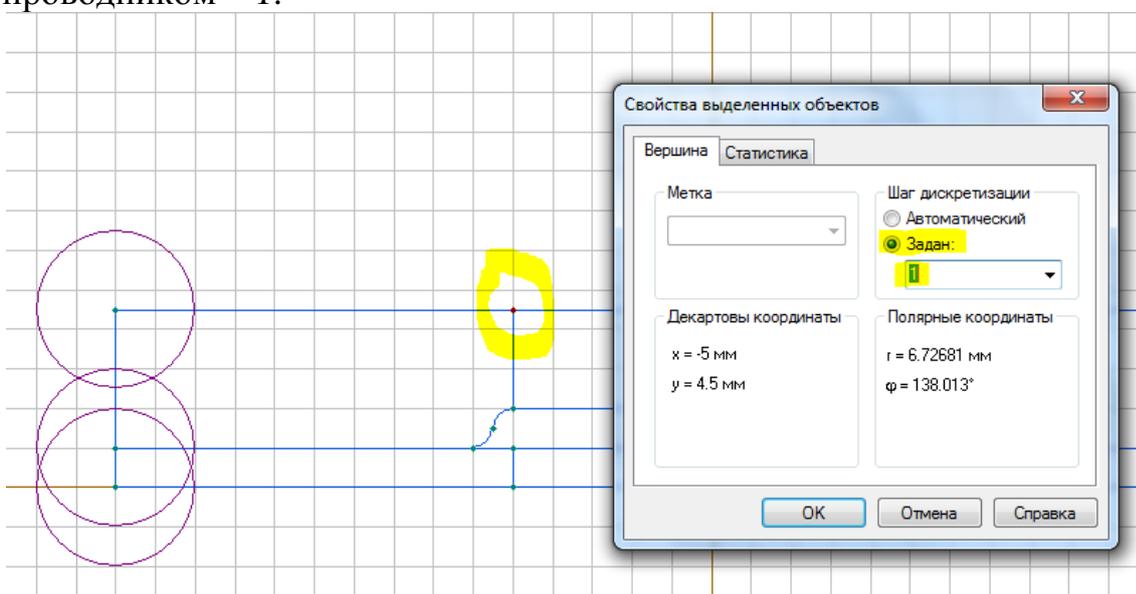
3) Изменить шаги дискретизации вершин для построения сетки. Шаг дискретизации трех левых вершин – 2мм:



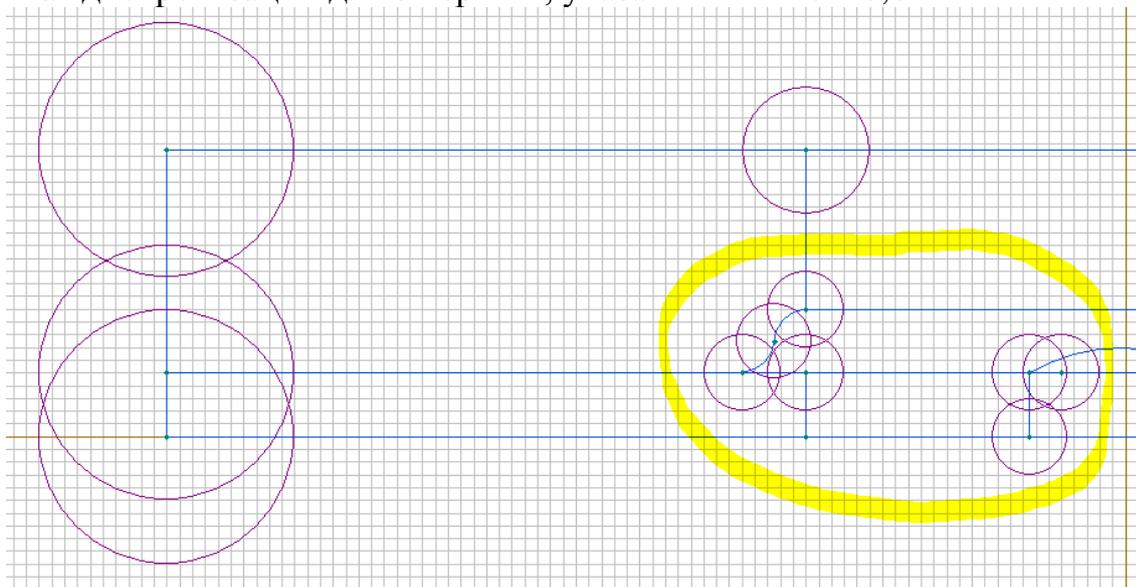
В результате получится:



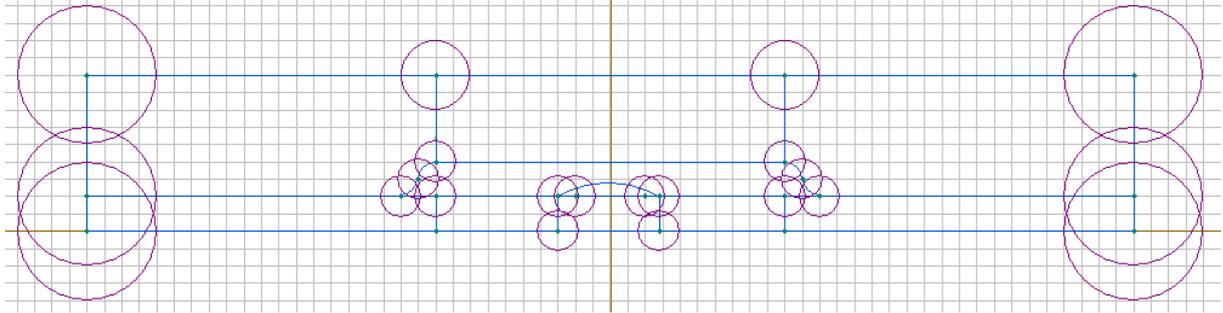
Шаг дискретизации вершины, расположенной над перпендикулярным проводником – 1:



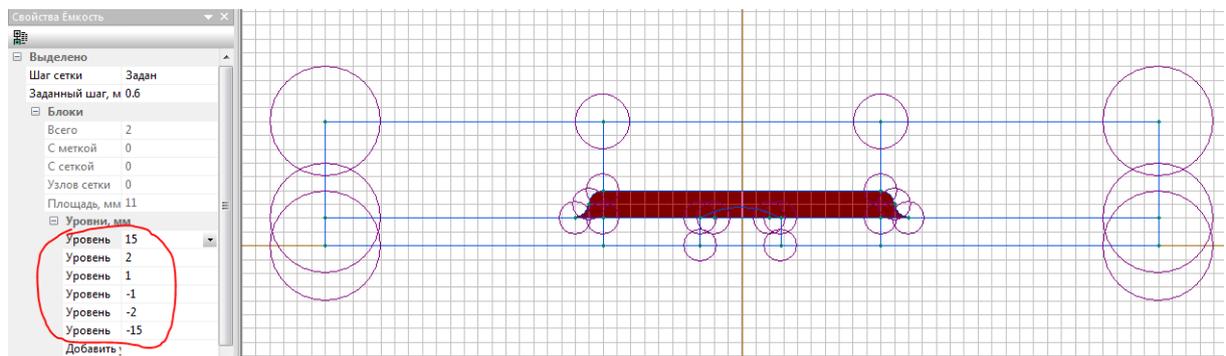
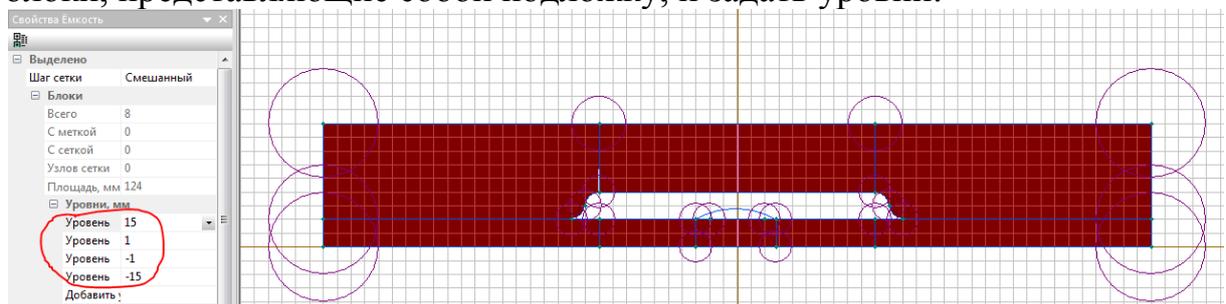
Шаг дискретизации для 7 вершин, указанных ниже – 0,6:



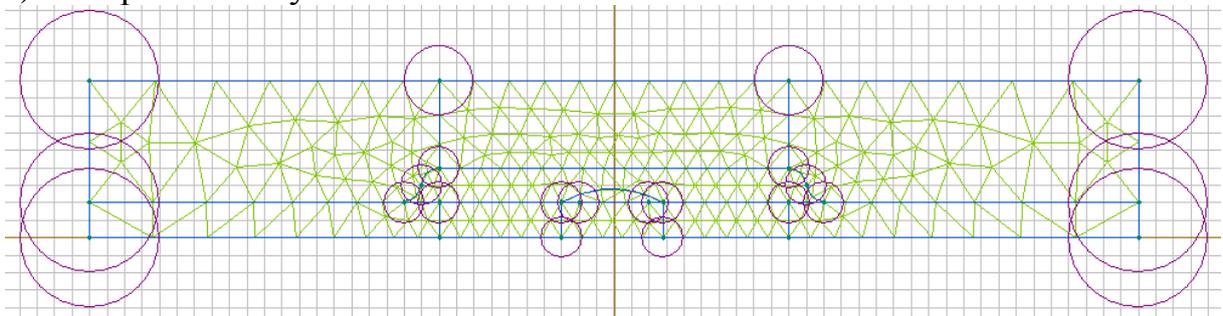
Аналогично установить шаги дискретизации в правой половине модели:



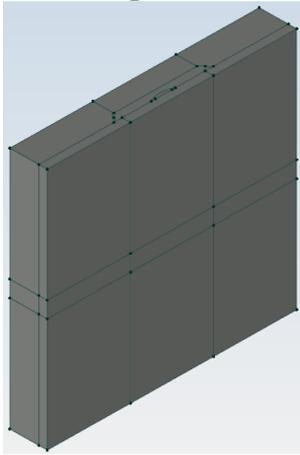
4) Выделить блоки, представляющие собой воздушное пространство и блоки, представляющие собой подложку, и задать уровни:



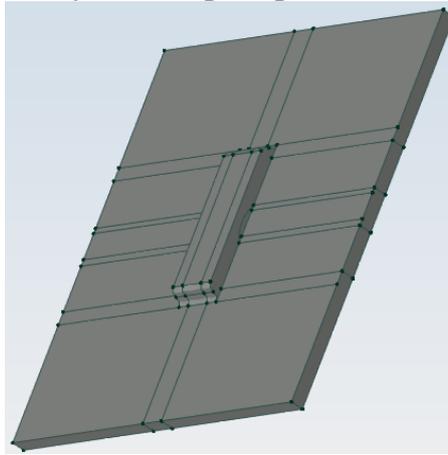
5) Построить сетку:



В результате получится 3D-изображение:



б) Скрыть 13 тел, представляющих воздушное пространство:



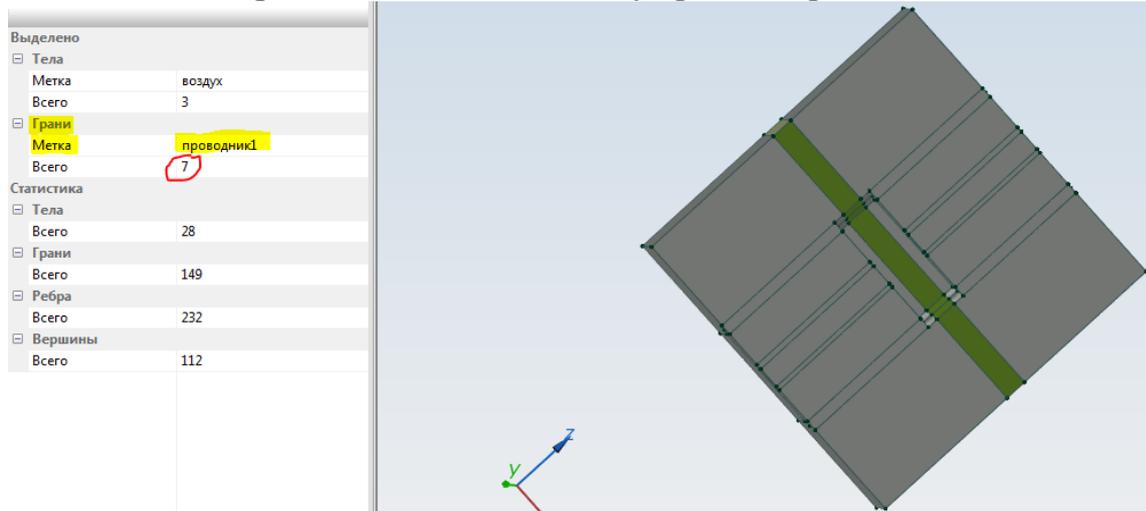
7) Выделить всё (21 тело) и назначить метку тел – подложка:

Свойства Емкость	
Выделено	
Тела	
Метка	подложка
Всего	21
Грани	
Метка	
Всего	120
Ребра	
Метка	(нет)
Всего	194
Вершины	
Метка	(нет)
Всего	96
Статистика	
Тела	
Всего	34
Грани	
Всего	169
Ребра	
Всего	254
Вершины	
Всего	120

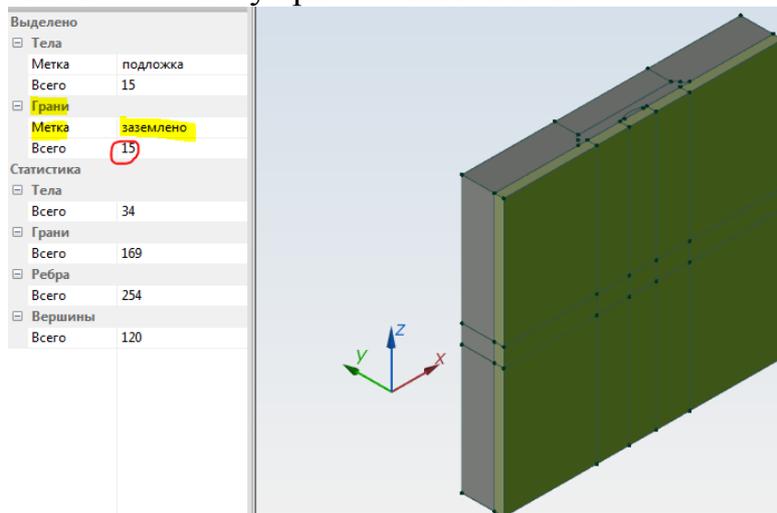
8) Остальным 13ти телам назначить метку - воздух:

Свойства Емкость	
Выделено	
Тела	
Метка	воздух
Всего	13
Грани	
Метка	
Всего	88
Ребра	
Метка	(нет)
Всего	158
Вершины	
Метка	(нет)
Всего	84
Статистика	
Тела	
Всего	28
Грани	
Всего	149
Ребра	
Всего	232
Вершины	
Всего	112

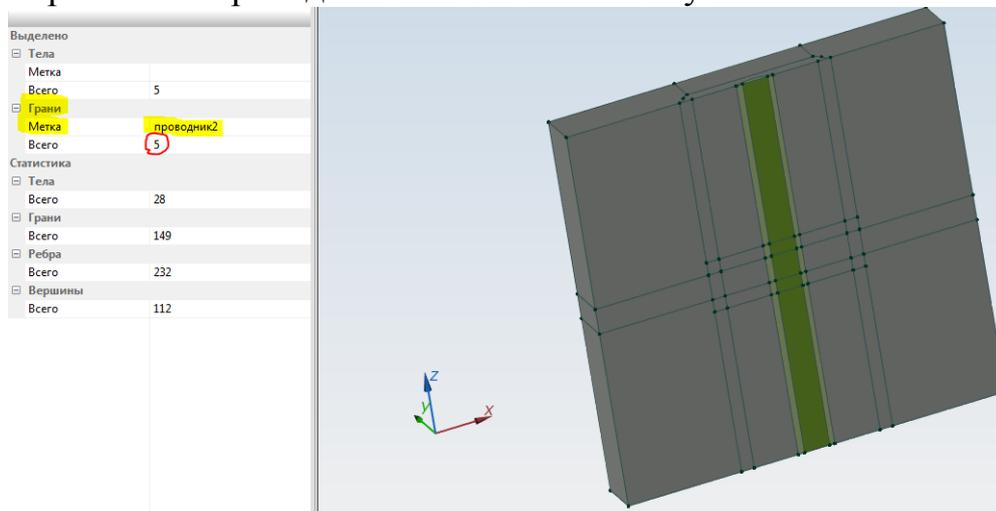
9) Выделить 7 граней и назначить метку грани – проводник1:



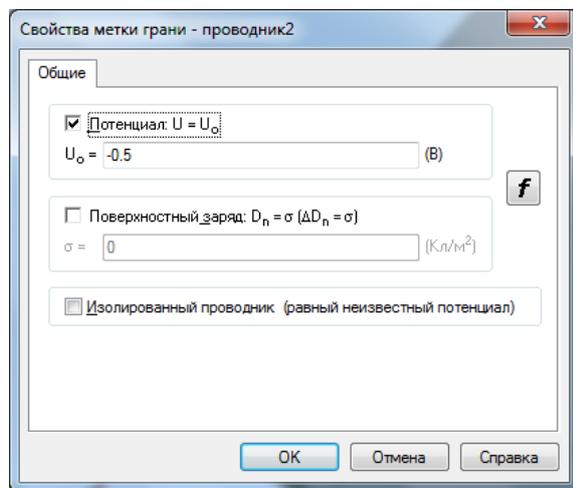
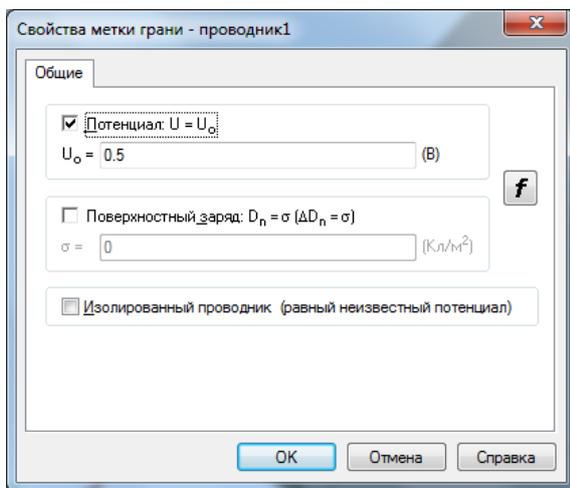
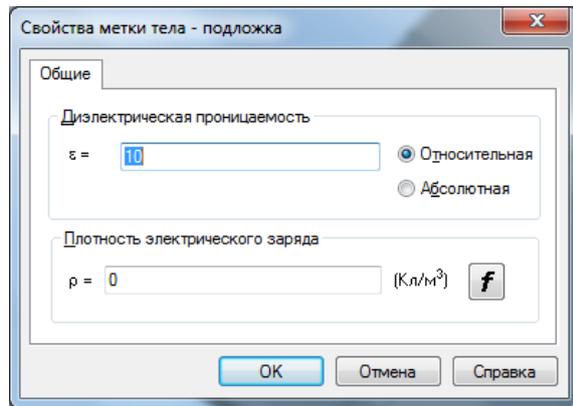
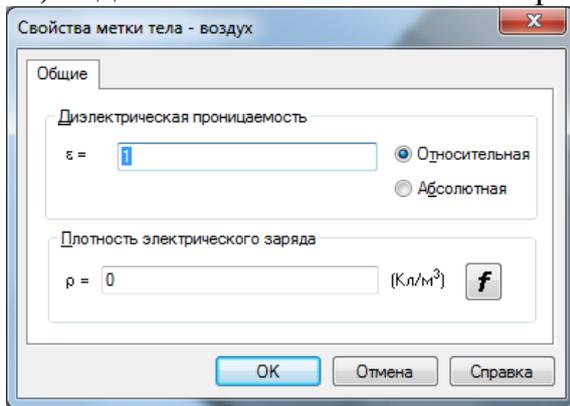
10) Показать все скрытое. Выделить снизу (на подложке) 15 граней и назначить метку грани – заземлено:



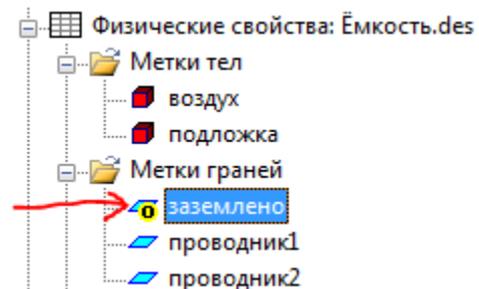
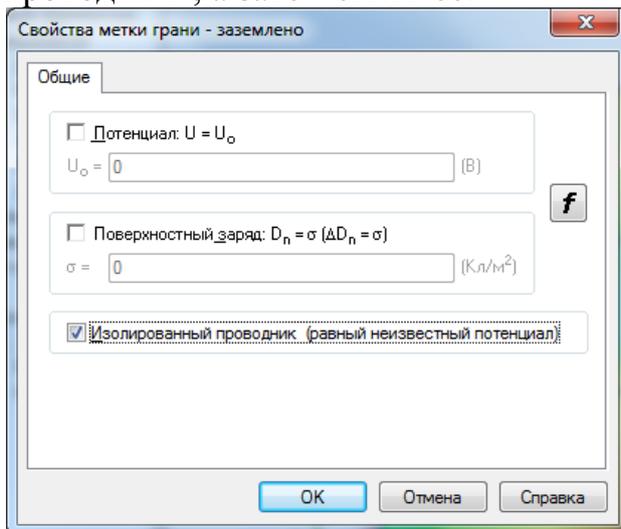
11) Не снимая выделения с предыдущих 15 граней – скрыть их. Выделить 5 граней 2го проводника и назначить метку:



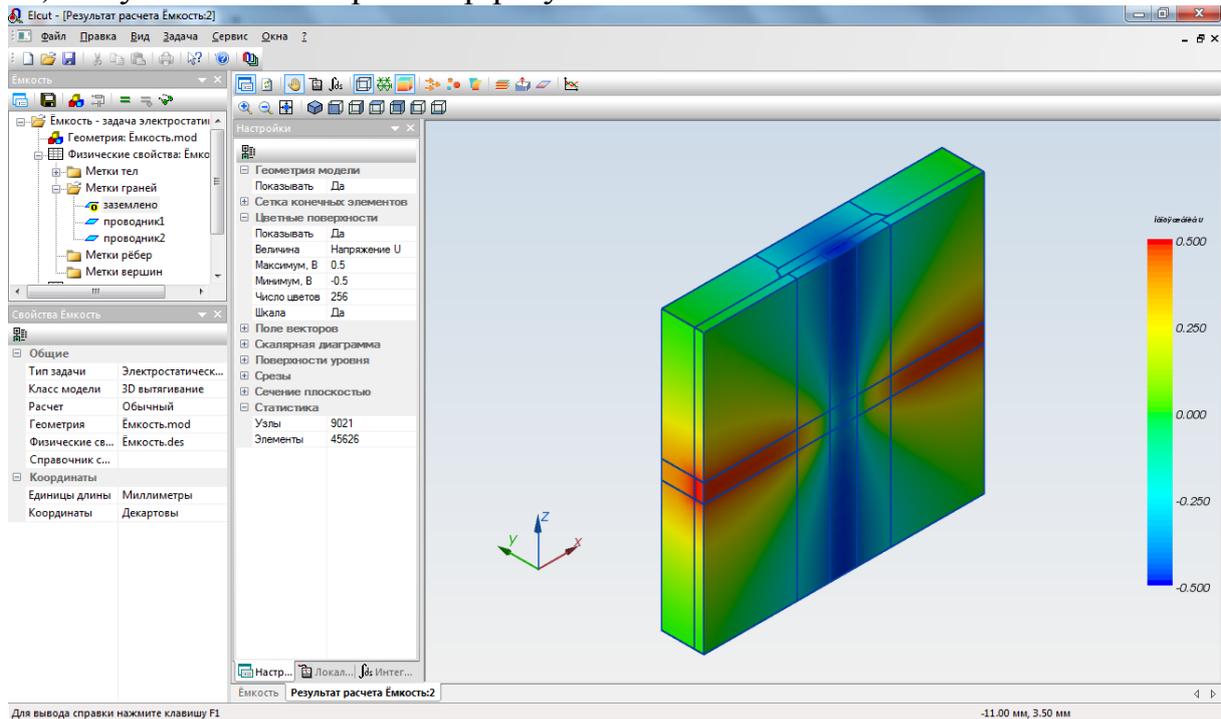
12) Задать свойства меток тел и граней:



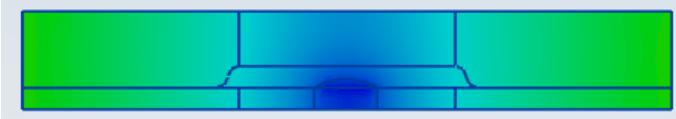
13) Для метки «заземлено» сначала установить галочку «Изолированный проводник», а затем снять ее.



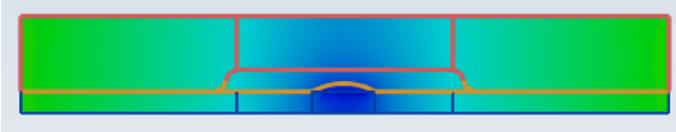
14) Запуск анализа. Просмотр результатов:



15) Отобразить вид сверху:



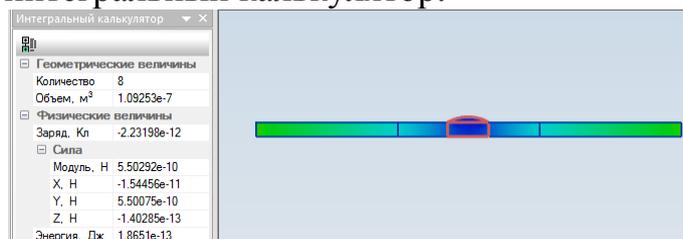
Выделить все объекты, кроме нижнего проводника:



Затем скрыть выделенные объекты:



Выделить нижний проводник с воздухом вокруг него и запустить интегральный калькулятор:



16) Рассчитать емкость C12. Результаты внести в отчет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате освоения изложенного материала студенты приобретут навыки работы в САЕ-системе ELCUT, в т.ч. научатся решать задачи следующих типов: расчет плоско-напряженного состояния, плоско-параллельная задача электростатики, осесимметричная нелинейная задача теплопроводности, осесимметричная совмещенная электротермическая задача и трехмерная задача электростатики. При выполнении задач разрабатываются двух- и трехмерные модели, что позволяет закрепить навыки моделирования деталей и сборочных единиц.

В ходе выполнения практических заданий студенты получают знания о методике решения задач в САЕ-системах, принципах построения сетки для выполнения расчетов методом конечных элементов и анализировать результаты автоматизированные расчетов. Полученные знания и навыки позволят выпускникам работать в организациях, занимающихся разработкой сложных конструкций электронных и других средств, при проектировании которых необходимо использование автоматизированных систем для решения инженерных задач. А также студенты приобретут следующие компетенции: способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования; готовность выполнять расчет и проектирование деталей, узлов и модулей электронных средств в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арбузов В. Н. Применение комплекса программ ELCUT для решения задач электростатики. Учебное пособие для студентов заочного отделения. – М.: МИЭЭ, 2008.
2. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.0. Руководство пользователя. – СПб: ООО «Тор», 2013.
3. Применение ELCUT. Типовые примеры [Электронный ресурс]: Сайт компании ООО «Тор». – Санкт-Петербург, [2016]. – Режим доступа: http://elcut.ru/advanced/stres1_r.htm.
4. Khebir A., Kouki A. B., Mittra R. An Absorbing boundary condition for Quasi-TEM Analysis of Microwave transmission line via the Finite Element Method // Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 1990.

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ

ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ

1945-1966 РЛПУ (кафедра радиолокационных приборов и устройств). Решением Советского правительства в августе 1945 г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945 г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленавешение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д.т.н., профессор С. И. Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956 г. – радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б.С. Мишин, доцент И.П. Захаров, доцент А.Н. Иванов.

1966–1970 КиПРЭА (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры). Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчивающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А.Н. Иванов.

1970–1988 КиПЭВА (кафедра конструирования и производства электронной вычислительной аппаратуры). Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям – автоматизация конструирования ЭВА и технология микрорелектронных

устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д.т.н., проф. В.В. Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г.А. Петухов.

1988–1997 МАП (кафедра микроэлектроники и автоматизации проектирования). Кафедра выпускала инженеров-конструкторов-технологов по микроэлектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микроэлектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988 г. по 1992 г. руководил проф. С.А. Арустамов, затем снова проф. Г.А. Петухов.

С 1996 г. кафедрой заведует д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

1997–2011 ПКС (кафедра проектирования компьютерных систем). Кафедра выпускала инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включала в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, дизайна и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовила специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

В 2009 и 2010 годах кафедра заняла второе, а в 2011 году – почетное первое место в конкурсе среди кафедр университета.

С **2011 ПБКС** (кафедра проектирования и безопасности компьютерных систем). Кафедра осуществляет подготовку бакалавров и магистров по направлениям 090900 «Информационная безопасность» (с 2013г. коды направления: для бакалавров 10.03.01, для магистров 10.04.01) и 211000 «Конструирование и технология электронных средств» (с 2013г. коды направления: для бакалавров 11.03.03, для магистров 11.04.03), а также продолжает подготовку инженеров по специальностям 090104 и 210202.

За время своего существования кафедра выпустила более 4650 инженеров, бакалавров и магистров. На кафедре защищено 70 кандидатских и 7 докторских диссертаций.

Романова Ева Борисовна, Евстропьев Сергей Константинович,
Кузнецов Александр Юрьевич

Практические задания в системе ELCUT

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати 24.11.2016

Заказ № 3784

Тираж 50 экз.

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49