

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(национальный исследовательский университет)»

**Совершенствование технологии электрохимической  
обработки деталей ГТД на основе компьютерного  
моделирования электрических полей в электролите**

Электронные методические указания  
к лабораторной работе

САМАРА  
2010

**Составители:** ИВЧЕНКО Алексей Викторович  
НЕХОРОШЕВ Максим Владимирович  
ПРОНИЧЕВ Николай Дмитриевич  
РАМЗАЕВА Елена Анатольевна  
СМЕЛОВ Виталий Геннадьевич  
СМИРНОВ Геннадий Владиславович

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности: 160301 «Авиационные двигатели и энергетические установки», изучающих курсы: «Технология производства АД и ЭУ», «Технология машиностроения», «Технологические методы обеспечения надежности деталей ГТД», «Информационные технологии», и в рамках магистерской программы «Интегрированные информационные технологии в авиадвигателестроении» по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов».

Методические указания разработаны на кафедре производства двигателей летательных аппаратов.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2010

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	4
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	8
<i>Структура графической оболочки ANSYS и принципы работы с ней</i> .....	11
<i>Порядок выполнения лабораторной работы</i> .....	15
<b>I. Задание свойств материала и типа элемента.....</b>	<b>16</b>
<b>II. Создание геометрической модели</b> .....	<b>19</b>
<b>III. Наложение на модель сетки конечных элементов.....</b>	<b>21</b>
<b>IV. Расчет.....</b>	<b>21</b>
<b>V. Анализ полученных результатов.....</b>	<b>23</b>
САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА.....	24
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ.....	24
<b>9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ</b> .....	<b>27</b>
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	28

Цель работы: на модели высокого уровня изучить закономерности распределения потенциалов в электрохимической ячейке и особенности анодного растворения поверхностей.

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение ресурса и надежности работы современных двигателей является важнейшей задачей. Для решения этой задачи, конструкторы идут, в первую очередь, по пути применения специальных жаропрочных и жаростойких сплавов для изготовления высоконагруженных деталей. Такое решение, в свою очередь, вызывает сложные технологические проблемы, связанные как с обрабатываемостью этих материалов, так и с возможностью получения высокого качества поверхностного слоя, который в значительной степени определяет прочностные характеристики деталей.

Все эти проблемы характерны в первую очередь для авиационного двигателестроения. Заметное место в их решении занимает электрохимическая обработка деталей ГТД. Для проектирования оптимальных технологий ЭХО перспективным направлением является использование компьютерных моделей высокого уровня для выбора наиболее выгодных режимов обработки.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Известно, что электролиты в расплавленном состоянии и в растворе проводят электрический ток. Они относятся к проводникам второго рода. Переносчиками электрических зарядов в электролитах являются положительные и отрицательные ионы, возникающие в результате диссоциации. Системы, состоящие из электродов, погруженных в электролиты, называют электролитическими ячейками или электролизерами. С электролитическими ячейками приходится иметь дело при электроосаждении металлов, при электролитическом

окислении и восстановлении веществ, в химических источниках тока, при рассмотрении коррозионных систем и т. д.

Электроды изготавливаются из материалов, являющихся проводниками электрического тока первого рода, т. е. из веществ, обладающих электронной проводимостью. Прохождение тока через поверхность раздела электрод-электролит как границу между двумя телами, обладающими разными типами проводимости, сопровождается протеканием электрохимической реакции, связанной на катоде с процессом восстановления, а на аноде с процессом окисления веществ. Это явление используется для осуществления различного рода реакций при электролизе, а в химических источниках тока – для превращения химической энергии в электрическую. Изучение материальных и энергетических превращений у электродной поверхности во время прохождения тока занимает значительное место в современной электрохимии.

Наличие электрической разности потенциалов между какими-либо точками в электролите, как в любом проводнике тока, возбуждает движение заряженных частиц-ионов, т. е. протекание электрического тока. Возникновение разности потенциалов в электрических ячейках обязано или внешнему источнику тока, подключенному к электродам, или же самопроизвольно протекающим электрохимическим реакциям на электродных поверхностях при условии электрического замыкания электродов с внешней цепью.

Протекание электрического тока через систему электроды-электролит вызывает как внутри электродов, так и внутри электролита электрические поля. Появление электрического поля в электролите неизбежно при проведении любого электрохимического процесса. Характер электрического поля в электролитических ячейках оказывает существенное влияние на протекание электролиза, на его основные технологические параметры. От того, как в системе распределяются ток и потенциал, зависит эффективность действия систем электрохимической защиты и материальный износ при коррозии металлов. В любой электрической ячейке от характера электрического поля зависят омическое сопротивление системы, напряжение на электродах, сила тока и другие показатели. Это делает проблему

электрических полей в электролитах важной как теоретически, так и практически.

Электрическое поле внутри любого проводника, в том числе и внутри электролита электролитических ячеек, характеризуется системой следующих дифференциальных уравнений:

$$\operatorname{div} \bar{D} = 0; \quad (1)$$

$$\bar{D} = \frac{\bar{E}}{\rho}; \quad (2)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = 0, \quad (3)$$

где  $D$  – плотность тока,  $A/m^2$ ;

$E$  – напряженность электрического поля,  $V/m$ ;

$\rho$  – удельное сопротивление электролита,  $\frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{см}}$ .

Уравнение (1) указывает на непрерывность линий тока и отсутствие внутри поля источников Э.Д.С. Это уравнение представляет собою обобщенную форму первого закона Кирхгофа в дифференциальной форме. Уравнение (2) отражает связь между напряженностью и плотностью тока. Оно известно как дифференциальное уравнение закона Ома. Наконец, уравнение (3) показывает, что поле постоянных токов имеет безвихревой характер и выражает второй закон Кирхгофа в дифференциальной форме. При этом уравнение (1) оказывается эквивалентным равенству

$$\bar{E} = -\operatorname{grad} V. \quad (4)$$

Совмещение равенств (2) и (4) позволяет записать дифференциальное уравнение закона Ома в виде

$$\bar{D} = -\frac{1}{\rho} \cdot \operatorname{grad} V, \quad (5)$$

где  $V$  – потенциал электрического поля,  $V$ .

Решение задач о распределении потенциала в электрическом поле в общем случае сводится к интегрированию совокупности дифференциальных уравнений (1), (2) и (3) при определенных граничных, или, как их еще называют, краевых условиях.

Из (1), (2) и (3) следует, что

$$\operatorname{div} \bar{D} = \operatorname{div} \frac{\bar{E}}{\rho} = \operatorname{div} \left( \frac{1}{\rho} \cdot \operatorname{grad} V \right) = 0.$$

В прямоугольной системе координат результирующее уравнение может быть записано в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) удельное сопротивление электролита  $\rho$  может зависеть от координат точки  $\rho(x,y,z)$ . В промышленных электролизерах, в системах антикоррозионной защиты аппаратов, а также во многих других случаях электролитических ячеек изменением удельного сопротивления электролита в процессе протекания тока, как правило, можно пренебречь и считать, что  $\rho = \text{const}$ . В этом случае уравнение (6) переходит в так называемое дифференциальное уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0. \quad (7)$$

Решение задач электрического поля в электролитах в большинстве случаев сводится к решению этого уравнения при соответствующих граничных условиях. Функции, удовлетворяющие уравнению Лапласа, носят название гармонических.

Получив решение задачи поля в виде выражения для потенциала  $V(x,y,z)$ , можно легко рассчитать все другие параметры электрического поля в электролизере. Так, например, для определения составляющих по координатным осям вектора плотности тока можно использовать соотношения

$$D_x = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial v}{\partial x}; \quad D_y = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial v}{\partial y}; \quad D_z = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial v}{\partial z}. \quad (8)$$

Модуль вектора плотности тока

$$|\bar{D}| = \sqrt{D_x^2 + D_y^2 + D_z^2}. \quad (9)$$

Составляющие вектора напряженности  $E$  и его модуль могут быть рассчитаны аналогично в соответствии с равенством (2). Плотность тока на электродной поверхности получается из соотношения

$$D_n = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial v}{\partial n}, \quad (10)$$

где  $n$  – нормаль к электроду.

Для вычисления удельной мощности  $\partial w / \partial q$  можно использовать соотношение

$$\frac{\partial w}{\partial q} = \rho D^2, \quad (11)$$

где  $w$  – энергия, выделяемая в объеме электролита, Дж;

$q$  – объем электролита, м<sup>3</sup>.

Поверхности равного потенциала, определяемые уравнением  $v(x,y,z)=const$ , называются эквипотенциальными. Кривые, касательные к которым совпадают с направлением вектора плотности тока, называются линиями тока. Линии, касательные к которым совпадают с градиентом потенциальной функции, носят название силовых линий. Линия тока и силовые линии совмещаются друг с другом, но, согласно (5), направлены в разные стороны. Эквипотенциальные поверхности и линии тока взаимно ортогональны. Если потенциал в поле зависит лишь от двух координат  $v(x,y)$ , то такое поле называют плоскопараллельным. Кривые, отвечающие уравнению  $v(x,y)=const$ , носят название эквипотенциальных линий. Обычно электрическое поле изображается совокупностью эквипотенциальных поверхностей (или линий) и линий тока. Чтобы отразить интенсивность поля, линии тока и эквипотенциальные поверхности (линии) размещают относительно друг друга определенным образом. Условились проводить число линий тока через квадратную единицу, перпендикулярную к ним, пропорционально численному значению вектора плотности тока. Эквипотенциальные поверхности проводят одну от другой на расстоянии, отвечающем заранее выбранной разности потенциалов. Электрическое поле более интенсивно на тех участках, где линии тока и эквипотенциальные поверхности подходят близко друг к другу.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для создания модели электрического поля рассмотрим осесимметричную обработку – электрохимическую прошивку

цилиндрического отверстия в детали из хромоникелевой стали. При реализации данного технологического процесса возникают значительные погрешности формы по глубине отверстия, а также вокруг него возникает растравливание поверхности и происходит неконтролируемое скругление входной кромки (рис. 1).

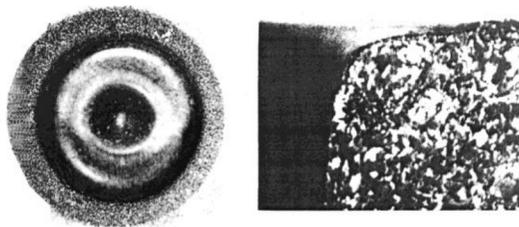


Рис. 1. Погрешности, возникающие при прошивке отверстия методом ЭХО

При моделировании необходимо обеспечить геометрическое и физико-химическое подобие модели. Для придания геометрического подобия модели рассечем рабочую зону электрохимической системы по оси электрода-инструмента (рис. 2). В этой плоскости выделяем область, ограниченную точками  $abO_1O$ , которая включает межэлектродный промежуток и прилегающую к нему зону. Такой прием позволяет перейти от трехмерного электрического поля к двумерному полю.

Размеры модели электрического поля определяются из условий подобия, которые позволяют экспериментально проверить адекватность модели. Так если межэлектродный промежуток  $a$  равен  $0,5$  мм, то для удобства в модели он принимается равным  $50$  мм.

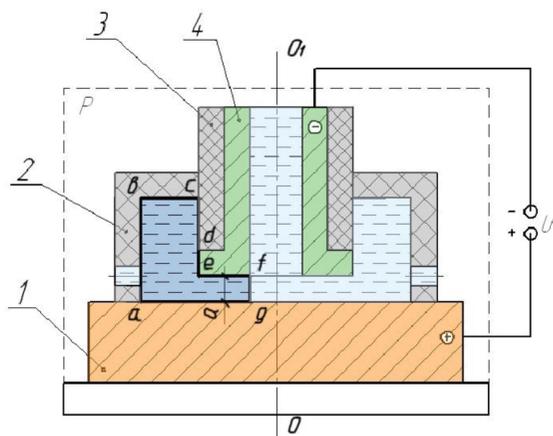


Рис. 2. Схема прошивки отверстия методом ЭХО: 1 – деталь (анод); 2 – камера поддавливания; 3 – изоляция; 4 – электрод-инструмент (катод); abcdefg – исследуемое электрическое поле

Компьютерное моделирование электрических полей с использованием программного комплекса ANSYS существенно упрощает анализ и дает более наглядную картину для определения основных закономерностей формирования потенциальных электрических полей и изучения их конфигурации. Исследуемое электрическое поле необходимо смоделировать для конфигурации, которая показана на рис. 3.

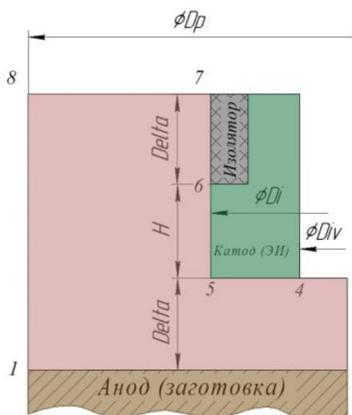


Рис. 3. Исходная схема для расчета потенциалов в программе ANSYS

### *Исходные данные*

$Dp=0,007$  – диаметр камеры подавливания, м;

$H=0,0005$  – высота буртика, м;

$Di=0,0024$  – внешний диаметр катода, м;

$Div=0,001$  – внутренний диаметр катода, м;

$Delta=0,0005$  – межэлектродный зазор, м.

Здесь линии 5-4, 5-6 – поверхности катода, 1-2 – поверхность анода, область, ограниченная точками (1,2,3,5,7,8) – электропроводящая среда (в реальной ЭХО-электролит, в настоящей модели область, на которую накладывается сетка для расчета методом конечных элементов), 6-7 – поверхность изолятора. По линиям 1-2, 5-4, 5-6 моделируемой области будут прикладываться нагрузки в виде электрического напряжения, поэтому граничный потенциал вдоль этих линий будет равен:

$\varphi_{1-2}=+16\text{ В}$  – анод (заготовка),

$\varphi_{4-12}=\varphi_{4-9}=0\text{ В}$  – катод (электрод инструмент)

По линии 6-7 моделируемая область граничит с диэлектриком, через эту границу не протекает ток, следовательно, в соответствии с законом Ома граничное условие можно записать так:  $\frac{d\varphi}{dx} = 0$ .

### *Структура графической оболочки ANSYS и принципы работы с ней*

Запуск программы осуществляется вызовом исполнительного файла LAUNCHER900.EXE через ярлык «ANSYS Product Launcher» в меню «Программы» (рис. 4).

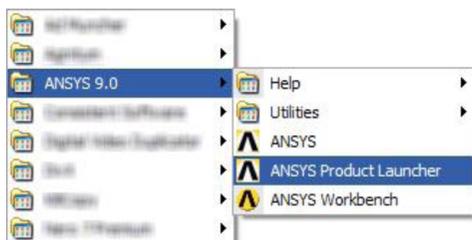


Рис. 4. Запуск программы ANSYS в среде ОС WINDOWS

В появившемся диалоговом окне (рис. 5) нужно выбрать среду моделирования (ANSYS), вид расчета (ANSYS Multiphysics – охватывает весь комплекс расчетов), а также вашу рабочую директорию (*важно:* для каждого нового проекта рекомендуется назначать отдельную папку, в названии и пути к которой не допускается использовать русские символы и пустые пробелы) и название проекта. Дополнительно в этом окне можно задать размер используемой физической и виртуальной памяти и настроить конфигурацию кластера для распределенных вычислений.

Кнопка «Run» запускает среду моделирования в соответствии с указанными выше параметрами.

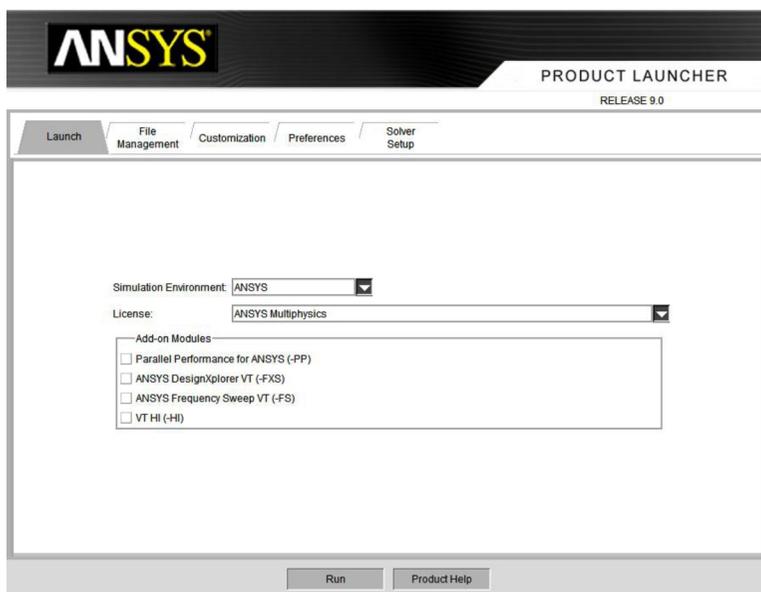


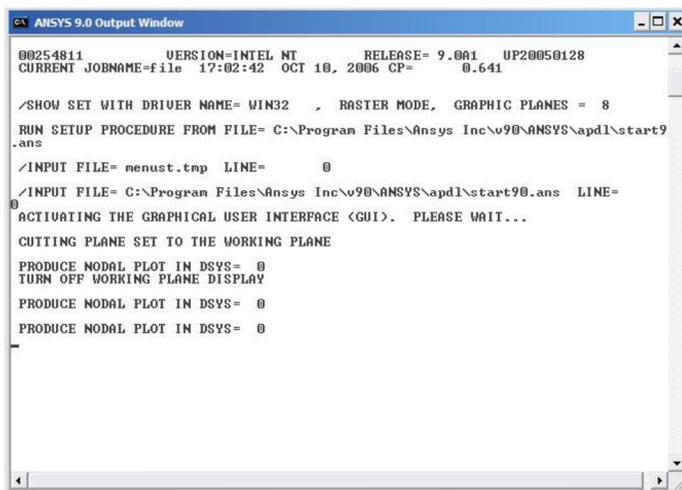
Рис. 5. Диалоговое окно ANSYS Product Launcher

**Примечание:**

1. Если указанная рабочая директория не существует, то при запуске программа предложит ее создать;
2. Если запуск пакета производить через ярлык «ANSYS», то диалога для указания рабочей папки не будет, и программа запустится либо с предыдущими настройками, либо автоматически

определяет рабочую папку профиля пользователя (если запуск ANSYS производится впервые).

Оболочка ANSYS состоит из двух частей: текстовой (рис. 6) и графической (рис. 7).



```
00254811          VERSION=INTEL NT          RELEASE= 9.001  UP20050128
CURRENT JOBNAME=file 17:02:42  OCT 10, 2006 CP=          0.641

/SHOW SET WITH DRIVER NAME= WIN32  ,  RASTER MODE,  GRAPHIC PLANES = 8
RUN SETUP PROCEDURE FROM FILE= C:\Program Files\Ansys Inc\090\ANSYS\apdl\start9
.ans
/INPUT FILE=  menust.tmp  LINE=          0
/INPUT FILE= C:\Program Files\Ansys Inc\090\ANSYS\apdl\start90.ans  LINE=
0
ACTIVATING THE GRAPHICAL USER INTERFACE <GUI>.  PLEASE WAIT...

CUTTING PLANE SET TO THE WORKING PLANE

PRODUCE MODAL PLOT IN DSYS= 0
TURN OFF WORKING PLANE DISPLAY

PRODUCE MODAL PLOT IN DSYS= 0
PRODUCE MODAL PLOT IN DSYS= 0
```

Рис. 6. Текстовая оболочка программы ANSYS

При работе с программой все команды – выбор пунктов меню, нажатие кнопок, ввод команд, выполнение процедур и задание численных значений – отображается в текстовом окне. Закрытие этого окна приводит к завершению работы программы в целом. Объяснение этому в следующем, в основе программы лежит язык программирования Fortran, и, создавая модель, вся информация записывается в виде программы в специальный файл, он отображается в текстовом окне. Графическая оболочка служит для удобства пользователя, не знакомого с языком программирования, используемого в ANSYS. При решении задачи ANSYS компилирует исходный текст введенной программы, в результате выдавая результат или ошибку. Если исходный текст отсутствует, то выполнение расчета становится невозможным и программа аварийно завершает работу.

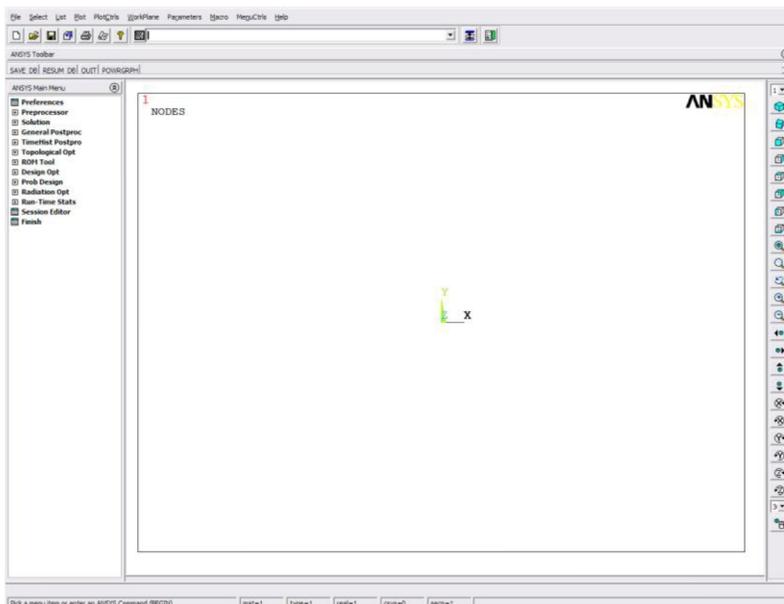


Рис. 7. Графическая оболочка программы ANSYS

Основное окно можно разделить на три области: «Меню Управления (М, меню)» – как в большинстве программ сверху, «Главное Меню (Д, дерево)» - слева в виде раскрывающегося списка и «Рабочая плоскость (Э, экран)» – в центре.

Как и любая CAE-система, ANSYS состоит из трех главных модулей: *Препроцессора*, где задаются начальные условия, геометрические и другие характеристики модели, нагрузки; *Решателя (Солвера)*, модуля, который рассчитывает модель и где можно редактировать нагрузки и параметры решаемой задачи; *Постпроцессора*, который позволяет отобразить результаты расчета в виде полей, графиков и таблиц.

Работу в программе можно вести тремя способами: а) пользуясь мышью и клавиатурой, выбирать нужные пункты меню и вводить данные; б) вводить специальные команды в строку, находящуюся в верхней части М; в) использовать оба метода. В пользу третьего способа выступает тот факт, что все действия пользователя записываются в log-файл в рабочей директории. Соответственно, содержимого этого файла достаточно, чтобы воспроизвести

выполненную работу частично или целиком. Данная процедура полезна в силу особенности ANSYS, в котором команда "Отмена последнего действия" отсутствует. В любом случае все действия будут отображаться на рабочей плоскости, а команды – в текстовом окне.

При работе с программой в рабочей директории создаются следующие файлы:

\*.log – список выполненных пользователем команд;

\*.db – база данных, в которую записывается геометрия модели и нагрузки;

\*.dbb(c) – предыдущий вариант базы данных ( $b=backup$ ,  $c=copy$ );

\*.err – файл ошибок.

Примечание. Файл базы данных может быть значительным по объему и достигать нескольких гигабайт. При этом следует помнить, что для ОС Windows: а) файл размером более 2 ГБ невозможно сохранить в файловой системе FAT или записать на DVD в системе ISO; б) файловая система FAT32 имеет ограничение на размер файла в 4 ГБ. Из-за этих ограничений следует работать на диске с файловой системой NTFS, а при записи больших файлов на DVD пользоваться программами-архиваторами и UDF-структурой диска.

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

Запускаем ANSYS по методике, описанной выше:

***Пуск→Программы→ANSYS 9.0→ANSYS Product Launcher.***

Выбираем среду моделирования ANSYS, вид расчета ANSYS Multiphysics.

Определяем местоположение рабочей папки (например, D:/USER/EHO) и название проекта *electrod* (рис. 8).

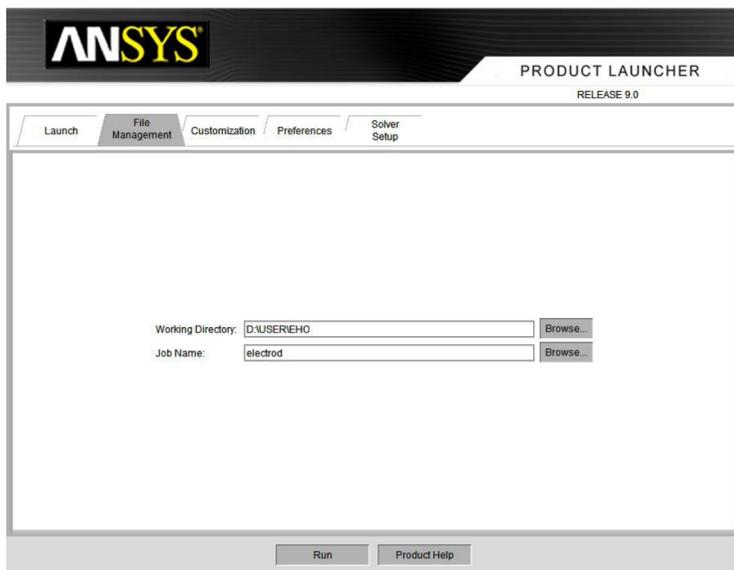


Рис. 8. Диалоговое окно для выбора рабочей папки и названия проекта

Запускаем ANSYS нажатием кнопки **RUN**.

Работаем в древовидном списке Д сверху вниз:

Подготовительный шаг. Убираем из списка ненужные пункты.

Выбираем электромагнитный расчет (рис. 9):

*Preferences*→*Electric*→*OK*

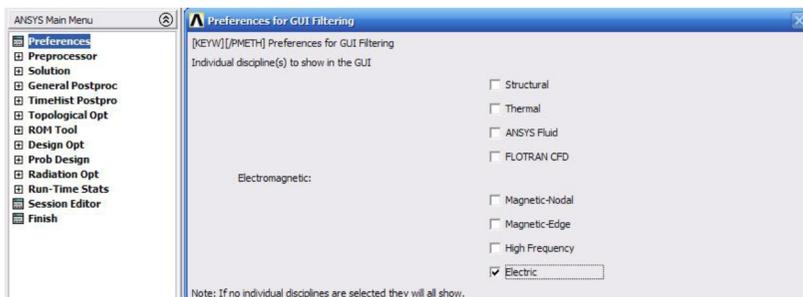


Рис. 9. Диалоговое окно для выбора типа расчета

## I. Задание свойств материала и типа элемента

Переходим в Препроцессор.

Задаем тип конечного элемента (рис. 10 и рис. 11):

## *Element Type→Add/Edit/Delete:*

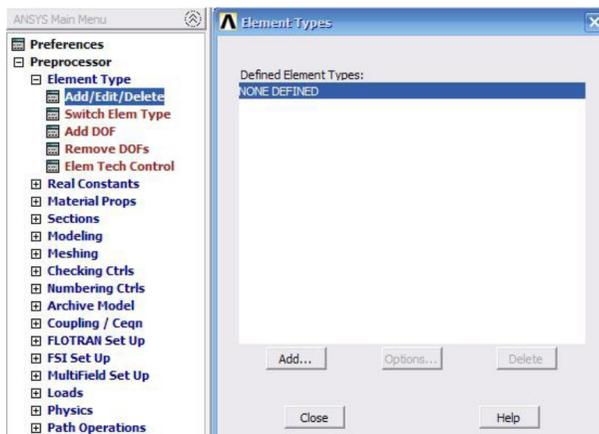


Рис. 10. Диалоговое окно для добавления, редактирования и удаления типа элемента

## *...Add→Elec Conduction→2D Quad 230→OK→Close:*

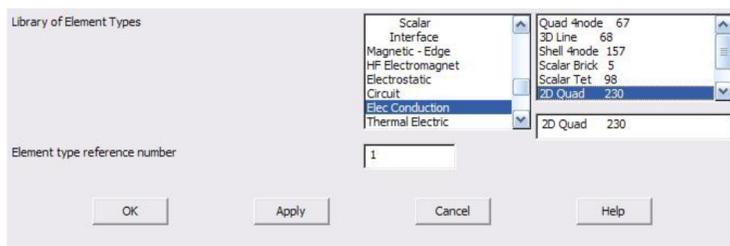


Рис. 11. Диалоговое окно выбора типа элемента

Таким образом, нами был выбран плоский, состоящий из восьми узлов, основанный на токах электрический элемент. Элемент имеет одну степень свободы, напряжение, на каждом узле. 2D Quad 230 хорошо подходит для моделей с криволинейными границами. Его используют для последующего низкочастотного анализа электрического поля: установившейся электрической проводимости и др.

Задаем свойства материала (рис. 12 и рис. 13). Характеристикой электролита необходимой для расчета в программе ANSYS является значение удельного сопротивления. В справочниках для электролитов приводится величина удельной проводимости, в ANSYS можно

задать лишь удельное сопротивление материала. Для 20% раствора NaCl удельная проводимость равна  $0,1957 \text{ (Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1})$ , при  $18^\circ\text{C}$ . Если переводить в СИ, то удельное сопротивление будет равно

$$\frac{1}{0,1957 \cdot 100} = 0,051 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Итак,  $R_0 = 0,051 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$

### Material Props → Material Models:

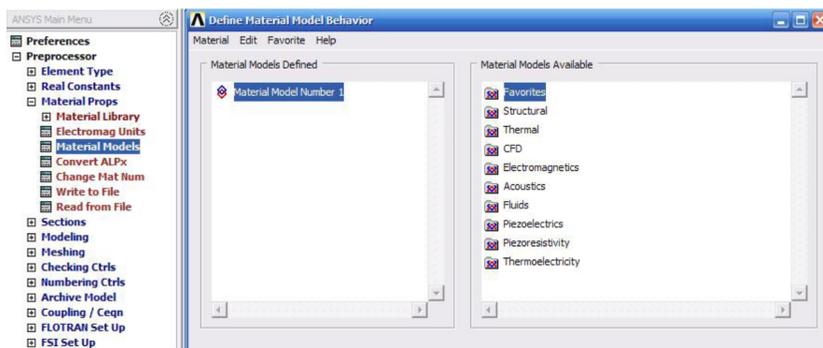


Рис. 12. Диалоговое окно выбора свойств материала

Слева – порядковый номер материала (в нашем случае один материал), справа – его характеристики.

**Electromagnetics → Resistivity → Constant** (удельное сопротивление электролита, одинаково по всем осям x-y):

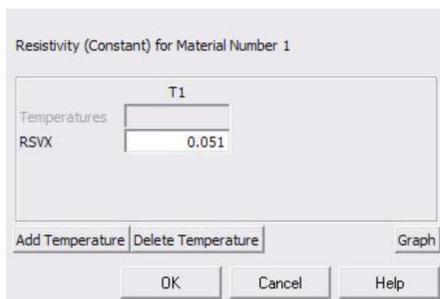


Рис. 13. Диалоговое окно для выбора удельного сопротивления электролита

## II. Создание геометрической модели

Создаем геометрическую модель процесса электрохимической прошивки отверстий.

Строим точки с указанными координатами на рабочей плоскости (табл. 1). Значения вводятся в метрах.

Таблица 1

Координаты точек модели прошивки отверстия методом ЭХО, м

№	1	2	3	4	5	6	7	8
x	-0,0035	0	0	-0,0005	-0,0012	-0,0012	-0,0012	-0,0035
y	0	0	0,0005	0,0005	0,0005	0,0010	0,0015	0,0015

*Modeling*→*Create*→*Keypoints*→*In Active CS*:



Рис. 14. Диалоговое окно для ввода координат точек

Вводим номер точки и ее координаты (рис. 14). При этом нулевую координату допускается не указывать. Нажимаем **APPLY**, чтобы вывести точку на экран. Данная процедура повторяется для всех восьми точек.

Чтобы отобразить номера точек и линий, заходим в меню управления *PlotCtrls*→*Numbering*, и отмечаем там пункты *Keypoint Number* и *Line Number* (рис. 15).

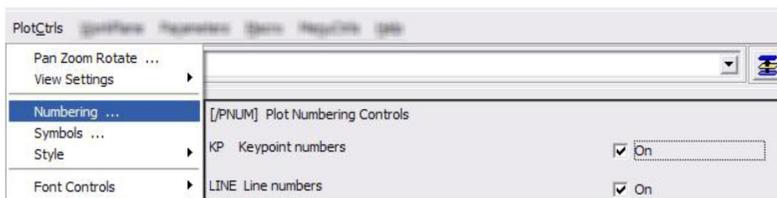


Рис. 15. Диалоговое окно отображения элементов

Соединяем полученные точки линиями (рис. 16) в следующей последовательности: точки 1-2; 2-3; 3-4; 4-5; 5-6; 6-7; 7-8; 8-1.

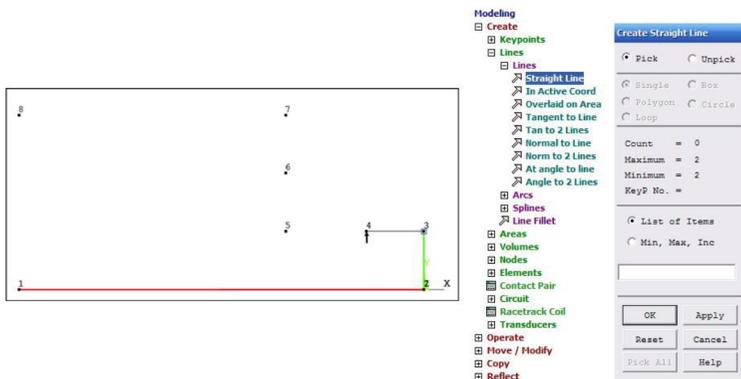


Рис. 16. Диалоговое окно отображения элементов

Создаем на основе полученного контура поверхность (рис. 17).  
**Create**→**Areas**→**Arbitrary**→**By Lines**

Выбираем опцию замыкания линий **LOOP** и выбираем любую из контура.

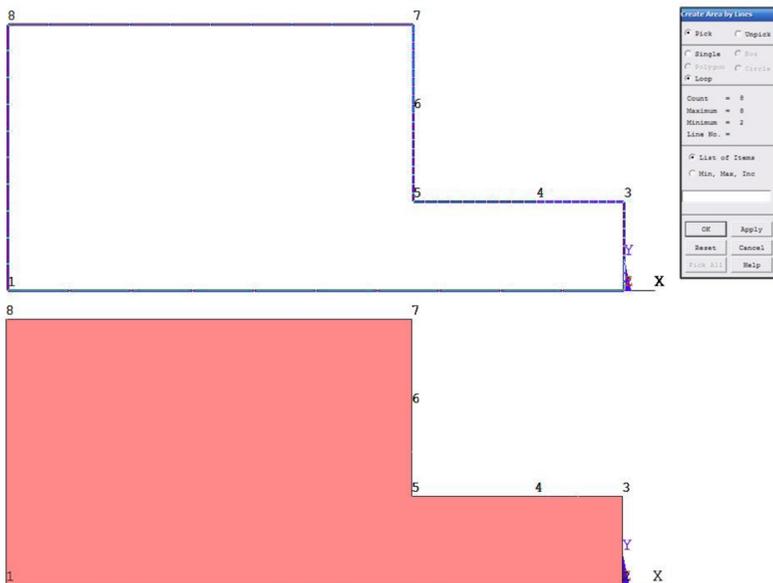


Рис. 17. Построение из контура поверхности

### III. Наложение на модель сетки конечных элементов

В ANSYS существует несколько методов разбиения модели на конечные элементы. В данной лабораторной работе будем использовать ручной метод для построения свободной сетки.

Предварительно необходимо задать размер ячейки (рис. 18). В нашем случае наиболее оптимальным размером будет  $0,0001$  м.

*Meshing*→*Size Cntrls*→*ManualSize*→*Global*→*Size*:

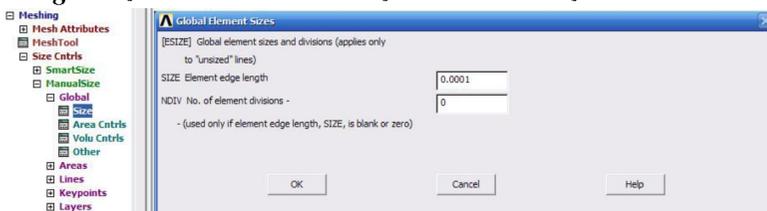


Рис. 18. Диалоговое окно для задания размера конечных элементов

Затем производим деление поверхности на конечные элементы (рис. 19).

*Meshing*→*Mesh*→*Areas*→*Free*:

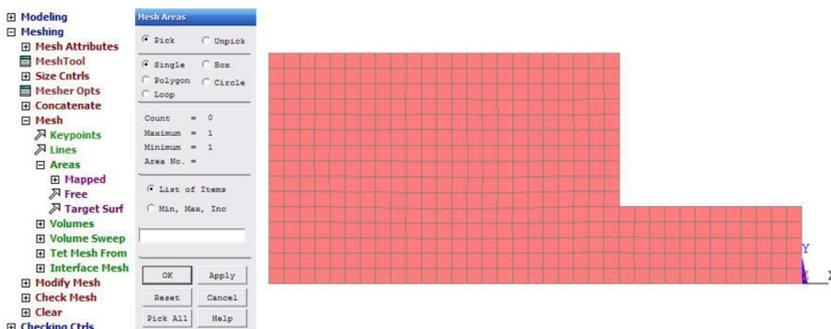


Рис. 19. Разбиение поверхности на конечные элементы

### IV. Расчет

Переходим в «Решатель».

Задаем известные нам начальные условия (рис. 20). В нашем случае ими являются напряжение на аноде (линия 1-2), равное  $16$  В и напряжение на катоде (линии 4-5 и 5-6), равное  $0$  В.

***Solution***→***Define Loads***→***Apply***→***Electric***→***Boundary***→  
→***Voltage***→***On Lines***

В начале приложим напряжение к катоду. Для этого отмечаем линии 4-5 и 5-6, нажимаем **Apply** и в следующем окне (рис. 21) вводим напряжение равное  $0\text{ В}$ . Аналогично прикладываем напряжение и к аноду.

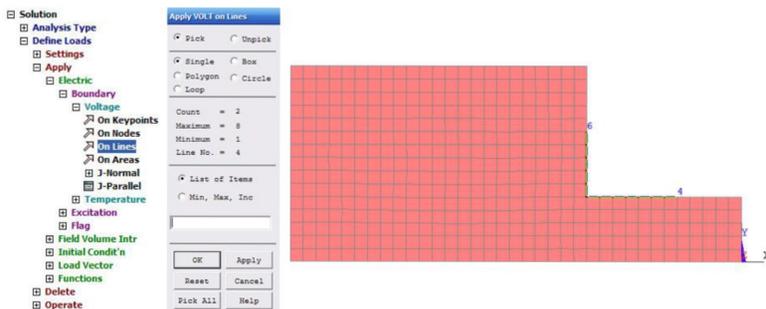


Рис. 20. Приложение к катоду напряжений

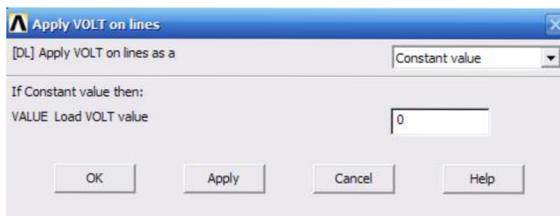


Рис. 21. Диалоговое окно для ввода значений напряжения

Переходим к решению задачи: определению распределения потенциалов в электролите:

***Solve***→***Current LS***→***OK***.

Если в ходе решения не было ошибок, то появится окно "Solution is done!" (рис. 22), после чего можно приступить к просмотру результатов расчета.



Рис. 22. Окно, показывающее успешное завершение расчета

## V. Анализ полученных результатов

Переходим в Постпроцессор.

Для просмотра распределения потенциалов в модели выполним следующее (рис. 23):

**General Postproc**→**Plot Result**→**Contour Plot**→**Nodal Solu:**

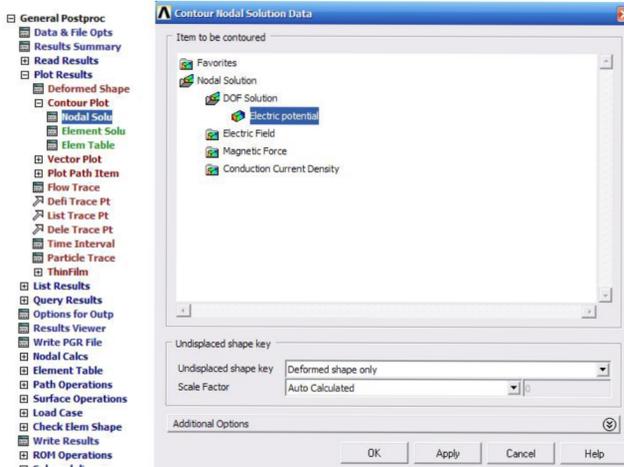


Рис. 23. Диалоговое окно для ввода значений напряжения

В результате будет сгенерирована картина распределения потенциалов в области модели (рис. 24).

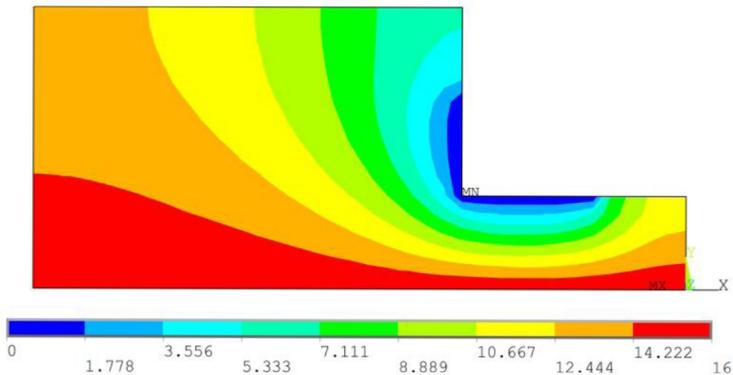


Рис. 24. Распределение потенциалов в межэлектродном зазоре и прилегающей области

## САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Данная лабораторная работа выполняется подгруппой состоящей из двух студентов, каждый из которых сидит за своим рабочим местом. На подгруппу выдается задание, содержащее в себе индивидуальную задачу для каждого из студентов подгруппы. Эти задачи будут отличаться друг от друга изменением только одной величины, влияющей на картину распределения потенциалов.

Студенты производят расчет своих задач, по методике описанной выше. После чего у каждого из них получается своя картина распределения потенциалов в межэлектродном зазоре.

На основании полученных результатов, студенты оформляют индивидуальный бланк отчета.

Бланк должен содержать следующие пункты:

1. Название и цель лабораторной работы;
2. Схема для расчета потенциалов в программе ANSYS, со всеми геометрическими размерами;
3. Таблица координат точек модели прошивки;
4. Графики зависимостей изменяемых величин на распределение потенциалов (у каждого варианта свой график);
5. Выводы по работе.

## ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

### *Вариант I*

Геометрические параметры модели:

$$D_p = 0,009 \text{ м};$$

$$H = 0,0006 \text{ м};$$

$$D_i = 0,0022 \text{ м};$$

$$D_{iv} = 0,001 \text{ м};$$

$$\Delta = 0,0005 \text{ м}.$$

Удельное сопротивление электролита (20% раствор NaCl при  $t = 18^\circ\text{C}$ ):

$$R_0 = 0,051 \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Граничные условия:

Потенциалы на катоде:  $\varphi_{4-12} = \varphi_{4-9} = 0 \text{ В}$ ;

1 студент:

Потенциал на аноде:  $\varphi_{1-2} = +14 \text{ В}$ .

2 студент:

Потенциал на аноде:  $\varphi_{1-2} = +20 \text{ В}$ .

### ***Вариант II***

Геометрические параметры модели:

$Dp = 0,007 \text{ м}$ ;

$H = 0,0005 \text{ м}$ ;

$Di = 0,0022 \text{ м}$ ;

$Div = 0,001 \text{ м}$ .

1 студент:

$\Delta = 0,0005 \text{ м}$ .

2 студент:

$\Delta = 0,0003 \text{ м}$ .

Удельное сопротивление электролита (20% раствор NaCl при  $t = 18^\circ\text{C}$ ):

$R_0 = 0,051 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Граничные условия:

Потенциалы на катоде:  $\varphi_{4-12} = \varphi_{4-9} = 0 \text{ В}$ ;

Потенциал на аноде:  $\varphi_{1-2} = +17 \text{ В}$ .

### ***Вариант III***

Геометрические параметры модели:

$Dp = 0,009 \text{ м}$ ;

$H = 0,0005 \text{ м}$ ;

$Di = 0,0022 \text{ м}$ ;

$Div = 0,001 \text{ м}$ ;

$\Delta = 0,0005 \text{ м}$ .

1 студент:

Удельное сопротивление электролита (5% раствор KCl при  $t = 18^\circ\text{C}$ ):

$R_0 = 0,1449 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

2 студент:

Удельное сопротивление электролита (20% раствор KCl при  $t=18^{\circ}\text{C}$ ):

$$R_0=0,0374 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Граничные условия:

$$\text{Потенциалы на катоде: } \varphi_{4-12}=\varphi_{4-9}=0 \text{ В;}$$

$$\text{Потенциал на аноде: } \varphi_{1-2}=+15 \text{ В.}$$

### ***Вариант IV***

Геометрические параметры модели:

$$Dp=0,009 \text{ м;}$$

$$H=0,0005 \text{ м;}$$

$$Di=0,0022 \text{ м;}$$

$$Div=0,001 \text{ м;}$$

$$Delta=0,0005 \text{ м.}$$

1 студент:

Удельное сопротивление электролита (15% раствор  $\text{CuSO}_4$  при  $t=13,8^{\circ}\text{C}$ ):

$$R_0=1,89 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

2 студент:

Удельное сопротивление электролита (15% раствор  $\text{CuSO}_4$  при  $t=14,8^{\circ}\text{C}$ ):

$$R_0=1,80 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Граничные условия:

$$\text{Потенциалы на катоде: } \varphi_{4-12}=\varphi_{4-9}=0 \text{ В;}$$

$$\text{Потенциал на аноде: } \varphi_{1-2}=+16 \text{ В.}$$

### ***Вариант V***

Геометрические параметры модели:

$$H=0,0004 \text{ м;}$$

$$Di=0,002 \text{ м;}$$

$$Div=0,001 \text{ м;}$$

$$Delta=0,0004 \text{ м.}$$

1 студент:

$$Dp=0,007 \text{ м;}$$

2 студент:

$$Dp=0,009 \text{ м.}$$

Удельное сопротивление электролита (15% раствор  $\text{CuSO}_4$  при  $t=13,8^\circ\text{C}$ ):

$$R_0=1,89 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Граничные условия:

$$\text{Потенциалы на катоде: } \varphi_{+12}=\varphi_{+9}=0 \text{ В;}$$

$$\text{Потенциал на аноде: } \varphi_{1-2}=+17 \text{ В.}$$

### ***Вариант VI***

Геометрические параметры модели:

$$Dp=0,007 \text{ м;}$$

$$H=0,0005 \text{ м;}$$

$$Div=0,001 \text{ м;}$$

$$Delta=0,0005 \text{ м.}$$

1 студент:

$$Di=0,0024 \text{ м.}$$

2 студент:

$$Di=0,0022 \text{ м.}$$

Удельное сопротивление электролита (5% раствор  $\text{KCl}$  при  $t=18^\circ\text{C}$ ):

$$R_0=0,1449 \text{ Ом}\cdot\text{м.}$$

Граничные условия:

$$\text{Потенциалы на катоде: } \varphi_{+12}=\varphi_{+9}=0 \text{ В;}$$

$$\text{Потенциал на аноде: } \varphi_{1-2}=+15 \text{ В.}$$

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какое уравнение указывает на отсутствие внутри поля источников Э.Д.С?
2. Какими уравнениями характеризуется электрическое поле внутри электролита?
3. Какие методы борьбы с растравливанием поверхности существуют?
4. От чего зависит эффективность действия систем электрохимической защиты?

5. Какие поверхности называются эквипотенциальными?
6. Что такое плоскопараллельное поле?
7. Что такое электролизер?
8. Вследствие чего возникает погрешность формы и растравливание поверхности вокруг отверстия при электрохимической прошивке?
9. Назовите три главных модуля программного комплекса ANSYS.
10. Какое явление используется для осуществления реакций при электролизе?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гнусин Н.П., Поддубный Н.П., Маслий А.И. Физическая и математическая постановка задачи об электрических полях в электролитах // Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах. - Новосибирск: Наука, 1972.
2. Седыкин Ф.В. Размерная электрохимическая обработка деталей машин – М.: Машиностроение, 1976.
3. Сенина О.А. Влияние состава электролита на выделение газов и их проникновение в поверхностный слой титановых сплавов // Электрохимическая обработка деталей авиадвигателей: Межвуз. сб. Вып.1. - Куйбышев, 1974.
4. Шманев В.А. и др. Электролит для электрохимической обработки титановых сплавов. Авт. свид. Ф547321 кл. В23р1/16 // Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. - 1977. - № 7.
5. Сенина О.А. и др. Электрохимическая обработка титанового сплава ВТ22 без наводораживания поверхностного слоя: Тез. докл. конф. «Применение электрохимических и электрофизических методов обработки». - Пермь, 1976.
6. Головачев В.А. и др. Электрохимическая размерная обработка деталей сложной формы. - М.: Машиностроение, 1969. – 200 с.
7. Петров Ю.Н. и др. Особенности формирования погрешностей при электрохимической размерной обработке импульсными токами // Электронная обработка металлов. - 1974. - № 5.
8. Беляев М.А., Филимошин В.Г. К вопросу об исследовании технологических параметров способа локализации процесса ЭХО

- при катодной защите // Электрохимическая обработка: Сб. Вып. 63. - Куйбышев, 1976.
9. Дмитриев Л.Б. Исследования влияния некоторых факторов на точность геометрической формы при размерной электрохимической обработке // Технология машиностроения / ТПИ. - Вып.21. - Тула, 1971.
  10. Дмитриев Л.В. Технологические основы повышения точности размерной электрохимической обработки: Докторская диссертация. - Тула, ТПИ. 1975.-403с.
  11. Корчагин Г.Н., Макаров В.А. Повышение точности электрохимического формообразования длинномерных деталей // Электронная обработка материалов. - 1974. - № 3.
  12. Филимошин В.Г., Беляев М.А., Симонов В.И. Исследование влияния катодной защиты на технологические характеристики электрохимической размерной обработки в проточном электролите // Электрохимические методы обработки сплавов и вопросы технологии авиадвигателестроения/ КуАИ. - Вып.47. - Куйбышев, 1971.