

М.Г. Киселев,  
А.В. Дроздов,  
А.К. Тявловский,  
С.Г. Мониц

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ НА РАБОТУ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА

УДК 621.7-4

Статья посвящена исследованию влияния режимов и условий электроконтактной обработки поверхности образцов металлических имплантатов на работу выхода электрона (РВЭ), которая определяется компенсационным методом путем измерения контактной разности потенциалов (КРП). Получены экспериментальные данные, отражающие влияние режимов и условий обработки на РВЭ, в частности, установлено, что для получения поверхности металлического имплантата с высоким уровнем поверхностной энергии электроконтактную обработку необходимо осуществлять при напряжении 100 В и выполнять ее на воздухе.

The article is devoted the influence of modes and conditions of surface electrocontact discharge machining samples of metallic implants on the electron work function (RWE), which is determined by the compensation method by measuring the contact potential difference. Experimental data are reflecting the effect of the modes and processing conditions on RWE in particular found that for metallic implant surface with high surface energy electrocontact discharge machining must be carried out at a voltage of 100 V and treatment should be carried out in air.

### Введение

Одним из условий эффективного протекания процесса интеграции имплантата в организме человека является обеспечение оптимальных параметров микрорельефа его поверхности [1]. В настоящее время эта задача технологически решается, как правило, за счет модификации поверхности металлического имплантата путем ее пескоструйной или дробеструйной обработки.

Однако эти способы механической обработки в силу присущих им технологических ограничений характеризуются узким диапазоном изменения параметров микрорельефа обработанной (модифицированной) поверхности, что сужает область определения их оптимальных значений.

В этом плане значительно большими технологическими возможностями обладает способ электроконтактной обработки (ЭКО), который авторами [2] предложено использовать для модификации поверхности металлических имплантатов. В результате ее выполнения обработанная поверхность представляет собой совокупность перекрывающих друг друга лунок, имеющих форму, близкую к сферической. Их образование связано с протеканием явления электрической эрозии, т.е. направленного разрушения токопроводящих материалов за счет их расплавления и испарения под действием кратковременных электрических разрядов, протекающих в зазоре между поверхностями заготовки и инструмента. При этом размерами получаемых лунок и степенью их

перекрытия, которые в совокупности определяют параметры сформированного на поверхности имплантата микрорельефа, можно эффективно управлять за счет соответствующего изменения энергии электрического разряда и закона относительного перемещения поверхности заготовки и инструмента [3]. Как показали результаты предшествующих исследований [4], поверхность металлического образца имплантата, модифицированная путем ее ЭКО, обеспечивает большую прочность соединения с имитатором костной ткани с использованием фиксирующего материала по сравнению с поверхностью, модифицированной пескоструйной обработкой.

Помимо микрорельефа поверхности имплантата на процесс его интеграции в организме человека существенное влияние оказывает работа выхода электрона ее поверхности. Она, по мнению авторов работы [5], качественно связана с поверхностной (свободной) энергией, а следовательно, определяет адсорбционную способность поверхности и степень ее смачиваемости биологическими жидкостями. Значения поверхностной энергии возрастают с уменьшением работы выхода электрона. В этой связи для оценки эффективности применения ЭКО поверхности металлических имплантатов с целью обеспечения благоприятных условий их интеграции в организме человека необходимо располагать данными, отражающими влияние режимов и условий выполнения ЭКО на работу выхода электрона. Установлению этих зависимостей посвящена данная работа.

**Методика проведения экспериментальных исследований**

На рисунке 1 показано конструктивное исполнение металлических образцов имплантата, которые изготавливались из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ1-0. Они выполнены в виде плоской шайбы, имеющей две наружные цилиндрические поверхности разного диаметра и центральное отверстие. Торцевая поверхность Б и прилегающий к ней буртик служат для закрепления образца в приспособлении при обработке (модификации) его рабочей поверхности А, которая представляет собой кольцеобразную дорожку шириной 7,5 мм.

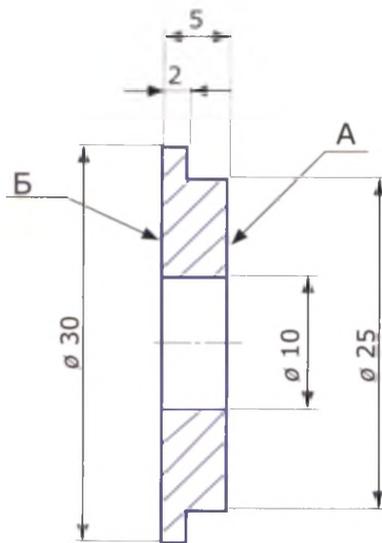


Рис. 1. Конструктивное исполнение металлического образца имплантата

Технологическая схема ЭКО поверхности образца металлического имплантата с использованием проволочного электрода-инструмента представлена на рисунке 2.

Обрабатываемый образец 1 закрепляется в цанговом патроне токарного станка, а с противоположной стороны поджимается неподвижным центром и получает равномерное вращательное движение вокруг своей оси с частотой  $n_1$ . На поперечном суппорте станка смонтирован электродвигатель постоянного тока 3, корпус которого электрически изолирован от него. На валу электродвигателя неподвижно посажена оправка 4, в которой консольно закреплены проволочные электроды-инструменты 2, имеющие свободную длину  $L$ . Предварительно, за счет регулировочных перемещений продольного суппорта станка, электродвигатель устанавливался в положение, при котором взаимодействие проволочного элемента с обрабатываемой поверхностью протекает в условиях упругого деформирования. Значение этой деформации определяется величиной предварительно установленного натяга  $\delta = L - k$ . Для обработки поверхности образца по всей ширине кольцевой дорожки электродвигателю с закрепленными на его валу инструментами сообщается поперечная подача  $S_{np}$ . В качестве инструментов при обработке титанового образца использовалась титановая проволока диаметром 0,9 мм, а при обработке стального – стальная проволока диаметром 0,7 мм.

Электрическая схема включает в себя источник питания постоянного тока ИП, накопительный конденсатор С, включенный параллельно контактирующим поверхностям проволочного электрода-инструмента и образца, а также последовательно подключенного к ним токоограничивающего резистора R. При вращении электродов-инстру-

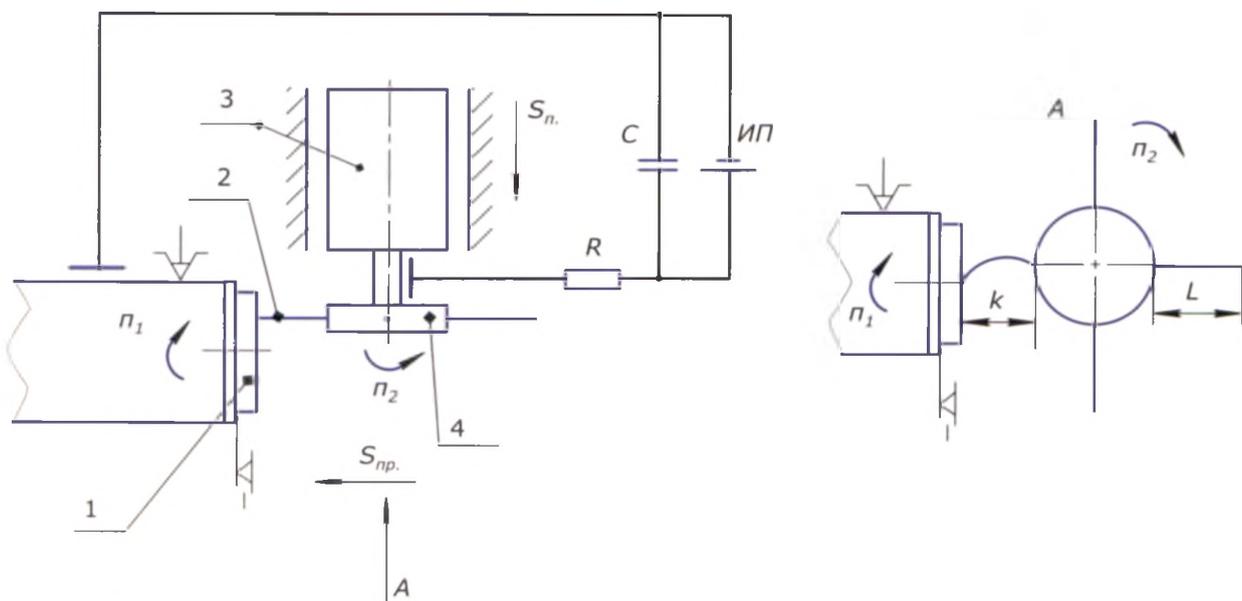


Рис. 2. Технологическая схема ЭКО поверхности образца металлического имплантата с использованием проволочного электрода-инструмента

ментов они, периодически взаимодействуя с поверхностью образца, вызывают прерывание электрической цепи, что на стадии их сближения сопровождается возникновением электрических разрядов. В результате их действия происходит удаление металла с поверхности образца с формированием на ней характерных лунок, совокупность которых определяет микрорельеф модифицированной поверхности.

На рисунке 3 представлены фотографии рабочей поверхности образца в исходном (рис.3а) состоянии (после точения) и после ее (рис.3б) электроконтактной обработки (ЭКО).

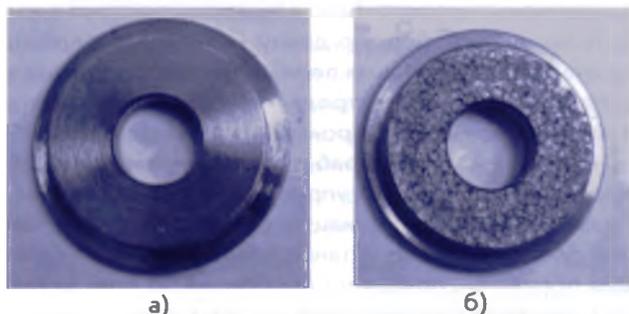


Рис.3. Фотографии рабочей поверхности образца в исходном (а) состоянии и после ее электроконтактной обработки (б)

ЭКО образцов осуществлялась при трех значениях напряжения накопительного конденсатора  $U$  ( $U = 60, 80$  и  $100$  В) с постоянной величиной натяга проволочных инструментов ( $\delta = 2$  мм) и неизменных значениях частоты вращения образца ( $n_1 = 480$  мин<sup>-1</sup>) и частоты вращения вала электродвигателя ( $n_2 = 300$  мин<sup>-1</sup>). В одной серии экспериментов обработка выполнялась на воздухе, а в другой – с применением дистиллированной воды (диэлектрическая жидкость), которая капельно подавалась в зону контакта проволочного инструмента с обрабатываемой поверхностью образца.

Для определения работы выхода электрона поверхности образцов было предложено воспользоваться методами, основанными на регистрации изменений работы выхода электрона (РВЭ), измеряемой через контактную разность потенциалов (КРП). Методы определения РВЭ по КРП, объединяемые общим термином «зондовая электромет-

рия», являются бесконтактными, не требуют каких-либо специфических внешних условий и имеют относительно простое практическое воплощение, что позволяет использовать их в процессе различных воздействий на поверхность (механических, электромагнитных, световых, зарядовых и т.п.).

Методом оценки состояния поверхности, позволяющим регистрировать свойства тонкого поверхностного слоя на достаточно большой площади поверхности, является метод, основанный на регистрации изменений работы выхода электрона на поверхности исследуемого материала.

Если работа выхода электрона,  $\Phi$  – энергия, которую необходимо затратить для удаления электрона из твердого или жидкого вещества в вакууме  $\varphi_0$ , в веществе  $\varphi_1$ , а  $E_f$  – энергия Ферми, то работа выхода электрона определяется следующим уравнением [5]:

$$\Phi = (\varphi_1 - \varphi_0) - E_f = \Delta\varphi - E_f = 4\pi P_s - E_f.$$

Величина  $\Delta\varphi$  представляет собой разность между электростатическим потенциалом электрона внутри металла и электростатическим потенциалом электрона вне металла в определенной точке. При этом  $\Delta\varphi = 4\pi P_s$ , где  $P_s$  – дипольный момент двойного слоя, приходящийся на единицу площади поверхности. Отсюда следует, что работа выхода электрона зависит как от состояния объема металла  $E_f$ , так и от состояния его поверхности  $P_s$ . Эта вторая компонента зависит от кристаллографической ориентации поверхности, адсорбированных атомов, наличия на поверхности дефектов, микрошероховатости поверхности и т.д.

Наиболее широко применяется для измерения РВЭ метод Кельвина-Зисмана, при выполнении которого полагается, что КРП не изменяется за период колебаний эталонного образца, а сигнал формируется только за счет изменения емкости, вызванной колебаниями пластины.

Для исследования топологии распределения РВЭ по поверхности был разработан так называемый невибрирующий зонд (НВКРП) [6], т.е. разновидность метода Кельвина, в котором отсутствуют механические колебания пластины конденсатора (рис. 4).

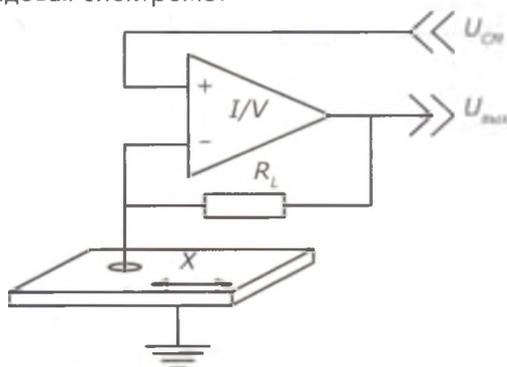


Рис. 4. Схематичное представление метода зондовой электрометрии методом невибрирующего конденсатора

В НВКРП эталонный образец и исследуемая поверхность также формируют плоский конденсатор, однако эталонный образец не вибрирует, а перемещается относительно исследуемой поверхности. НВКРП обеспечивает получение не абсолютного значения КРП, а ее производной, т.е. позволяет отслеживать «аномальные» зоны на поверхности, при этом типичные проблемы классического метода КРП (влияние окружающей среды и т.п.) практически исчезают.

Оценка РВЭ методом НВКРП была проведена с использованием аппаратного комплекса ИС КРП, модернизированного сервоприводом и с возможностью передачи массива данных на ЭВМ. После их преобразования посредством программного пакета OriginPro 7.5 были получены цветные диаграммы, позволяющие судить об изменении КРП ( $U_{CPD}$ ), а следовательно, и о работе выхода

электрона (рис. 5). Данный метод измерения РВЭ является компенсационным, а это означает, что с увеличением КРП уменьшается РВЭ. В свою очередь, уменьшение РВЭ свидетельствует об увеличении поверхностной (свободной) энергии, т.е. о повышении адсорбционных свойств модифицированной поверхности и о повышении ее смачиваемости.

**Обсуждение полученных результатов**

Из полученных результатов экспериментальных исследований установлено, что с увеличением напряжения накопительного конденсатора РВЭ модифицированной поверхности уменьшается, а КРП увеличивается. В частности, при обработке поверхности титанового образца проволочным электродом-инструментом в водной среде при напряжении накопительного конденсатора 60 В значение

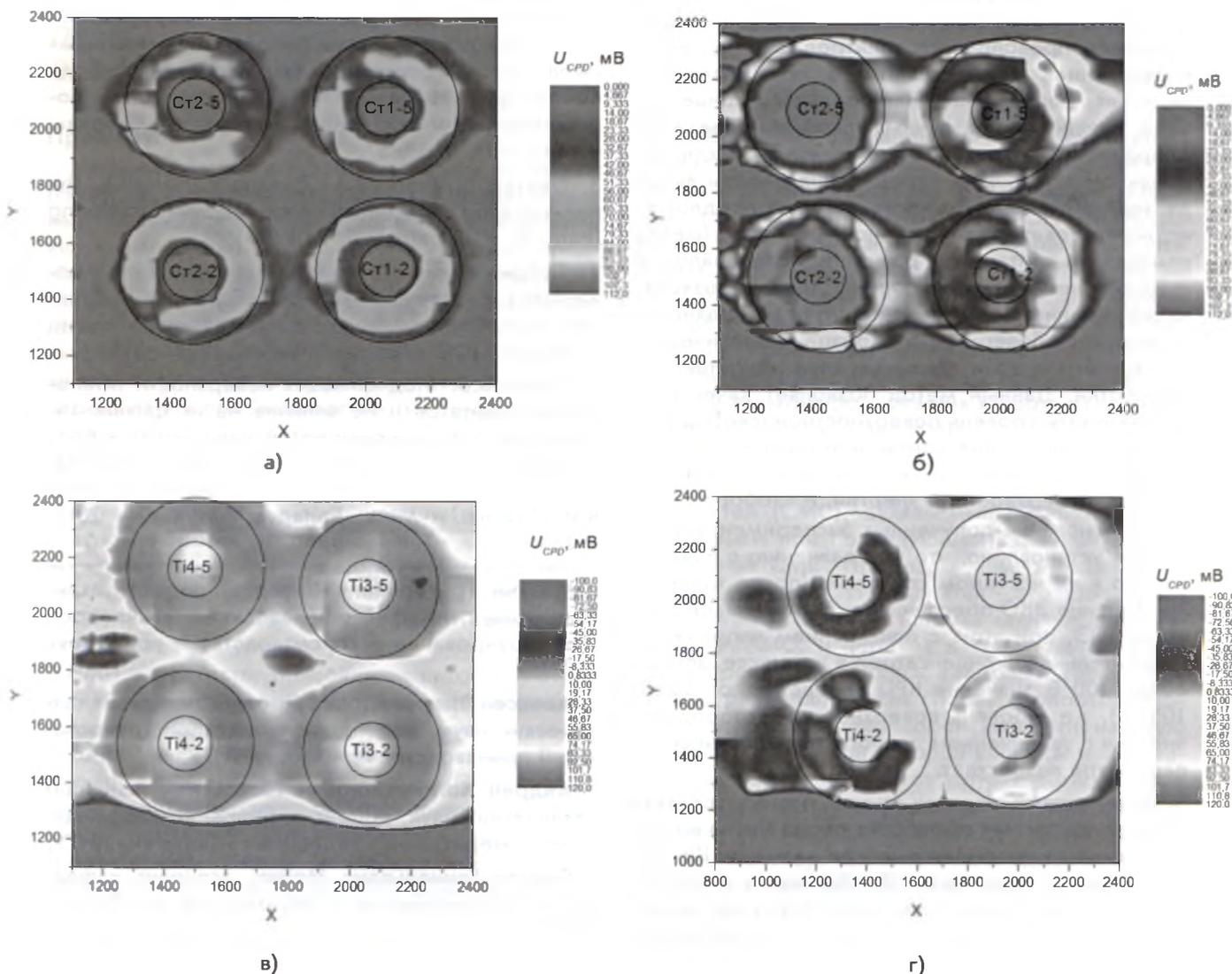


Рис.5. Цветовые диаграммы поверхности образцов металлических имплантатов (а, б – сталь 12Х18Н10Т; в, г – Тi-0) до (а, в) и после (б, г) ЭКО при напряжении накопительного конденсатора 80 В

КРП составляет 55 мВ, при 80 В – 75 мВ, а при 100 В – 105 мВ. При проведении ЭКО в данном случае, но в воздушной среде, при напряжении накопительного конденсатора 60В КРП составляет 95 мВ, при 80 В – 146 мВ, а при 100 В – 156 мВ.

Аналогичные экспериментальные данные характерны и для стальных образцов с тем отличием, что изменения КРП для них при тех же режимах и условиях обработки несколько меньше, чем для титановых образцов. Так, например, при обработке поверхности стального образца проволочным электродом-инструментом в водной среде при напряжении накопительного конденсатора 80 В значение КРП составляет 24 мВ. При проведении ЭКО в данном случае, но в воздушной среде, КРП составляет 42 мВ.

### Выводы

1. Разработана методика модификации исходной поверхности образцов металлических имплантатов путем ее электроконтактной обработки с применением проволочного электрода-инструмента, позволяющая осуществлять ее при различных значениях напряжения накопительного конденсатора, а также при различных условиях проведения операции (на воздухе и с применением дистиллированной воды). Для определения работы выхода электрона с поверхности образца предложено использовать компенсационный метод (метод измерения контактной разности потенциалов с применением невибрирующего зонда), позволяющий оценивать изменение контактной разности потенциалов поверхности образца металлического имплантата до и после ее электроконтактной обработки. Данный метод позволяет качественно оценивать уровень поверхностной (свободной) энергии по величине контактной разности потенциалов из условия, что чем она выше, тем ниже уровень поверхностной энергии, и наоборот.

2. На основании полученных экспериментальных данных установлено, что по сравнению с поверхностью в ее исходном состоянии (после точения) применение ЭКО обеспечивает более низкое значение РВЭ, при этом с повышением напряжения накопительного конденсатора в процессе ЭКО от 60 до 100 В значение КРП возрастает от 55 до 105 мВ, т.е. уровень поверхностной (свободной) энергии с увеличением данного технологического параметра возрастает.

3. Установлено, что при прочих равных условиях электроконтактная обработка образцов на воздухе обеспечивает более высокое значение КРП по сравнению с образцом, обработанным с применением дистиллированной воды. Так, в частности, для титанового образца при 80 В при обработке

на воздухе значение контактной разности потенциалов составляет 146 мВ, а при обработке с применением дистиллированной воды – 75 мВ.

4. На основании анализа полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что для получения поверхности металлического имплантата с высоким уровнем поверхностной энергии ее электроконтактную обработку необходимо осуществлять при напряжении 100 В и выполнять ее на воздухе.

### Список использованной литературы

1. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Москаленко А.В., Богдан П.С., Монич С.Г. Теоретическое обоснование рациональных параметров режима электроконтактной обработки проволочного инструмента. «Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого» №3. – Гомель. – 2012, с. 3–10.
2. Киселев М.Г., Дроздов А.В., Борисов В.А. Применение электроконтактной виброударной обработки для модификации образцов титановых имплантатов. Сборник докладов международного симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка». – Мн.: 2011, с. 53–57.
3. Danyluk, S., Zharin, A.L., Zanoria, E., Hamall, K. The non-vibrating capacitance probe for wear monitoring [Patent]. – US patent 5,974,869.1999.
4. Современные материалы хирургических имплантатов и инструментов/ В.В. Савич, М.Г. Киселев, А.И. Воронович. – 2-е изд. перераб. и доп. – Минск: ООО «ДокторДизайн», 2004. – 104 с.
5. Савич В.В. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В.В. Савич, Д.И. Сарока, М.Г. Киселев, М.Г. Макаренко; под научн. ред. В.В. Савича. – Мн.: «Беларус. навука». – 2012. – 244 с.

**Михаил Григорьевич Киселев**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов» БНТУ;

**Алексей Владимирович Дроздов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование и производство приборов» БНТУ;

**Андрей Константинович Тявловский**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» БНТУ;

**Сергей Геннадьевич Монич**, аспирант кафедры «Конструирование и производство приборов» БНТУ

*Дата поступления 20.01.2014 г.*