

УДК 621.923.04 + 519.237.7

ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПО ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВУ ПОВЕРХНОСТИ

Л.М. Акулович,

профессор каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Л.Е. Сергеев,

доцент каф. технологии металлов БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

М.М. Дечко,

доцент каф. основ научных исследований и проектирования БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

Е.В. Сенчуров,

нач. отдела внедрения НТР НИИМЭСХ БГАТУ

Представлены результаты статистического анализа экспериментального исследования параметров качества обработанной поверхности колец шарикоподшипников из стали ШХ15 и производительности процесса при магнитно-абразивной обработке (МАО). Выявленные корреляционные связи позволяют объединить параметры в три независимые группы, которые можно использовать для анализа влияния режимов МАО на качество поверхности и производительность процесса и для их оптимизации.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, качество поверхности, съём материала, статистический анализ, оптимизация.

Results of the statistical analysis of a pilot study of parameters of the quality processed surface of rings of ball-bearings from ShH15 (1.2067) steel and productivity of process at magnetic and abrasive processing are presented. The revealed correlation communications allow uniting parameters in three independent groups which can be used for the analysis of influence of the modes of magnetic and abrasive processing on quality of a surface and productivity of process and for their optimization.

Keywords: magnetic abrasive machining, the surface quality, material removal, statistical analysis, optimization..

Введение

Совершенствование технологии производства направлено на решение двух важнейших задач, обеспечивающих конкурентоспособность выпускаемой продукции, – повышение качества изделий и снижение затрат на их производство. Качество продукции определяет комплекс эксплуатационных параметров изделия. Однако оценка многих из этих параметров на стадии проектирования проблематична по причине сложности их моделирования. Эта проблема характерна для большинства изделий машиностроительного назначения, работоспособность которых зависит от их способности противостоять износу и разрушению. Поэтому для прогнозирования эксплуатационных параметров важно определить комплекс свойств, который позволяет надежно прогнозировать эксплуатационные параметры, оценивать эти свойства на стадии разработки изделия или процесса его производства, управлять каждым из этих свойств независимо друг от друга. Последнее условие определяется особенностями применяемой технологии изготовления.

Основная часть

Магнитно-абразивная обработка (МАО) – один из перспективных способов финишной обработки, техно-

логические особенности которого обеспечили ему особое место в ряду методов абразивного резания [1, 2]. Специфические особенности взаимодействия абразивных зерен, удерживаемых магнитным полем, с обрабатываемой деталью обуславливают особенности формирования качества обработанной поверхности. Параметрами качества поверхности являются ее макро- и микрогеометрия, физико-механические свойства поверхностных слоев материала и остаточные напряжения в них. Формирование параметров качества определяется процессами микрорезания и деформаций, реализуемыми при МАО и зависящими от ее режимов. При этом можно ожидать, что формирование различных параметров качества обработанной поверхности обуславливается одними и теми же процессами, сопровождающими МАО, вследствие чего возможна взаимозависимость получаемых параметров качества, а также их связь с достигаемыми при этом параметрами съема обрабатываемого материала.

Цель данного исследования – на основе факторного анализа установить обобщенные характеристики процесса МАО по производительности и показателям качества поверхности.

Экспериментальное исследование проведено при МАО колец шарикоподшипников из стали ШХ-15.

Технологические режимы МАО и диапазоны их варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технологические режимы МАО

| Фактор режима МАО | Единица измерения | Диапазон варьирования | |
|---|-------------------|-----------------------|-------|
| | | min | max |
| Скорость вращения заготовки | м/с | 1,15 | 5,85 |
| Скорость осцилляции полюсных накопечников | м/с | 0,121 | 0,319 |
| Величина магнитной индукции | Тл | 0,42 | 0,98 |
| Амплитуда осцилляции полюсных накопечников | мм | 0,55 | 2,25 |
| Шероховатость поверхности детали до МАО, Ra | мм | 0,305 | 1,295 |
| Время обработки | с | 17,6 | 102,4 |

Технологические режимы МАО варьировали согласно матрице ротатбельного плана из 77 опытов с 4-х кратным дублированием в центральной точке, то есть получено 80 образцов для анализа, на которых измерены следующие параметры, характеризующие качество обработанной поверхности и съем обрабатываемого материала:

- Δg , мг/(см²·мин) – скорость съема массы металла с единицы площади обработанной поверхности детали (далее – удельный съем);
- ΔD_1 , мкм – размерный съем по дну беговой дорожки;
- ΔD_2 , мкм – размерный съем по стенке беговой дорожки;
- Ra , мкм – параметр шероховатости после обработки;
- β_1 , нм – размер блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое до МАО;
- β_1' , нм – размер блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое после МАО;
- $\Delta\beta_1$, нм – изменение размера блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое;
- β_2 , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое до МАО;
- β_2' , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое после МАО;
- $\Delta\beta_2$, МПа – изменение напряжения 2-го рода в поверхностном слое;
- P , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое до МАО;
- P' , МПа – напряжение 2-го рода в поверхностном слое после МАО;
- ΔP , МПа – изменение напряжения 1-го рода;
- A , % – содержание аустенита в поверхностном слое до МАО;
- A' , % – содержание аустенита в поверхностном слое после МАО;

– ΔA , % – содержание аустенита в поверхностном слое.

Измеренные значения параметров представляют собой случайные величины, подчиняющиеся определенным законам распределения. Для поиска взаимосвязи случайных величин широко применяется метод парного корреляционного анализа [3], для корректного применения которого распределения случайных величин должны удовлетворительно описываться нормальным законом вероятностей. Для оценки распределений значений параметров, оцениваемых в нашем эксперименте, построены гистограммы и выполнены расчеты критерия Колмогорова-Смирнова для

предварительной оценки вероятности принадлежности распределения к нормальному (рис. 1).

Выполненный анализ показывает, что нормальному закону распределения с вероятностью $p > 0,2$ не противоречат распределения параметров ΔD_1 , ΔD_2 , β_1' , β_2' , $\Delta\beta_2$, P , P' , ΔP , A , ΔA . При этом ряд важных для дальнейшего анализа параметров не может быть удовлетворительно описан нормальным законом распределения. Так, параметр удельного съема Δg , характеризующий производительность МАО, имеет значительную левостороннюю асимметрию. То же заметно и для параметра шероховатости поверхности после МАО Ra . Приведение распределений значений этих параметров к нормальному закону может быть достигнуто с помощью преобразований $\Delta g \rightarrow \ln(\Delta g)$, $Ra \rightarrow \ln(Ra)$ (рис. 2 а, б).

Как видно из распределения величины блоков когерентного рассеяния β_1 до МАО, в исходном состоянии присутствуют 2 группы образцов: большая часть исходных образцов обладала размером блоков когерентного рассеяния в пределах 2...3 нм, а другая часть – 4...5 нм. По этой причине функция распределения этой величины далека от нормального закона. Однако после МАО распределение сместилось в сторону больших значений и приблизилось к нормальному закону. Видимо это результат удаления поверхностного слоя, имевшего более деформированную структуру и сопровождавшийся меньшим деформирующим воздействием на поверхность вследствие МАО. Соответственно изменение этого параметра $\Delta\beta_1$ имеет распределение, асимметричное в сторону больших значений, и значительно отклоняется от нормального. Преобразование к логарифмически нормальному распределению в этом случае невозможно, как по причине правосторонней асимметрии, так и из-за наличия отрицательных значений параметра $\Delta\beta_1$. Поэтому для преобразования этого параметра была использована другая функция: $\Delta\beta_1 \rightarrow \ln(b_0 + b_1 \Delta\beta_1)$, где постоянные $b_0 = 2,96$ и $b_1 = -1,013$ были найдены из условия минимизации максимального отклонения получаемой в результате преобразования эмпирической функции распределения от нормального закона (рис. 2 в).

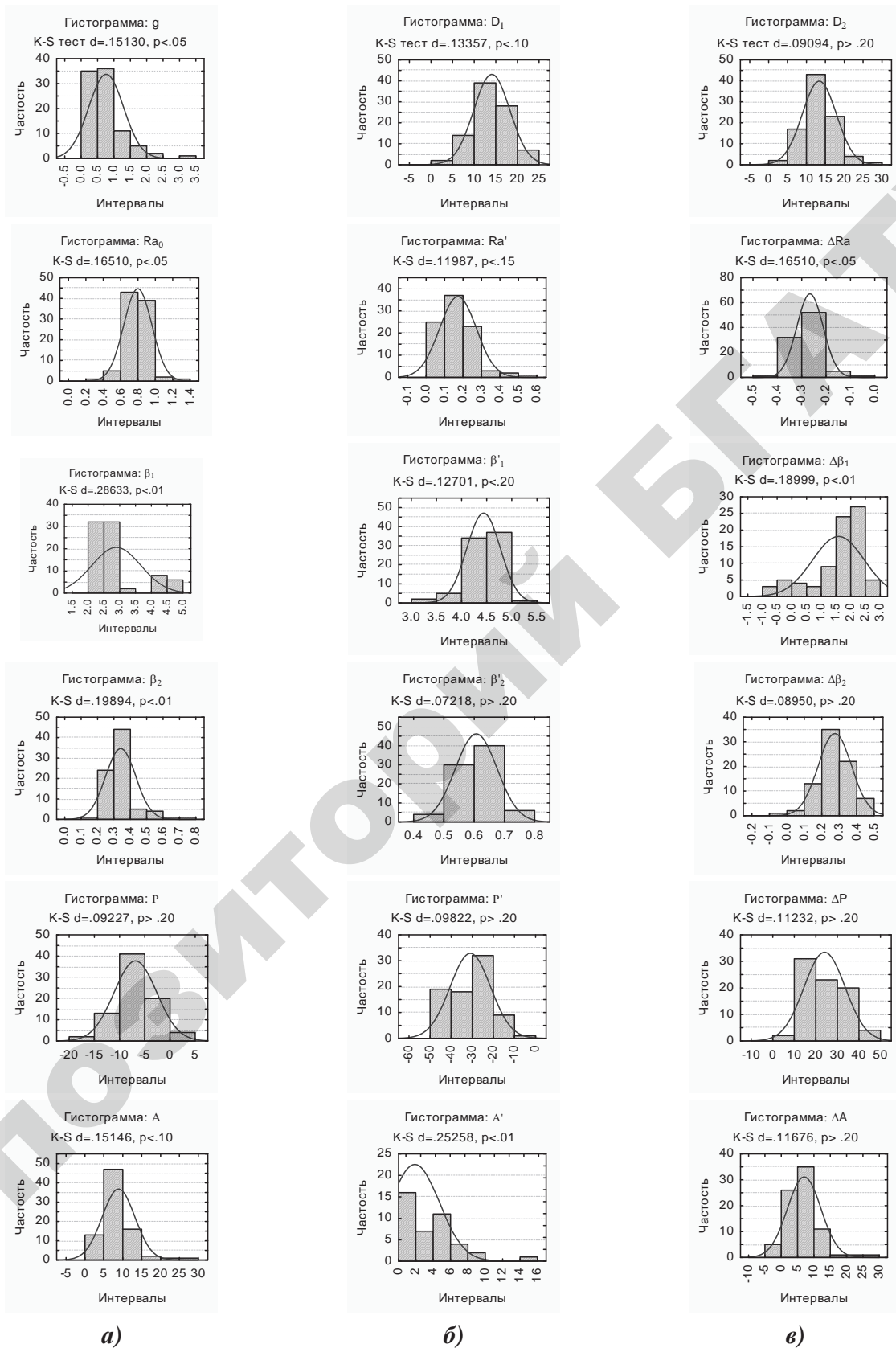


Рисунок 1. Распределения значений контролируемых параметров до (а), после MAO (б) и их абсолютные изменения (в)

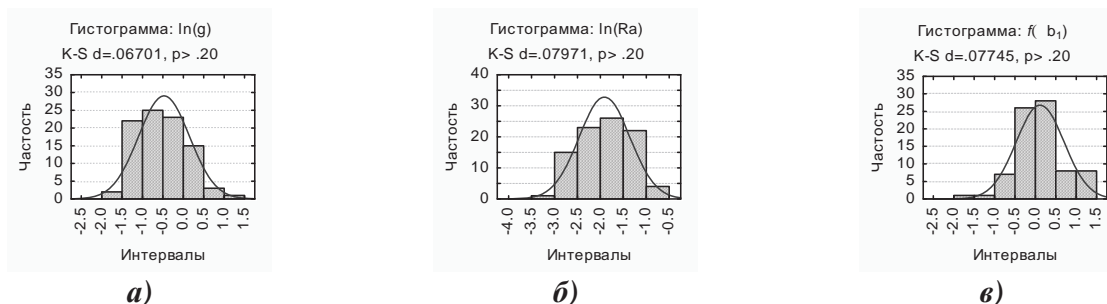


Рисунок 2. Распределения значений преобразованных параметров: а) удельный съем материала; б) шероховатость обработанной поверхности; в) изменение размеров блоков когерентного рассеяния в поверхностном слое в результате МАО

Распределение содержания аустенита в поверхностном слое после МАО А% не удается свести к нормальному. Это, по-видимому, связано с тем, что аустенит в поверхностном слое возник в результате предыдущей операции шлифования и был просто удален МАО вместе с поверхностным слоем. Сам же процесс МАО никак не влияет на образование аустенита.

Для дальнейшего исследования взаимосвязей явлений при МАО построены графики попарной взаимозависимости основных измеренных параметров (рис. 3). Для каждой пары параметров графики отображают картину, характеризующую тесноту их взаимозависимости: если точки на графике группируются около некоторой линии, это указывает на существование взаимосвязи; если точки образуют рассеянное «облако», это говорит о взаимной независимости рассматриваемых параметров. По расположению точек на графиках, построенных на осях параметров ΔD_1 и ΔD_2 , $\ln(\Delta g)$ и $\ln(Ra)$, можно отметить явную пропорциональную линейную зависимость между ними, что

можно объяснить воздействием единого механизма формирования этих параметров – съем материала с поверхности деталей в результате МАО. При этом возрастанию удельной производительности съема Δg сопутствует возрастание шероховатости Ra поверхности после МАО. Следовательно, процесс съема интенсифицируется за счет удаления более крупных фрагментов поверхностного слоя, приводящего к возникновению большей шероховатости. Однако при возрастании удельного съема Δg параметры размерного съема ΔD_1 и ΔD_2 уменьшаются. Это вызвано влиянием времени обработки: его возрастание снижает съем в единицу времени, но общий размерный съем возрастает пропорционально времени обработки.

Обращает на себя внимание также тесная взаимозависимость параметров $\Delta\beta_1$ и $\Delta\beta_2$, которая обусловлена другим процессом, сопровождающим МАО – деформационным воздействием на микроструктуру обработанной поверхности. Исходные значения связаны прямо пропорциональной зависимостью. Обратной пропорциональной зависимостью этих параметров вызвана выполненным преобразованием $\Delta\beta_1 \rightarrow \ln(b_0 + b_1 \cdot \Delta\beta_1)$ при отрицательном множителе b_1 .

Для количественной оценки уровня взаимосвязи всех параметров проведен линейный корреляционный анализ, результаты которого приведены в таблице 2, содержащей доверительные уровни вероятности статистической значимости корреляции. Отмеченные при анализе графиков (рис. 3) взаимозависимости параметров Δg , ΔD_1 , ΔD_2 , Ra и $\Delta\beta_1$, $\Delta\beta_2$ подтверждаются высокой вероятностью статистической значимости их корреляций (близкой к 100%).

Корреляционный анализ выявил еще одну группу взаимосвязанных параметров с достаточно высокой вероятностью $\geq 90\%$: ΔP ,

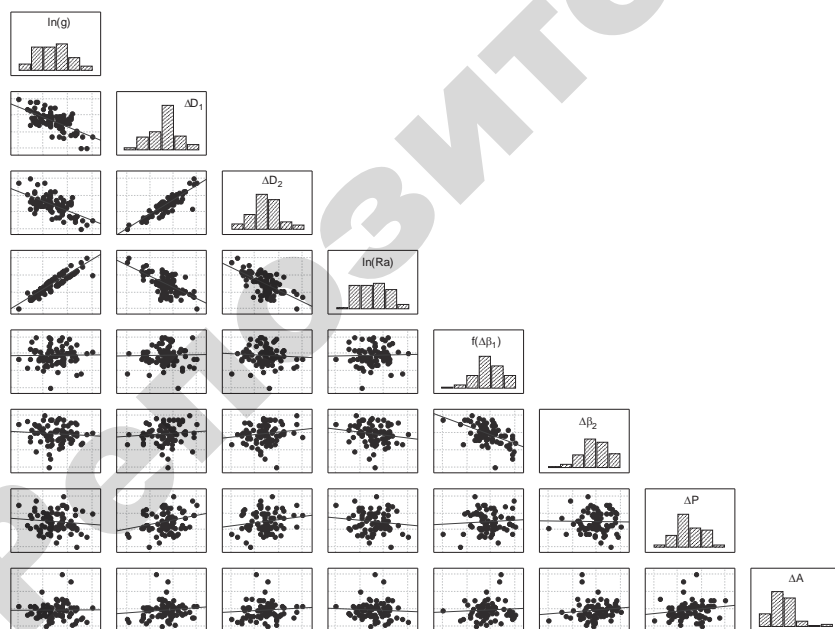


Рисунок 3. Взаимозависимости параметров интенсивности съема материала и качества поверхности после МАО

Таблица 2. Доверительная вероятность существования корреляционной связи между параметрами при MAO

| | | | | | | | |
|----------------------|------------------|--------------|--------------|------------|----------------------|-----------------|------------|
| | ln(Δg) | | | | | | |
| ΔD_1 | 100% | ΔD_1 | | | | | |
| ΔD_2 | 100% | 100% | ΔD_2 | | | | |
| ln(Ra) | 100% | 100% | 100% | ln(Ra) | | | |
| f($\Delta\beta_1$) | 8% | 16% | 47% | 19% | f($\Delta\beta_1$) | | |
| $\Delta\beta_2$ | 44% | 53% | 78% | 84% | 100% | $\Delta\beta_2$ | |
| ΔP | 78% | 99% | 93% | 83% | 47% | 4% | ΔP |
| ΔA | 19% | 65% | 47% | 30% | 45% | 71% | 79% |

ΔD_1 , ΔD_2 . Прямо пропорциональная их взаимозависимость связана с возрастанием деформирующего воздействия на обработанную поверхность при увеличении размерного съема материала при MAO.

Для управления процессом MAO и достигаемым при этом качеством поверхности, важной предпосылкой является возможность независимого изменения различных параметров с помощью варьируемых факторов MAO. Установленные взаимосвязи между различными группами параметров являются основанием для перехода к некоторым обобщенным параметрам, объединяющим в себе группы взаимозависимых первичных параметров, измеренных при изучении процесса MAO. Одним из методов такого перехода является факторный анализ по методу главных компонент [4], представляющий собой математическое преобразование матрицы парных корреляций, в результате чего вводится новая система координат в обобщенных и взаимонезависимых параметрах, связанных с группами первичных параметров.

Анализ по методу главных компонент подтверждает, что для характеристики процесса MAO может быть выбрано 3 главных обобщенных параметра (F_1 , F_2 , F_3), взаимосвязь которых с первичными определяется факторными нагрузками, приведенными в таблице 3. Дан-

Таблица 3. Факторные нагрузки для обобщенных и первичных параметров MAO

| | Обобщенные параметры | | |
|----------------------|----------------------|---------------|--------------|
| | F_1 | F_2 | F_3 |
| ln(Δg) | 0,916 | 0,002 | 0,057 |
| ΔD_1 | -0,893 | -0,012 | 0,218 |
| ΔD_2 | -0,887 | 0,086 | 0,134 |
| ln(Ra) | 0,902 | -0,070 | -0,015 |
| f($\Delta\beta_1$) | 0,005 | -0,861 | 0,141 |
| $\Delta\beta_2$ | -0,086 | 0,871 | 0,121 |
| ΔP | -0,203 | -0,109 | 0,681 |
| ΔA | 0,049 | 0,089 | 0,823 |

ные таблицы 3 подтверждают, что параметры процесса MAO могут быть сгруппированы в три обоб-

щенных, объединяющих те первичные параметры, формирование которых обусловлено одними и теми же физико-механическими процессами, сопровождаемыми MAO. Это позволит выполнить последующий регрессионный анализ влияния факторов режимов MAO на параметры производительности процесса и качества обработанной поверхности, изучая взаимонезависимые обобщенные параметры. Тем самым будет сокращено число уравнений регрессии для описания процесса, а главное, оптимизация процесса будет возможна в системе взаимонезависимых параметров.

Заключение

Выполненный статистический анализ результатов измерений параметров производительности и качества поверхности, получаемых в процессе MAO, показывает, что распределение большинства исследованных параметров может быть описано нормальным законом вероятностей. Распределение остальных параметров может быть приведено к нормальному путем логарифмического преобразования.

Корреляционный анализ параметров MAO выявил статистически значимые взаимосвязи между различными группами параметров, которые могут быть объяснены одинаковыми физико-механическими механизмами формирования этих параметров в процессе MAO.

Факторный анализ взаимосвязи параметров MAO методом главных компонент позволяет сгруппировать их в три главных взаимонезависимых фактора, которые можно использовать для анализа влияния режимов MAO и их оптимизации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Хомич, Н.С. Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н.С. Хомич. – Мн.: БНТУ, 2006. – 218 с.
3. Елисева, И. И. Общая теория статистики: учеб. / И.И. Елисева, М.М. Юзбашев. – 4-е изд., пер. и доп. – Москва: Финансы и статистика, 2002. – 480 с.
4. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. / Дж.-О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка [и др.]; под ред. И.С. Енюкова. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 25.02.2016