

УДК 621.3

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПОГРУЖНЫХ УСТАНОВОК НЕФТЕДОБЫЧИ**

***В.Г. Гольдштейн, В.С. Романов***

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vgg41@yandex.ru; romanov\_v.s@mail.ru

***Аннотация.*** Предлагается метод повышения надежности эксплуатации электропогружных установок (ЭПУ) нефтедобычи, основанный на использовании механизмов менеджмента качества, таких как диаграммы К. Исикавы и В. Парето, а также метод анализа видов и последствий потенциальных отказов – FMEA-анализ (Failure Mode and Effects Analysis). Каждый из выделенных механизмов стратегически направлен на решение определенных задач – диаграмма К. Исикавы (или диаграмма «рыбьей кости») позволяет в графической форме установить наиболее существенные причинно-следственные взаимосвязи между факторами и последствиями в исследуемой проблеме; метод FMEA позволяет произвести анализ технологических нарушений, спрогнозировать потенциально возможные отказы (дефекты), установить причины и последствия их возникновения, произвести оценку возникающих рисков и предпринять меры для устранения, профилактики и снижения ущерба от их появления; на основании FMEA-анализа выполняется построение диаграммы В. Парето, которая дает возможность установить приоритет действиям, необходимым для решения проблемы. В результате определены «узкие» места в эксплуатации ЭПУ и разработаны рекомендации по их устранению.

***Ключевые слова:*** погружное электрооборудование, погружные электродвигатели, нефтедобыча, надежность, статистика отказов, диаграмма К. Исикавы, диаграмма В. Парето, FMEA-анализ, технологические нарушения.

Анализ результатов статистического анализа производственных результатов эксплуатации ЭПУ на нефтегазодобывающих предприятиях (НГДП) говорит об острой необходимости комплексной оценки их деятельности, в которой должны быть объединены технические и экономические механизмы повышения надежности эксплуатации [1]. Теоретической основой технических методов повышения надежности функционирования ЭПУ являются статистический анализ, математическое моделирование и исследования структурно-функциональных свойств конструкций ЭПУ и конкретно погружных электродвигателей (ПЭД) [2]. Для повышения надежности технической системы (ЭПУ и ПЭД) при реализации комплексного технико-экономического подхода к решению этой задачи представляется целесообразным рассмотреть применение методов и инструментов системы менеджмента качества, таких как диаграмма Каору Исикавы (1952) [3],

---

*Валерий Геннадьевич Гольдштейн (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».*

*Владимир Сергеевич Романов, аспирант.*

известная также как диаграмма «рыбьей кости» (Fishbone Diagram), или «причинно-следственная» диаграмма (Cause and Effect Diagram); метод анализа видов и последствий потенциальных отказов, или FMEA-анализ [4] (Failure Mode and Effects Analysis); диаграмма Вильфредо Парето [5].

Диаграмма К. Исикавы – графический способ исследования и определения наиболее существенных причинно-следственных взаимосвязей между факторами и последствиями в исследуемой ситуации или проблеме. Диаграмма – одна из методик логического анализа и улучшения качества процессов в промышленности, она позволяет выявить ключевые взаимосвязи между различными факторами и более точно понять исследуемый процесс; способствует определению главных факторов, оказывающих наиболее значительное влияние на развитие рассматриваемой проблемы, а также предупреждению или устранению действия данных факторов [3].

Эта диаграмма позволяет установить причинно-следственные связи возникновения отказов ЭПУ и ПЭД. На первом этапе исследования для конкретного технического объекта (в данном случае это ЭПУ) и (или) производственного процесса с его конкретной функцией на основании опыта эксплуатации, предварительной истории и технологических нарушений с использованием статистического материала по отказам ЭПУ и ПЭД [6] определяются все возможные виды дефектов, которые возникли вследствие отказа. Результатом данного анализа служит построение диаграммы причинно-следственной связи для оценки составляющих надежности функционирования ЭПУ, представленной на рис. 1 [7].

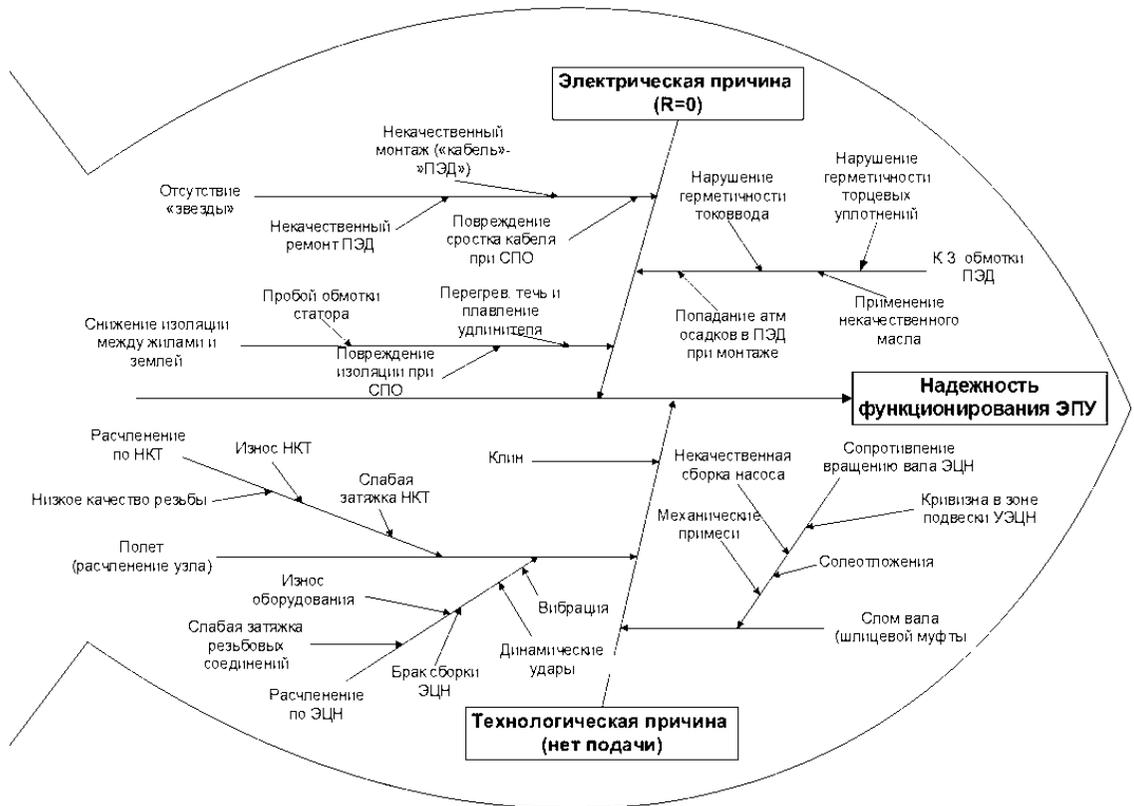


Рис. 1. Диаграмма К. Исикавы причинно-следственной связи для оценки составляющих надежности функционирования ЭПУ

На рис. 1 в графической форме устанавливается причинно-следственная связь между всевозможными отказами (дефектами, приведшими к отказам) в работе погружного оборудования и надежностью функционирования ЭПУ. Условно принято разделение причин отказов на электрические ( $R=0$ ) [8] и технологические (нет подачи) [9]. Их содержание подробно представлено ниже.

1. Электрическая причина возникновения отказа элементов электротехнического комплекса ЭПУ, как правило, связана с нарушением нормального состояния его электрической части, электромагнитной совместимости либо с низким качеством сборки и монтажа основных электромеханических и электромагнитных устройств в составе ЭПУ [8]. При рассмотрении данной категории отказов следует акцентировать внимание на следующих ее составляющих:

а) снижение качества изоляции между жилами и землей. Данный дефект может возникать по следующим причинам:

- пробой обмотки статора, который является следствием старения изоляции погружного электродвигателя, заводского брака изготовления самого ПЭД [10], перегрева двигателя (как правило, возникает по причине малого притока, срыва подачи, негерметичности нососно-компрессорных труб (НКТ), высокой температуры перекачиваемой жидкости и т. д.), повышенной вибрации, являющейся одним из немаловажных факторов отказа [11], в результате которой происходят пропуски пластовой жидкости через торцевое уплотнение с последующим пробоем изоляции самого двигателя;
- перегрев, течь и плавление удлинителя. Возникают из-за некачественной эксплуатации установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) (частые отключения защиты от турбинного вращения [10], некачественный подбор УЭЦН (недостаточный приток), частые отключения от защиты срыва подачи (ЗСП) (в насосе газ, отсутствие подачи), частые отключения от ЗП (повышенное содержание количества взвешенных частиц (КВЧ), интенсивное солеотложение, подклинивание вследствие износа рабочих органов, некачественное электроснабжение), некачественного вывода в ремонт УЭЦН (несоблюдение регламента по выводу УЭЦН, брак подбора УЭЦН) [11];
- повреждение изоляции при спускоподъемных операциях (СПО), что обусловлено нарушением скорости спуска, наличием посторонних предметов и перекрутом удлинителя кабеля [12];

б) КЗ обмотки ПЭД. Исключение возникновения подобного отказа во многом зависит от герметичности торцевых уплотнений, герметичности токоввода, качества масла, наличия или отсутствия попадания атмосферных осадков в ПЭД при монтаже [7];

в) отсутствие «звезды» (нарушение целостности цепи). Это один из самых сложных комплексных параметров надежности ЭПУ, основными вызывающими факторами которого являются: некачественный ремонт ПЭД, повреждение срезка кабеля при СПО, некачественный монтаж («кабель» – «ПЭД»), замыкание датчика на УЭЦН [1, 13].

2. Технологическая причина отказа (нет подачи), как правило, заключается в нарушении условий функционирования составных элементов УЭЦН вследствие ухудшения или изменения условий эксплуатации [11], низкого качества оборудования и его монтажа. Рассмотрим более подробно преобладающие отказы в работе по технологическим причинам:

а) закручивание или слом вала УЭЦН в результате возникновения сопротивления его вращению. Главными определяющими факторами данного отказа являются некачественная сборка насоса, кривизна в зоне подвески УЭЦН, солеотложения, механические примеси [8, 12];

б) полет (расчленение узла). При рассмотрении отказов в механической части ЭПУ расчленение узла разделяют на расчленение по НКТ и расчленение по ЭЦН [9]; в первом случае отказ возникает по причинам старения НКТ, некачественной затяжки НКТ, неудовлетворительного качества резьбы, вибрации; во втором случае – из-за брака сборки ЭЦН, старения оборудования, некачественной затяжки резьбовых соединений, динамических ударов [10];

в) заклинивание насоса – частный случай технологического отказа, возникающий из-за брака изготовления самого УЭЦН.

После проведенного анализа и установления причинно-следственной связи между отказом в работе ЭПУ и основными дефектами, приводящими к отказу, предлагается проводить мониторинг, посредством которого выявляются все недостатки эксплуатации оборудования скважины, их причины и разрабатываются процедуры в виде корректирующих действий с целью повышения надежности всей системы в целом [2]. Содержание предложенной схемы мониторинга представлено в табл. 1, 2.

Схема мониторинга, изображенная в табл. 1, 2, устанавливает взаимосвязь между явлениями возникновения отказов в работе ЭПУ, причинами их возникновения, последствиями и предложенными действиями по их исключению в процессе дальнейшей эксплуатации. В данной схеме описаны основные составляющие диаграммы причинно-следственной связи оценки надежности функционирования ЭПУ, приведенной на рис. 1, а именно: для электрической причины возникновения отказа элементов электротехнического комплекса ЭПУ – снижение изоляции между жилами и землей, КЗ обмотки ПЭД, отсутствие «звезды» (нарушение целостности цепи); для технологической причины отказа (нет подачи) – полет (расчленение узла), слом вала, клин. Остальные виды технологических нарушений являются более частными случаями либо следствием рассмотренных отказов [13] и устраняется по разработанным алгоритмам согласно табл. 1, 2. Выполненная схема мониторинга с подробным описанием причинно-следственной связи процесса возникновения технологических нарушений ЭПУ и ПЭД послужит незаменимой базой для выполнения дальнейшего исследования по методу FMEA-анализа [4].

Метод анализа видов и последствий потенциальных отказов, или FMEA, является эффективным механизмом обеспечения качества действующих и разрабатываемых сложных технических систем, применяемым для обнаружения и устранения технологических нарушений и сопряженных с ними дефектов либо снижения негативных последствий от них [14]. Его реализация возможна за счет разработки комплекса мероприятий по прогнозированию дефектов (отказов), их анализу на различных жизненных циклах системы (объекта) или отдельно взятого элемента.

Метод FMEA позволяет произвести анализ технологических нарушений на НГДП, спрогнозировать потенциально возможные отказы (дефекты), установить причины и последствия их возникновения, произвести оценку возникающих рисков, в частности по выявлению или невыявлению дефектов (скрытые дефекты), и предпринять меры для их устранения, уменьшения вероятности возникновения, профилактики и снижения ущерба от их появления [15].

**Схема мониторинга причин и следствий, связанных с отказом  
в работе ЭПУ по технологическим причинам**

Характер отклонений	Причины	Последствия	Действия
Слом вала (шлицевой муфты)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Заводской брак</li> <li>2. Скрытый дефект вала</li> <li>3. Брак комплектации</li> <li>4. Несоответствие максимально передаваемой мощности вала мощности ПЭД</li> <li>5. Слом вала при расклинивании УЭЦН (превышение допустимых нагрузок на вал)</li> <li>6. Выработка ресурса вала ввиду длительной эксплуатации</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Значительное снижение токовых нагрузок и загрузки ПЭД относительно нормальных рабочих значений</li> <li>2. Отсутствие или снижение производительности УЭЦН</li> <li>3. Недобор нефти, убытки компании</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Комплектация узлов и деталей ЭЦН согласно утвержденной технической документации</li> <li>2. Недопущение длительного воздействия критических нагрузок на УЭЦН при эксплуатации и работах по расклиниванию</li> </ol>
Клин	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Засорение рабочих органов ЭЦН</li> <li>2. Нарушение технологии эксплуатации УЭЦН</li> <li>3. Некачественное освоение скважины</li> <li>4. Работа УЭЦН в зоне недопустимого значения кривизны ствола скважины</li> <li>5. Повышенный уровень вибрации УЭЦН</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Заклинивание и выход из строя оборудования скважины, останов скважины</li> <li>2. Недобор нефти, убытки компании</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Соблюдение технологии проведения ГРП и освоения скважины после ГРП</li> <li>2. Недопущение создания высоких депрессий на ПЗП</li> <li>3. Промывка рабочих органов УЭЦН</li> <li>4. Профилактика и предупреждение солеотложений</li> </ol>
Полет (расчленение узла)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Скрытые дефекты</li> <li>2. Механические повреждения при монтаже</li> <li>3. Износ в результате выноса проппанта после ГРП</li> <li>4. Высокое содержание КВЧ</li> <li>5. Коррозия в связи с длительной эксплуатацией</li> <li>6. Нарушение технологии проведения СПО</li> <li>7. Усталостное разрушение металла</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Полет на забой скважины, останов оборудования</li> <li>2. Недобор нефти, убытки компании</li> <li>3. Несоблюдение сроков проведения ТОиР, непредвиденные расходы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Использование качественных деталей при изготовлении / ремонте</li> <li>2. Проведение входного контроля</li> <li>3. Действия персонала при подтверждении отказа в соответствии с требованиями ЛНД</li> <li>4. Применение различных методов борьбы с коррозией</li> </ol>

**Схема мониторинга причин и следствий, связанных с отказом  
в работе ЭПУ по электрическим причинам**

Характер отклонений	Причины	Последствия	Действия
Отсутствие «звезды»	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пробой изоляции</li> <li>2. Брак изготовления</li> <li>3. Механическое повреждение кабеля – нарушение изоляции (токопроводящей жилы)</li> <li>4. Нарушение технологии проведения СПО</li> <li>5. Негерметичность системы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Авария по причине КЗ</li> <li>2. Аварийный останов скважины, недобор нефти, убытки компании</li> <li>3. Несоблюдение сроков проведения ТОиР, непредвиденные расходы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Недопущение теплового воздействия и нагрузок на электрочасть выше допустимых</li> <li>2. Проведение входного контроля</li> <li>3. Проведение стендовых испытаний в полном объеме и в соответствии с требованиями директивных документов</li> </ol>
КЗ обмотки ПЭД	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пробой изоляции</li> <li>2. Брак изготовления</li> <li>3. Брак монтажа</li> <li>4. Низкое качество масла</li> <li>5. Негерметичность системы</li> <li>6. Превышение нагрузок сверх допустимых</li> <li>7. Заклинивание оборудования механической части ЭПУ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аварийный останов ПЭД, возможен пожар</li> <li>2. Аварийный останов скважины, недобор нефти, убытки компании</li> <li>3. Несоблюдение сроков проведения ТОиР, непредвиденные расходы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Недопущение теплового воздействия и нагрузок на электрочасть выше допустимых</li> <li>2. Проведение входного контроля</li> <li>3. Проведение стендовых испытаний в полном объеме и в соответствии с требованиями директивных документов</li> </ol>
Снижение качества изоляции между жилами и землей	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Пробой изоляции кабеля</li> <li>2. Брак изготовления</li> <li>3. Брак монтажа</li> <li>4. Скрытый заводской дефект кабеля</li> <li>5. Нарушение технологии ремонта кабеля</li> <li>6. Повреждение кабельной линии при изготовлении, транспортировке или монтаже</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Аварийный останов ПЭД, возможен пожар</li> <li>2. Аварийный останов скважины, недобор нефти, убытки компании</li> <li>3. Несоблюдение сроков проведения ТОиР, вывод в ремонт оборудования, непредвиденные расходы</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Недопущение нагрузок выше допустимых</li> <li>2. Проведение входного контроля</li> <li>3. Проведение стендовых испытаний в полном объеме</li> <li>4. Проведение всех операций с кабельной линией в соответствии с требованиями действующей НТД и ЛНД</li> </ol>

На сегодняшний день данный метод представляет собой безотказную методику по повышению надежности ЭПУ и ПЭД НГДП, прошедшую апробацию на промышленных предприятиях автомобилестроения в течение десятков лет и доказавшую свою эффективность.

В рамках данной работы метод FMEA-анализа направлен на решение следующих задач:

- формирование перечня всех возможных дефектов с выборкой по отказам, имеющим наибольшую плотность возникновения и наивысший класс опасности для оборудования, на основании данных статистики о технологических нарушениях на ЭПУ АО «Самаранефтегаз» в Поволжском регионе. При этом учитывается опыт изготовления (заводские дефекты) и испытаний оборудования, а также опыт реальных действий и вероятных ошибок эксплуатирующего персонала в процессе производства, эксплуатации, ТОиР ЭПУ;
- определение в зависимости от вида предполагаемого отказа (дефекта) возможных отрицательных вариантов его возникновения и анализ тяжести сопутствующих последствий с дальнейшей количественной и качественной оценкой их значимости;
- определение с оценкой частоты причины возникновения для каждого возможного дефекта на основании свойств и особенностей конструкции, технологического процесса, условий эксплуатации, ТОиР и т. д.;
- определение на основе анализа технологического процесса корректности и достаточности предлагаемых и принятых мер по предупреждению дефектов в эксплуатации, их обнаружению и устранению во время проведения ТОиР с количественной оценкой возможности исключения возникновения дефектов путем фиксации причин их происхождения на этапах эксплуатации и изготовления элементов ЭПУ;
- оценка в виде численных значений обобщенного балла критичности каждого отказа, дефекта (с его причиной) по так называемому приоритетному числу риска (ПЧР) [16]. При высоких значениях ПЧР следует произвести усовершенствование технологического процесса или оборудования, а также выполнить доработку системы мониторинга и диагностики, проведения ТОиР, пересмотреть требования правил эксплуатации с целью снижения данного показателя.

Проведение FMEA-анализа – достаточно сложная процедура, в основе которой лежит работа группы экспертов по техническим направлениям изготовления, эксплуатации и испытания погружного оборудования скважины. На рис. 2 представлен алгоритм применения метода FMEA-анализа для оценки производственных рисков в эксплуатации парка ЭПУ НГДП. В соответствии с представленным алгоритмом процесс FMEA-анализа [4, 5] условно разделяют на этапы. На первом этапе выполнена выборка дефектов, имеющих наибольшую частоту возникновения, и составлена диаграмма К. Исикавы [3], предложена схема мониторинга причин и следствий, связанных с технологическим отказом в работе ЭПУ. На следующем этапе выполнена оценка комплексного риска дефекта по критериям, установленным ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006) «Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов» [16].

Для каждого рассмотренного дефекта следует определить его балл значимости «*S*», балл возникновения «*O*» и балл обнаружения «*D*» [17]. После получения экспертных оценок *S*, *O*, *D* вычисляют приоритетное число риска (ПЧР) [3, 18] (табл. 3):

$$ПЧР = S \cdot O \cdot D \quad (1)$$

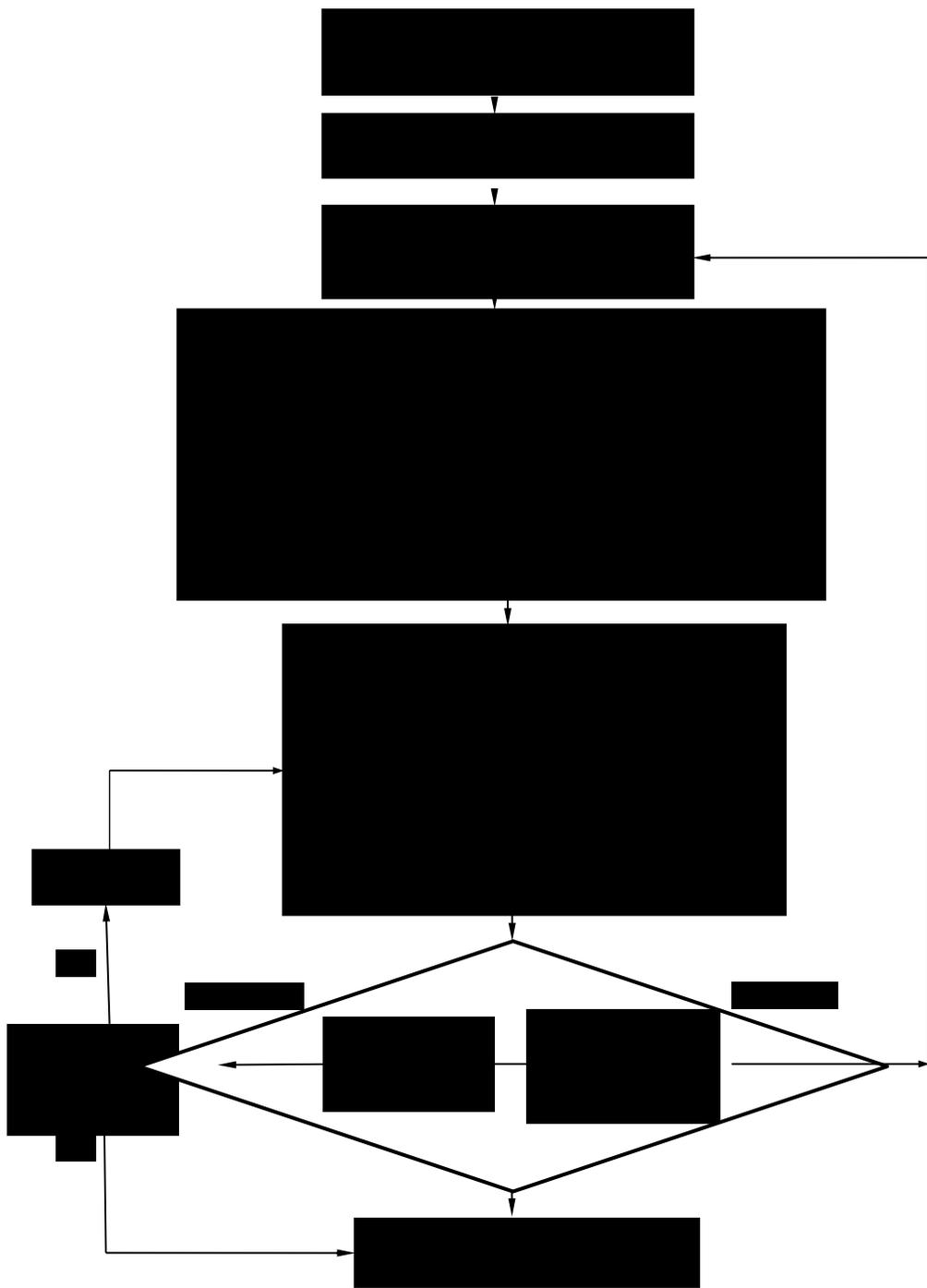


Рис. 2. Алгоритм применения метода FMEA-анализа для оценки производственных рисков в эксплуатации парка ЭПУ НГДП

**Основные причины, влияющие на технологический отказ в работе ЭПУ,  
с вычислением приоритетного значения риска**

Причины	Баллы			
	S	O	D	ПЧР
Полет (расчленение узла)	5	4	8	160
Клин	7	6	8	336
Слом вала (шлицевой муфты)	7	5	4	140
Отсутствие «звезды»	6	5	4	130
Снижение изоляции между жилами и землей	8	9	9	648
КЗ обмотки ПЭД	9	8	8	576

Согласно алгоритму работы по методу FMEA-анализа, приведенному на рис. 2, для «обобщенного балла критичности» должна быть установлена величина критического значения приоритетного числа риска, так называемая критическая граница ( $ПЧР_{кр}$ ), которая находится в пределах значений  $ПЧР$  100–125. Для дефектов с  $ПЧР > 100$ , в некоторых случаях  $> 125$ , следует вести доработку конструкции ЭПУ и ПЭД [16, 19, 20] либо изменение, совершенствование производственного процесса. Анализируя данные, полученные в процессе исследования, можно установить, что все рассмотренные технологические нарушения имеют  $ПЧР$  от 130 до 648 и, следовательно, высокий риск возникновения. Данное обстоятельство еще раз свидетельствует об актуальности темы исследования и необходимости внедрения в производственный процесс добычи углеводородов результатов данной работы.

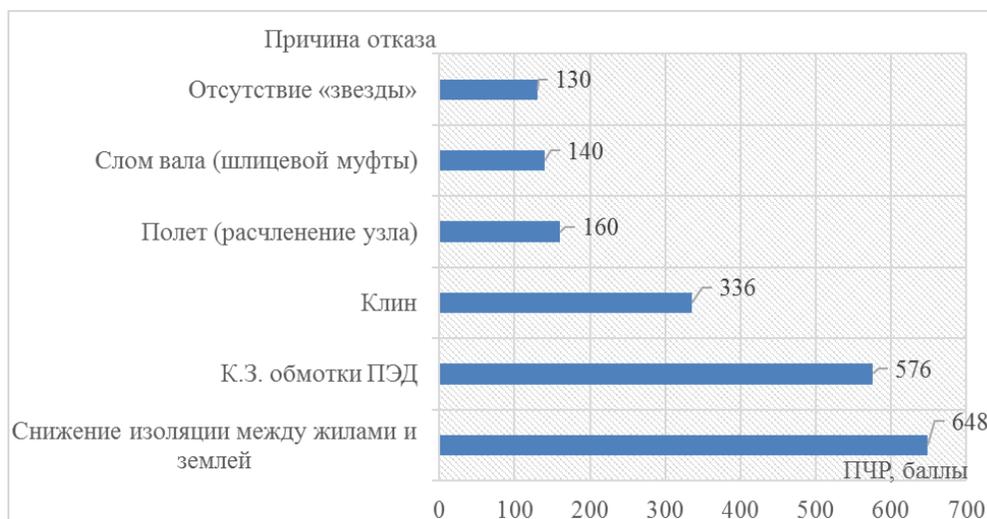


Рис. 3. Диаграмма Парето основных причин, влияющих на отказ в работе ЭПУ НГДП

На основании выполненного анализа и проведенных расчетов по методу FMEA-анализа выполняется построение диаграммы Парето [21]. Она используется при выявлении наиболее значимых и существенных факторов, влияющих на возникновение несоответствий или брака. Это дает возможность установить

приоритет действиям, необходимым для решения проблемы. Диаграмма Парето и ее графическое отображение – правило Парето – позволяют отделить важные факторы от малозначимых и несущественных [22, 23].

В менеджменте качества применение этого правила показывает, что значительное число несоответствий и дефектов возникает из-за ограниченного числа причин. Часто правило Парето формулируется как 80 на 20 [24, 25]. Например, если применить это правило по отношению к дефектам, то окажется, что 80 процентов дефектов возникает из-за 20 процентов причин. На графике, представленном на рис. 3, отражены основные причины, ранжированные по значимости влияния на отказ в работе ЭПУ.

### **Выводы**

1. Обработан и проанализирован статистический материал аварийности ЭПУ и ПЭД в АО «Самаранефтегаз», составлена диаграмма К. Исикавы, позволяющая в графической форме установить наиболее существенные причинно-следственные взаимосвязи между факторами и последствиями возникновения технологических нарушений в эксплуатации ЭПУ и ПЭД.

2. На основе диаграммы К. Исикавы выполнен мониторинг, составлена схема мониторинга, которая устанавливает взаимосвязь между явлениями возникновения отказов в работе ЭПУ и ПЭД, причинами их возникновения, последствиями и предложенными действиями по их исключению в процессе дальнейшей эксплуатации. На данной схеме описаны основные составляющие диаграммы причинно-следственной связи оценки надежности функционирования ЭПУ и ПЭД, а именно: для электрической причины возникновения отказа элементов электротехнического комплекса ЭПУ – снижение изоляции между жилами и землей, КЗ обмотки ПЭД, отсутствие «звезды» (нарушение целостности цепи); для технологической причины отказа (нет подачи) – полет (расчленение узла), слом вала, клин. Остальные виды технологических нарушений являются более частными случаями либо следствием рассмотренных отказов и устраняются по разработанным алгоритмам.

3. Составлена и описана оригинальная методика анализа видов и последствий потенциальных отказов, или FMEA-анализ применительно к НГДП. Получены экспертные оценки и рассчитано приоритетное число риска возникновения каждого отказа, позволяющие дать оценку степени влияния факторов на проблему надежности функционирования ЭПУ и ПЭД. Установлено, что наивысший риск для предприятия составляют отказы, связанные со снижением изоляции между жилами и землей (ПЧР = 648 баллов), КЗ обмотки ПЭД (ПЧР = 576 баллов) и клином УЭЦН (ПЧР = 336 баллов). На основании данных FMEA-анализа составлена диаграмма Парето основных причин, влияющих на отказ в работе ЭПУ НГДП.

4. Выполнена реализация комплексного технико-экономического подхода к решению проблемы повышения надежности технической системы (ЭПУ и ПЭД), основанного на применении методов и инструментов системы менеджмента качества. Результаты проведенного исследования служат основой для дальнейшего экономического расчета рентабельности производства АО «Самаранефтегаз» и принятия взвешенных решений, направленных на устранение узких мест эксплуатации погружного оборудования нефтедобычи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гольдштейн В.Г., Романов В.С.* Методы динамического совершенствования повышения энергоэффективности и надежности погружных электродвигателей нефтедобычи // Динамика систем, механизмов и машин. Динамика электротехнических комплексов и систем. – 2017. – Том 5. – № 3. – С. 96–100.
2. *Романов В.С., Гольдштейн В.Г., Можяев В.Д.* Интеллектуальный подход к построению электроснабжения нефтяной отрасли // XIII Международная научно-практическая конференция «Ашировские чтения». – Самара: СамГТУ, 2016.
3. *Исикава К.* Японские методы управления качеством. – М.: Экономика, 1988. – 199 с.
4. *Данилова С.Ю., Искосков М.О., Руденко А.А.* Анализ научных подходов по управлению производственными системами на предприятиях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – № 16. – С. 1845–1848.
5. *Benjamin Blanchard S.* Logistics Engineering & Management (6th Edition) / Benjamin S. Blanchard. – New York: Prentice Hall, 6th Edition, 2003. – 560 p. – ISBN 0131429159 / 0 13 142915 9.
6. *Романов В.С., Гольдштейн В.Г.* Обзор современного состояния погружных электродвигателей в нефтедобыче с выработкой рекомендаций по повышению энергоэффективности и надежности // XII Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике». – Казань: КГЭУ, 2017. – С. 139–145.
7. *Romanov V.S.* The dynamic improvement methods of energy efficiency and reliability of oil production submersible electric motors / V.S. Romanov, V.G. Goldstein: IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – Volume 944, № 012099, conference 1, 2018.
8. *Сушков В.В., Сухачев И.С.* Мероприятия повышения надежности эксплуатации УЭЦН при воздействиях внутренних и внешних перенапряжений // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: материалы VI международной научно-практической конференции / отв. ред. А.В. Коричко. – Нижневартовск: НВГУ, 2016. – Том 2. – С. 131–133.
9. *Ишмурзин А.А., Пономарев Р.Н.* Анализ влияния геологических факторов на аварийность УЭЦН // Нефтегазовое дело. – 2008. – № 4. – С. 89–96.
10. *Салахов А.Х., Гафаров А.Р., Мухамедьяров Д.А.* Обзор современных конструкций погружных электрических двигателей, эксплуатируемых при нефтедобыче в условиях Крайнего Севера. – ТПУ. – 2015. – Секция 4. – С. 279–281.
11. *Перельман О.М.* Методика определения надежности погружного оборудования и опыт ее применения / О.М. Перельман, С.Н. Пещеренко, А.И. Рябинович, С.Д. Слепченко // Технологии ТЭК. – 2005. – № 3. – С. 66–73.
12. *Таджибаев А.И.* Научные основы систем оценки технического состояния электрооборудования электротехнических комплексов: Дисс. ... докт. техн. наук: 05.09.03. – Самара, 2006. – 373 с.
13. *Нурбосынов Д.Н., Табачникова Т.В., Швецова Л.В., Нурбосынов Э.Д.* Сравнительный анализ энергетических эксплуатационных параметров электротехнических комплексов добывающих скважин с различными видами насосных установок / Промышленная энергетика. – 2013. – № 4. – С. 35–37.
14. *Данилова С.Ю., Искосков М.О.* Подходы к управлению производственными системами на предприятиях // Стратегическое планирование развития городов и регионов. Памяти первого ректора ТГУ С.Ф. Жилкина: IV Международная научно-практическая конференция (Тольятти, 30 июня 2014 г.): сб. науч. трудов: в 2 ч. / отв. ред. Ю.А. Анисимова. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2014. – Ч. 1. – С. 333–337.
15. *Детмер У., Шрагенхайм Э.* Производство с невероятной скоростью: улучшение финансовых результатов предприятия: пер. с англ. – М.: Альпина Паблицерз, 2009. – 330 с. – ISBN 978-5-9614-1047-1.
16. ГОСТ Р 51901.12-2007 (МЭК 60812:2006). Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов.
17. *Ольве Н.Г., Пои Ж., Ветер М.* Сбалансированная система показателей: практическое руководство по использованию сбалансированной системы показателей: пер. с англ. Э.В. Кондукова, И.С. Половица. – М.: Вильямс, 2006. – 304 с. – ISBN 5-8459-0917-1.
18. *Chalice R.* Improving Healthcare Using Toyota Lean Production Methods: 46 Steps for Improvement, Second Edition (2nd Edition) / Robert Chalice. – New York : ASQ Quality Press, 2nd Edition, 2007. – 300 p. – ISBN 0873897137 / 0 87389 713 7.
19. *Костельс М.* Информационная эпоха: экономика, общество, культура: пер. с англ. / М. Костельс; под. науч. ред. О.И. Шкаратана. – М.: Высшая школа экономики, 2010. – 608 с. – ISBN 5-7598-0069-8.

20. *Taiyuti O.* Производственная система Тойоты: уходя от массового производства / пер. с англ. А. Грязнова, А. Тяглова. – М.: Изд-во ИКСИ, 2008. – 194 с. – ISBN 978-5-902677-04-1.
21. *Hammer M.* Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution / M. Hammer, J. Champy. – New York: Harper Collins, 1993. – 272 p. – ISBN 0-060559-53-5.
22. *Hemkumar C. Patankar.* Revolutionising Economic Performance With Taguchi Methodology / C. Hemkumar // 44th European Quality Congress. – 2009. – P. 207–213.
23. *Jan B.H.* Interorganizational Governance in Marketing Channels / B.H. Jan // Journal of Marketing. – 1994. – № 1. – P. 85.
24. *Брайан Маскелл, Брюс Багтали.* Практика бережливого учета: управленческий, финансовый учет и система отчетности на бережливых предприятиях / Пер. с англ. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2010. – 384 с. ISBN 978-5-903148-33-2.
25. *Кох Р.* Принцип 80/20. – М.: Эксмо, 2011. – 340 с.

*Статья поступила в редакцию 15 мая 2018 г.*

## **APPLICATION OF QUALITY MANAGEMENT MECHANISMS TO INCREASE THE RELIABILITY OF OPERATION OF THE ELECTRICAL TECHNICAL COMPLEX OF UNDERGROUND OIL PRODUCTION INSTALLATIONS**

***V.G. Goldstein, V.S. Romanov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

**Abstract.** *The paper proposes a method for increasing the reliability of operation of electric submersible installations (ESI) for oil production, based on the use of quality management mechanisms, such as the diagrams of K. Ishikawa and V. Pareto, as well as the method for analyzing the types and consequences of potential failures. FMEA analysis (Failure Mode and Effects Analysis). Each of these mechanisms is strategically aimed at solving specific problems - K. Ishikawa's diagram (or the fish bone diagram) allows us to graphically determine the most significant cause-effect relationships between the factors and consequences in the problem under study; the FMEA method allows to analyze the technological irregularities, to forecast potentially possible failures (defects), to establish the causes and consequences of their occurrence, to assess the emerging risks and to take measures to eliminate, prevent and reduce damage from their occurrence; on the basis of the FMEA analysis, the construction of the Pareto diagram is carried out, which makes it possible to prioritize the actions necessary to solve the problem. As a result, "narrow" locations in the operation of the ESI are identified and recommendations for their elimination are developed.*

**Keywords:** *submersible electric equipment, submersible electric motors, oil production, reliability, failure statistics data, K. Ishikawa diagram, V. Pareto diagram, FMEA analysis, technological violations.*

---

*Valery G. Goldstein (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Vladimir S. Romanov, Postgraduate student.*

## REFERENCES

1. *Goldstein V.G., Romanov V.S.* Methods of dynamic improvement of energy efficiency and reliability of submersible electric motors of oil production // Journal of Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Dynamics of electrotechnical complexes and systems. – 2017. – Volume 5. – No. 3. – P. 96–100.
2. *Romanov V.S.* Intellectual approach to the construction of power supply to the oil industry / V.S. Romanov, V.G. Goldstein, V.D. Mozhaev: XIII International Scientific and Practical Conference «Ashyrov readings». – Samara: SamSTU, 2016.
3. *Ishikawa K.* Japanese methods of quality management. – M: Economics, 1988. – 199 p.
4. *Danilova S.Yu., Iskoskov M.O., Rudenko A.A.* Analysis of scientific approaches to the management of production systems at enterprises // Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – № 16. – S. 1845–1848.
5. *Benjamin Blanchard S.* Logistics Engineering & Management (6th Edition) / Benjamin S. Blanchard. – New York: Prentice Hall, 6th Edition, 2003. – 560 p. – ISBN 0131429159 / 0 13 142915 9.
6. *Romanov V.S.* Review of the current state of submersible electric motors in oil production with the development of recommendations for improving energy efficiency and reliability / V.S. Romanov, V.G. Goldstein: XII All-Russian Open Youth Scientific and Practical Conference «Dispatching and Management in the Electric Power Industry». – Kazan: KGEU, 2017. – pp. 139–145.
7. *Romanov V.S.* Methods for dynamically improving energy efficiency and reliability of submersible electric motors for oil production / V.G. Goldstein, V.S. Romanov // Journal of Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Dynamics of electrotechnical complexes and systems. 2017. – Volume 5. – No. 3. – P. 96–100.
8. *Sushkov V.V.* Measures to improve the reliability of ESP operation under the influence of internal and external overvoltages / V.V. Sushkov, I.S. Sukhachev // Culture, science, education: problems and prospects: materials of the VI International Scientific and Practical Conference / otv. Ed. A.V. Korichko. – Nizhnevartovsk: NVNGU, 2016. – Volume 2. – P. 131–133.
9. *Ishmurzin A.A., Ponomarev R.N.* Analysis of the influence of geological factors on the ESP accident rate // Neftegazovoye delo. – 2008. – No. 4. – P. 89–96.
10. *Salakhov A.Kh., Gafarov A.R., Mukhamedyarov D.A.* Overview of modern designs of submersible electric motors used in oil production in the extreme north. – TPU. – 2015. – Section 4. – P. 279–281.
11. *Perelman O.M.* Methods for determining the reliability of submersible equipment and the experience of its application / O.M. Perelman, S.N. Peshcherenko, A.I. Ryabinovich, S.D. Slepchenko // Technologies of Fuel and Energy Complex. – 2005. – № 3. – P. 66–73.
12. *Tadjibaev A.I.* Scientific foundations of systems of an estimation of a technical condition of an electric equipment of electrotechnical complexes: Dis .... kand. Doct. tech. Sciences: 05.09.03. – Samara, 2006. – 373 p.
13. *Nurbosynov D.N., Tabachnikova T.V., Shvetskova L.V., Nurbosynov E.D.* Comparative analysis of energy performance parameters of electrotechnical complexes of producing wells with various types of pumping units / Industrial power. – 2013. – No 4. – P. 35–37.
14. *Danilova S.Yu.* Approaches to the management of production systems at enterprises / Danilova S.Yu., Iskoskov M.O. // Strategic planning of the development of cities and regions. In memory of the first rector of TSU S.F. Zhilkina: IV International Scientific and Practical Conference (Togliatti, June 30, 2014): a collection of scientific papers: at 2 pm / ot. Ed. Yu.A. Anisimova. – Togliatti: Publishing house of TSU, 2014. – Part 1. – S. 333–337.
15. *Detmer U.* Production with incredible speed: improving the financial results of the enterprise: Per. with English / W. Detmer, E. Shragenheim. – M.: Alpina Publishers, 2009. – 330 p. – ISBN 978-5-9614-1047-1.
16. GOST R 51901.12-2007 (IEC 60812: 2006). Risk management. Method for analyzing the types and consequences of failures.
17. *Olve N.G.* Balanced Scorecard: A Practical Guide to Using a Balanced Scorecard / N.G. Olve, Zh. Roy, M. Veter; trans. with English. E. V.V. Kondukova, I.S. Polovitsa. – M.: Williams, 2006. – 304 p. – ISBN 5-8459-0917-1.
18. *Chalice R.* Improving Healthcare Using Toyota Lean Production Methods: 46 Steps for Improvement, Second Edition (2nd Edition) / Robert Chalice. – New York : ASQ Quality Press, 2nd Edition, 2007. – 300 p. – ISBN 0873897137 / 0 87389 713 7.
19. *Kostels M.* Information Age: Economics, Society, Culture: Per. with English. M. Costels; under. sci. Ed. O.I. Shkaratan. – M.: Higher School of Economics, 2010. – 608 c. – ISBN 5-7598-0069-8.

20. *Taiichi O.* Toyota Production System: Leaving Mass Production / O. Tayiti; trans. with English. A. Gryaznov, A. Tyaglova. – M.: IKSI Publishing House, 2008. – 194 p. – ISBN 978-5-902677-04-1.
21. *Hammer M.* Reengineering the corporation: A manifesto for business revolution / M. Hammer, J. Champy. – New York: Harper Collins, 1993. – 272 p. – ISBN 0-060559-53-5.
22. *Hemkumar C. Patankar.* Revolutionising Economic Performance With Taguchi Methodology / C. Hemkumar // 44th European Quality Congress. – 2009. – P. 207–213.
23. *Jan B.H.* Interorganizational Governance in Marketing Channels / B.H. Jan // Journal of Marketing. – 1994. – № 1. – P. 85.
24. *Brian Maskell, Bruce Bagtali.* Practice of lean accounting: management, financial accounting and reporting system at lean enterprises / Per. with English. – Moscow: Institute for Comprehensive Strategic Studies. 2010. – 384 s. ISBN 978-5-903148-33-2.
25. *Koch R.* Principle 80/20. – M.: Exmo, 2011. – 340 with.