

УДК 622.279

В.С. Черников, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, e-mail: Chernikov_V_S@hotmail.com

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Изучение надежности УЭЦН связано со случайными появлениями нежелательных событий или отказов во время работы. ГОСТ 27.002-89 дает следующее определение термина надежность: «Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования».

В данной статье хотелось бы использовать другое определение для надежности УЭЦН. «Надежность системы представляет собой вероятность того, что при работе в заданных условиях система будет удовлетворительно выполнять требуемые функции в течение установленного времени». Преимуществом данного определения является возможность точной оценки надежности через вероятность, как количественную меру надежности, хотя при таком определении и очевидны некоторые проблемы:

- 1) сложность оценки возможности появления отказа;
- 2) принятие принципа удовлетворительной работы системы, параметры

которой монотонно снижаются с течением времени;

3) необходимость оценки соответствия заданным окружающим условиям (условиям работы).

При оценке надежности системы прежде всего необходимо определить и систематизировать различные виды отказов системы. К сожалению, иногда бывает исключительно трудно дать однозначное определение отказа. Разумеется, полный и катастрофический отказ обнаружить легко, однако характеристики системы могут ухудшаться постепенно с течением времени, и только тонкая грань отделяет исправное состояние системы от отказа. По существу, необходимо найти логический

способ определения различных видов отказов системы. Если функция системы и критерии отказов заданы в явном виде, то надежность может точно быть выражена количественно через вероятность (рис. 1).

УПРАВЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТЬЮ И ЕЕ ПОВЫШЕНИЕ

Надежность является точно таким же внутренним свойством системы, как и подача УЭЦН или ее номинальная мощность. Уровень конструкционной надежности устанавливается на этапе проектирования, и впоследствии, при проведении испытаний и изготовлении продукции, нельзя его повысить без внесения изменений в основную конструкцию [5]. Таким образом, конструктор находится в наиболее выгодном положении с точки зрения возможности обеспечения надежности оборудования, поэтому он должен знать основные положения теории надежности и осуществлять взаимодействие с группой надежности компании – производителем. Однако часто незнание конструкторами принципов обеспечения надежности, отсутствие информации о наработках до отказа, использование оборудования не по назначению и т.д. препятствуют установлению уровня конструкционной надежности.

Для успешного обеспечения надежности оборудования необходимо, чтобы за надежность всей системы в целом отвечала специальная группа. Эта группа

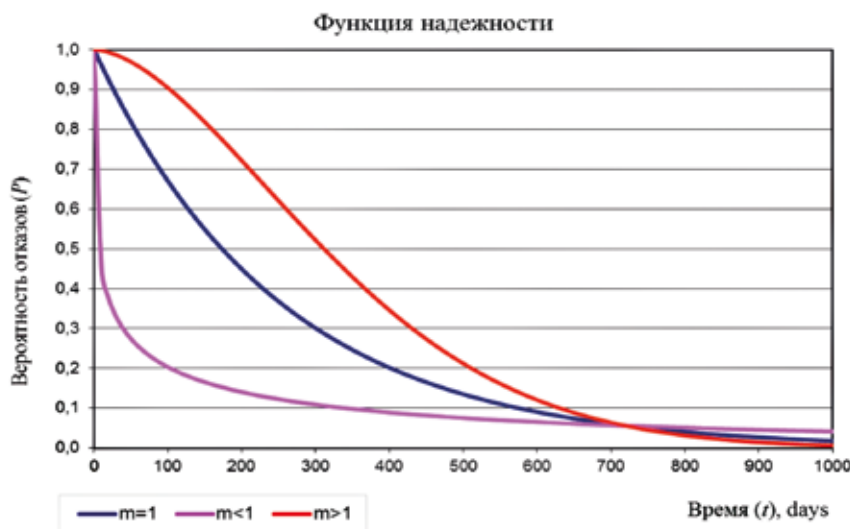


Рис. 1. Функция вероятности безотказной работы (функция надежности), где $m > 0$ – параметр формы или угловой коэффициент распределения

надежности должна оказывать помощь при проведении анализа, задании показателей надежности и информировании о ходе работ по их обеспечению. Она должна быть также достаточно компетентной, чтобы наладить взаимодействие на этапе проектирования и обеспечить работу на уровне систем. Поэтому кроме понимания математического аппарата теории надежности группа должна обладать хорошими знаниями принципов проектирования, проблем сопряжения элементов системы, инженерной психологии и уметь выполнять анализ экономической эффективности. Чтобы управлять показателями качества системы, группа должна иметь эффективную и хорошо организованную систему сбора, анализа и обобщения данных о показателях надежности проектируемых и ранее разработанных изделий. Руководители фирмы не должны сомневаться в выгоды хорошей программы обеспечения надежности, хотя значительно легче подсчитать затраты на содержание группы, чем выгоды от нее. Это же относится и к испытаниям изделий. Очевидно, что единственным

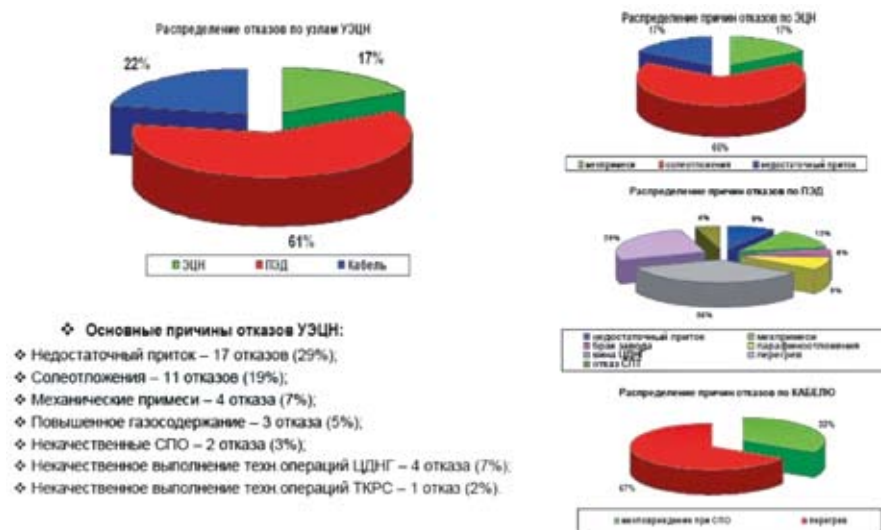


Рис. 2. Распределение отказов УЭЦН по узлам и причинам в ОАО «ТНК-Нягань»

способом заранее измерить надежность системы является проведение испытаний УЭЦН или ее элементов в условиях, имитирующих реальные условия эксплуатации до возникновения отказа. Не имея соответствующих данных, невозможно оценить надежность, и, разумеется, чем больше имеется данных, тем более достоверной будет оценка уровня надежности. Таким образом, необходимо находить определенный

компромисс между ценностью более достоверной оценки надежности и затратами на проведение дополнительных испытаний. В большинстве случаев именно человек управляет УЭЦН и следит за ее работой. Человека необходимо рассматривать как еще один фактор, способный ухудшить или улучшить эксплуатационную надежность установки. Ухудшение надежности может быть просто резуль-



АРМ ГАРАНТ



Электроприводы ЭВИМТА для задвижек Ду 50 - 1200 мм
Пневмоприводы ПСДС для шаровых кранов Ду 300 - 1000 мм
Монтажные, пусконаладочные, ремонтные работы
 на объектах нефтегазового комплекса

450059, г. Уфа, ул. Р. Зорге, 19/5
тел./факс: (347) 223-74-15, 223-74-17
e-mail: armgarant@ufamail.ru
www.armgarant.ru

Таблица 1. Возможные отказавшие компоненты УЭЦН

Система	Компонента	Подкомпоненты
Компоновка УЭЦН	Кабель УЭЦН	• Основной силовой кабель • Адаптер концевой муфты • Кабельный удлинитель • Места сращения • Пакерный пенетратор • Устьевого пенетратор • Часть кабельного ввода «Пигтейл» • Неизвестный подкомпонент
	Двигатель УЭЦН	• Основание • Масло • Статор • Муфта • Уплотнительные кольца • Узел пяты • Фильтр • Подшипник ротора • Ротор • Головка • Неизвестный подкомпонент • Корпус • Вал • Система циркуляции масла • Шпонка
	Насос УЭЦН	• Колеса • Основание/ввод • Уплотнительные кольца • Вал • Головка/выкид • Направляющие аппараты • Корпус • Приемная сетка • Опорные подшипники вала • Муфта • Стопорные кольца • Неизвестный компонент • Пружинные кольца • Шпонка
	Входной модуль УЭЦН (газосепаратор, диспергатор)	• Основание • Секция подачи жидкости • Стопорные кольца • Колеса • Опорные подшипники вала • Уплотнительные кольца • Вал • Направляющие аппараты • Пружинные кольца • Муфта • Отверстия/входная сетка • Радиальные подшипники • Головка • Отверстия/выходная сетка • Секция сепарации/ротор • Корпус • Неизвестный подкомпонент • Шпонка
	Гидрозащита УЭЦН	• Гидрозатворная камера • Диафрагма • Масло • Торцевые уплотнения • Основание • Корпус • Уплотнительные кольца • Узел пяты • Муфта • Перепускные клапаны • Головка • Вал • Неизвестный подкомпонент • Шпонка
	Прочее	• Внутрискважинные датчики • Кожух

татом усталости оператора или ослабления его внимания. Следует также отметить, что операторы могут повысить надежность системы, выполняя функции, не предусмотренные первоначальной конструкцией, но оказавшиеся необходимыми при устранении недостатков системы. Поэтому для получения полной картины надежности необходимо учитывать человека как элемент системы, и группа обеспечения надежности должна понимать взаимодействие между человеком и установкой и уделять ему внимание [1].

Надежность часто можно улучшить на начальном этапе разработки и испытания системы. Повышение надежности можно обеспечить за счет различных факторов. Например, при появлении отказов их анализ дает информацию, используемую для совершенствования системы. Кроме того, опыт, полученный при создании опытных образцов, можно использовать для изготовления более совершенных элементов. Если производится систематическая оценка надежности в начальном периоде эксплуатации, то обнаруживается повышение надежности за счет своевременного изменения конструкции изделия или режима работы установки. Это явление называется «ростом надежности» [5]. В задачу группы обеспечения надежности входят наблюдение, прогнозирование и информирование о наличии роста надежности. Эти прогнозы и сообщения о наличии роста надежности указывают на степень продвижения к заданным по-

казателям надежности. Кроме того, они дают основу, позволяющую определить, будет ли достигнут требуемый уровень надежности к установленному сроку. Если окажется, что поставленных целей нельзя достичь к определенному сроку, то заблаговременно в программу можно внести соответствующие изменения.

ВЫВОДЫ ОБ УПРАВЛЕНИИ НАДЕЖНОСТЬЮ И ЕЕ ПОВЫШЕНИИ

Решения проблем надежной работы или дорогостоящего обеспечения надежности никогда не вносятся в систему заранее. Однако поскольку такие проблемы возникают, желательно использовать независимые друг от друга формальные процедуры повышения надежности, а именно – на начальном этапе проектирования. К таким методам относят:

- пересмотр конструкции;
- анализ причин отказов (см. рис. 2);
- анализ дерева отказов.

Ясно, что легче и экономически более выгодно повышать надежность до того, как будут приняты окончательные решения о конструкции изделия и его выпуске. Однако повышение надежности в начале этапа проектирования в значительной степени зависит от опыта персонала, разрабатывающего изделие, так как работа, по существу, начинается с технического задания на разработку рабочих чертежей и предварительных образцов и на этом этапе отсутствуют какие-либо достоверные данные, необходимые для количественной оценки надежности [2].

Пересмотр конструкции, то есть формальный анализ проекта с ведением соответствующей документации, осуществляется комиссией, в которую входят ведущие работники фирмы, обладающие опытом в таких областях, как проектирование, надежность и учет производственных затрат. Пересмотр конструкции обычно продолжается на протяжении нескольких стадий разработки изделия. На каждой стадии уточняются результаты проделанной работы, и, таким образом, пересмотр конструкции основывается на текущей информации.

Анализ характера отказов представляет собой процедуру предварительной оценки конструкции, применяемую для определения ее недостатков, которые могут вызывать помехи безопасной работе или затруднить обеспечение надежности. Процедура анализа характера отказов начинается на уровне элементов (табл. 1), которые могут отказать. Затем прослеживаются последствия отказа до уровня системы в целом. Идентифицируются все отказы элементов, способные вызвать критические последствия для установки; они по возможности устраняются или контролируются.

Анализ дерева отказов начинается с определения нежелательного события, и это событие прослеживается через всю систему до выяснения его основных причин. Этот метод анализа сверху вниз может применяться для определения многочисленных проблем, включая не-

исправности, вносимые оператором. Ценность этого метода состоит в том, что он требует рассматривать систему в целом. В процессе проектирования часто отдельные узлы установки разрабатываются независимыми группами конструкторов, и поэтому могут оставаться необнаруженными отказы, возникающие при объединении узлов установки.

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ УЭЦН

Эксплуатация скважин УЭЦН относится к сложным с точки зрения оптимизации процессам [4]. Данный факт обусловлен наличием большого количества взаимосвязанных параметров, изучение и контроль которых сложно осуществить. Необходимость одновременного регулирования довольно большого количества параметров затрудняет комплексное решение проблемы работы фонда скважин.

Отличительной особенностью решения вопросов надежности для систем нефтедобычи является сложная связь конструктивной надежности элементов системы и ее подсистем с технологическими особенностями разработки месторождений. При построении моделей расчета надежности для нефтепромышленного оборудования следует учитывать отказы систем, подсистем, элементов. Разделение объектов на системы, подсистемы и элементы зависит от их выбора и степени подробности их рассмотрения [6]. Например, при глубинно-насосной добыче в качестве отдельных подсистем следует брать подсистемы «Наземное оборудование», «Подземное оборудование» и «Колонна НКТ». Указанные подсистемы, в свою очередь, состоят из элементов.

Эксплуатация УЭЦН прекращается при ее полной потере работоспособности, обуславливаемой либо невозможностью ее продолжения (аварийное состояние), либо нецелесообразностью по причинам техническим, технологическим, экономическим, технике безопасности, охраны окружающей природы, либо необходимостью проведения технического обслуживания, плановых ремонтов, исследовательских работ. Нефтепромышленное оборудование может находиться также в состоянии частичного отказа, т.е. в состоянии, когда система

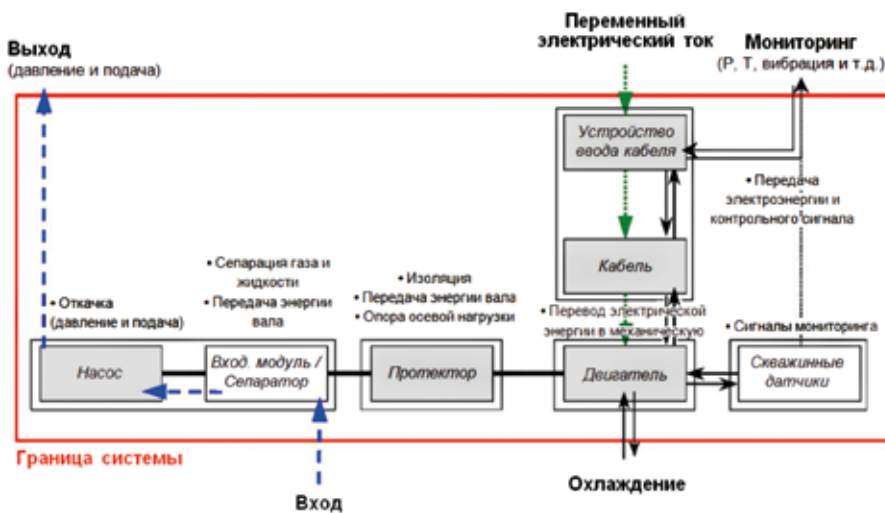


Рис. 3. Функциональная блок-схема погружной части системы УЭЦН

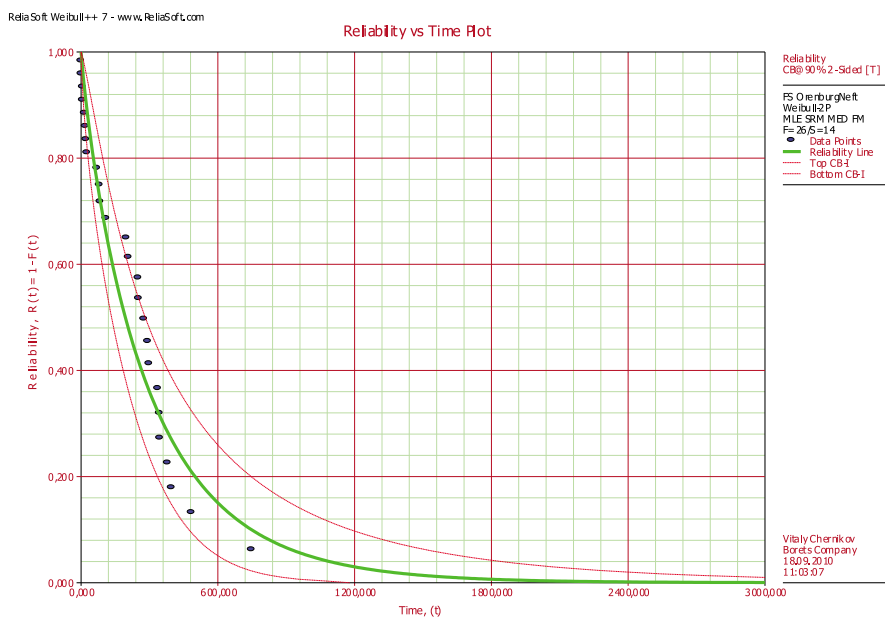


Рис. 4. Количественная мера надежности УЭЦН как сложной технической системы

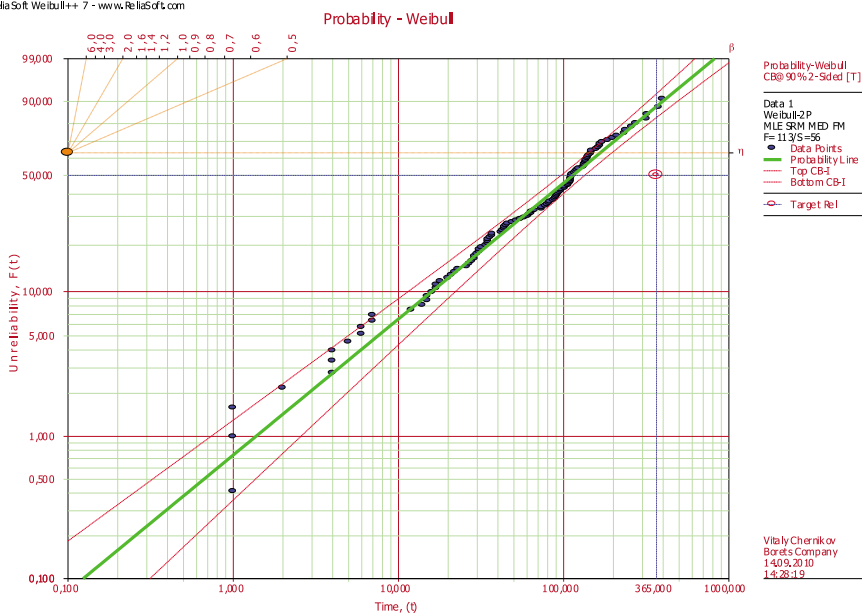
функционирует с пониженной производительностью. С другой стороны, полные отказы элементов приводят к частичному отказу системы. Таким образом, взаимосвязь отказов элементов и систем весьма сложна из-за многообразия объективных и субъективных причин, характера проявления и последствий и зависит от функциональной схемы каждой рассматриваемой системы (рис. 3).

Наличие в системе дефектных элементов, ошибки обслуживающего персонала, а также осложненные условия работы могут приводить к внезапным отказам системы. В технических системах, как показывает статистический анализ отказов, большинство внезапных отказов происходит с по-

стоянной интенсивностью на всем периоде эксплуатации. Однако и в таких системах есть элементы, обладающие наибольшим диапазоном стойкости по отношению к условиям окружающей среды, а также элементы и механизмы, износостойкость которых со временем ухудшается и которые эксплуатируются вплоть до отказа. В настоящее время существует мнение, что внезапные отказы не поддаются прогнозированию. На самом же деле резкие скачкообразные изменения параметров всегда сопровождаются предшествующим им постепенным изменением свойств объектов системы.

Система сбора статистических промышленных данных по надежности УЭЦН должна обеспечивать получение со-

ReliaSoft Weibull++ 7 - www.ReliaSoft.com



$\beta=0.9586$, $\eta=166.6057$

Рис. 5. Вероятность распределения Вейбулла (на графической бумаге в логарифмических координатах)

поставимых и объективных данных надежности скважин, оборудованных одинаковыми насосами, определение причин возникновения отказов и неисправностей, выявление влияния условий и режимов эксплуатации на их надежность. Оборудование нефтяных промыслов не проходит стадию испытаний на надежность, поэтому необходимую информацию об отказах и неисправностях нефтепромыслового оборудования получают только в процессе его эксплуатации непосредственно на промыслах [3].

Надежность, как качественная характеристика, всегда принимается во внимание при решении различных вопросов эксплуатации технических устройств, однако количественное определение надежности представляет определенные затруднения. Особенностью количественных характеристик надежности является их вероятностно-статистическая природа. Как показывает практика, поступающие в эксплуатацию однотипные технические устройства, например погружные насосы, даже будучи изготовленными на одном заводе, проявляют различную способность сохранять свою работоспособность. Вследствие этого в процессе эксплуатации отказы сложных технических систем происходят в самые неожиданные моменты. Естественно, возникает вопрос: существуют ли вообще какие-либо закономерности в появлении отказов? Практика показывает,

что закономерности в появлении отказов существуют, и для их установления следует вести наблюдения за многими техническими устройствами, а для обработки результатов наблюдений – применять методы математической статистики и теории вероятностей.

В качестве количественной меры надежности сложных технических систем, характеризующей закономерности появления отказов во времени, принимается вероятность безотказной работы (рис. 4).

$P(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^m}$, где $\theta > 0$ – параметр масштаба или ресурсная характеристика,

$\theta = \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{m}}}$; $m > 0$ – параметр формы или угловой коэффициент распределения;

$t > 0$ – анализируемое время наработки оборудования.

Вероятность не является единственной характеристикой надежности УЭЦН: к ним относятся также среднее время безотказной работы, интенсивность отказов и плотность вероятности отказов. Таким образом, количественно надежность сложной системы равна вероятности того, что время ее безотказной работы будет больше заданного промежутка времени.

Изучая физическую природу возникновения отказов, можно познать закономерности их появления. Прежде всего заметим, что каждый элемент сложной

системы имеет целевое назначение, для выполнения которого ему при изготовлении придаются определенные свойства, проявляющиеся лишь при взаимодействии с внешней средой. Внешняя среда представляет собой совокупность нагрузок, воспринимаемых системой благодаря наличию у нее определенных свойств. Если система теряет хотя бы одно свойство, то очевидно, что она не сможет воспринимать какую-либо нагрузку внешней среды. Исследование плотности распределения отказов электроцентробежных насосных установок в зависимости от характеристики пластов и скважины показывает, что для повышения эксплуатационной надежности необходимо выбирать режимы работы УЭЦН с максимальным КПД, а типоразмеры ЭЦН должны выбираться с учетом характеристик скважины, добываемой жидкости и пласта.

Показатели надежности, рассмотренные с точки зрения теории вероятности, представляют собой в основном величины, определяемые различными методами при известном законе распределения времени безотказной работы. Поэтому задачей математической обработки статистических данных об отказах оборудования для оценки показателей надежности является определение закона распределения и его параметров.

По данным статистического ряда строятся графики статистических функций показателя надежности и вероятности распределения (рис. 5). Однако неодинаковые геологические условия, режимы эксплуатации насосов, физико-химические свойства продукции и характеристики конструкции скважин приводят к построению законов распределения отказов УЭЦН с различными параметрами распределения. Знание значений параметров распределения для различных геологических условий может позволить эффективно рассчитывать вероятность безотказной работы оборудования и, соответственно, говорить о возможной наработке на отказ в конкретных скважинных условиях.

Были рассмотрены основные показатели надежности УЭЦН. В данной работе вероятность безотказной работы $P(t)$ выражается как функция времени t . При предварительном анализе на этапе проектирования очень трудно определить,

как будет изменяться функция $P(t)$ во времени. Иначе говоря, без накопленного в прошлом большого опыта в ходе испытаний трудно правильно выбрать распределение наработки до отказа или модель интенсивности отказов.

Целесообразно рассматривать статический, или постоянный, уровень надежности. Когда это делается, то имеется в виду, что задан некоторый базовый промежуток времени. Таким промежутком времени может быть гарантийный срок службы УЭЦН или какой-либо другой подходящий период. Если такой промежуток времени выбран, то значение надежности системы оценивается на основании опыта. Эти показатели надежности используются для определения соответствия изделия техническим требованиям с точки зрения надежности.

Трудной с практической точки зрения проблемой является выбор распределения наработки до отказа. Без большого объема результатов испытаний трудно определить, какое именно распределение подойдет лучше всего. Эти модели обычно обеспечивают хорошее соответствие экспериментальным данным в средней части области случайных величин, однако они отличаются друг от друга в области больших отклонений. В теории надежности основное внимание обычно сосредоточено на обеспечении высокой надежности, т.е. наибольшее значение, к сожалению, имеют именно эти участки распределения. Хотя существует много статистических критериев согласия, на практике обычно имеется ограниченный объем результатов испытаний, и выбор распределения лучше всего производить на основании опыта, приобретенного для УЭЦН в аналогичных условиях эксплуатации.

В случае распределения Вейбулла может применяться быстрая и очень наглядная процедура графического оценивания, что является большим преимуществом этого распределения. Однако при малых выборках графические методы могут давать систематическую ошибку, особенно при оценивании малых процентилей распределения. К сожалению, в инженерной практике оценивание малых процентилей при малом объеме выборки является правилом, а не исключением. В этом случае лучшие результаты дает применение методов статистического оценивания параметров распределения Вейбулла.

Литература:

1. Barlow R.E., Proschan F. *Statistical theory of reliability and life testing: probability models.* – Michigan: Holt, Rinehart and Winston, 1975. – 290 p.
2. Боровков А.А. *Математическая статистика. Оценка параметров. Проверка гипотез.* – М.: Наука, 1984. – 472 с.
3. Вентцель Е.С. *Теория вероятностей. Изд. 4-е, стереотипное.* – М.: Наука, 1969. – 576 с.
4. Залиханов А.В., Хисамутдинов Н.И., Ибрагимов Г.З. *Подземный ремонт насосных скважин.* – М.: Недра, 1978. – 200 с.
5. Капур К., Ламберсон Л. *Надежность и проектирование систем / Под редакцией Ушакова И.А.* – М.: Мир, 1980. – 610 с.
6. Кучумов Р.Я., Сагитова Р.Г., Ражетдинов У.З. *Методы повышения эксплуатационной надежности нефтепромыслового оборудования.* – Уфа: Башкнигоиздат, 1983. – 112 с.

**BROEN
BALLOMAX®**

**Шаровые краны
для природного газа
и светлых нефтепродуктов**

BROEN

INTELLIGENT FLOW SOLUTIONS



www.broen.ru