

## Задача предупреждения неисправности технологического объекта нефтегазохимического комплекса по результатам анализа статистической выборки

*Д.А. Кравченко, В.И. Финаев*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** статистический анализ является важной доказательной частью диагностического обследования нефтегазохимического комплекса. Рассматриваются наиболее востребованные виды статистического анализа. В статье внимание уделено аналитическому обзору статистических методов, достоинствам, недостаткам. Показаны этапы статистического обследования технологического объекта. На примере исследования механической части газоперекачивающего агрегата показано преимущество применения статистических методов.

**Ключевые слова:** статистический анализ, техническая диагностика, нефтегазохимический комплекс, газоперекачивающий агрегат, распределение, метод минимального риска, метод минимального числа ошибок, метод минимакса, метод Неймана–Пирсона, метод наибольшего правдоподобия.

### Актуальность и цель исследования

На работоспособность нефтегазохимического комплекса (далее технологического объекта) влияет большое количество факторов различной природы, которые связаны с условиями эксплуатации, особенностями конструкции и др. С одной стороны, современный технологический объект характеризуется высоким уровнем абберации [1], который возникает в большей степени из-за большого количества систем, комплексов, а также сложной структуры взаимодействия их между собой. С другой стороны, возрастает объем статистической выборки.

На протяжении всего периода эксплуатации технологического объекта внедрение системы диагностики является актуальной задачей. Начиная с интуитивных обобщений методом проб и ошибок через осмысление разрозненного эмпирического опыта различных специалистов и заканчивая применением соответствующего математического аппарата, разрабатывается система комплексной диагностики. Её целью является (без непосредственного участия специалиста–эксперта) предвидеть и

---

математически обосновать поведение технологического объекта в будущем, а также дать соответствующие рекомендации эксплуатационному персоналу.

Как показано [1, 2, 3], применение технической диагностики позволяет выявлять неисправности на ранней стадии их развития. Разработка прогнозной системы опирается на данные комплексного статистического исследования [1, 3] технологического объекта. Комплексное статистическое исследование представляет собой сложную задачу. Для анализа полученных данных на стадии её разработки необходимым условием является участие специалистов–экспертов различных направлений деятельности.

Каждый диагноз должен основываться на убедительных доводах. Данные, из которых этот диагноз получают, должны быть получены в ходе четко спланированного диагностического исследования, использующего в том числе методы статистического анализа.

Любое диагностическое исследование начинается с определения его цели. Таковой, например, может быть изучение влияния различных факторов на механическую часть газоперекачивающего агрегата (далее ГПА). В преддверии будущего исследования четко указываются все данные, которые должны быть собраны в ходе его выполнения, методика получения каждого результата, а также заранее определяются методы статистического исследования. Проводится предварительная оценка необходимого объема диагностического исследования, которая необходима для того, чтобы выбрать метод диагностического исследования. При выполнении всего перечисленного полученный результат может приниматься, например, для построения прогнозной модели.

Интенсификация технологических объектов приводит к увеличению уровня автоматизации технологического объекта. В свою очередь, это обстоятельство приводит к увеличению объема данных. Данные и размеры выборок могут сильно различаться, возникает необходимость использования

---

методов статистического анализа, применимых к исследованию. Расчет статистических параметров, которые позволяют оценить граничные значения, вероятности появления той или иной величины, средний риск, а также корреляция анализируемых данных происходит по определенной технологии с использованием математических преобразований и создания моделей адекватных задач исследования.

Целями этого исследования являются:

- аналитический обзор известных статистических методов, применимых для задачи диагностики технологического комплекса;
- выявление квинтэссенции явлений и процессов в условиях достаточного объема информации;
- попытка донести до специалистов в области технической диагностики методологию применения статистического анализа на примере исследования механической части ГПА.

В этой работе мы не претендуем на всеохватность и всесторонность, исследования и рассматриваем методы, востребованные для задач диагностики технологического объекта. В качестве примера приведено статистическое исследование механической части ГПА.

### **Аналитический обзор известных методов**

На сегодняшний день существует множество программных продуктов, позволяющих провести статистическое обследование, например, IBM SPSS Statistics (International Business Machines, USA, New York), Statistica (Dell Technologies, USA, Texas), SAS Institute (Statistical Analysis System, USA, North Carolina) и др. Для того чтобы применять имеющиеся программные средства, специалисту необходимо [4]:

- определить цель и объект исследования;
- определить состав признаков, подлежащих регистрации;
- разработать процедуры для сбора данных;

- выбрать группированный признак;
- определить порядок формирования групп;
- знать метод, положенный в основу проведения статистического обследования, его математическую модель;
- разработать предложения и рекомендации по совершенствованию статистического наблюдения.

Без четкого понимания вышеприведенных этапов наличия доступных компьютерных программ, которые способны быстро проанализировать данные с целью обнаружения статистических закономерностей, не приведет исследователя к достоверным заключениям. Скорее наоборот, послужит источником ошибок и бездоказательным результатом.

Основная доля статистических методов основана на гипотезе об имеющейся априорной вероятности для однородных сущностей, находящихся в одинаковых условиях. В большинстве методов подбор решающего правила в этих условиях проводится на основе выбора некоторого критерия оптимальности. Одним из существенных недостатков является невозможность проведения детального анализа диагностической информации.

Статистические методы в абсолютном большинстве [2] предоставляют возможность выбора решающего правила, исходя из данной конкретной ситуации. Минимизация одной из ошибок постановки диагноза при заданном уровне другой. Оценки ошибок часто неизвестны, а их достоверное определение часто связано с большими трудностями. Вместе с тем ясно, что во всех случаях желательно при определенном (допустимом) уровне одной из ошибок минимизировать значение другой. Поэтому центром проблем является обоснованный выбор допустимого уровня ошибок на основе предыдущего опыта или интуитивных соображений.

Обзор научных работ в области применения статистических методов распознавания диагностических признаков показал: особое место занимает метод Байеса. В его основе теорема [5], в которой утверждается, что если плотности распределения каждого из классов диагнозов известны, то необходимый алгоритм может быть записан в аналитическом виде. Метод достаточно прост и дает хорошие результаты пересчета вероятностей появления события при получении новой диагностической информации.

Достоинствами применения метода Байеса являются:

- применимость при ограниченном объеме статистической выборки;
- отсутствие ограничения на точность исследуемого параметра;
- для оценки значения неизвестных переменных применяют апостериорные распределения.

Метод имеет недостатки:

- отсутствует способ выбора априорного распределения;
- требует больших вычислительных затрат;
- нечувствителен к эпизодическим состояниям, в которых может находиться объект исследования.

Одним из существенных недостатков метода Байеса является большое количество априорной информации о состоянии диагностируемого объекта, которая должна быть в распоряжении исследователя. Этот недостаток наиболее отчетливо проявляется при анализе задач обнаружения дефекта, когда указать априорные вероятности наличия дефекта в заданной области пространства и потери за счет ложного обнаружения дефекта оказывается весьма затруднительным. Поэтому в подобных задачах вместо метода Байеса целесообразно использовать критерий Неймана–Пирсона [2, 3]. Согласно этому критерию выбирается такое правило обнаружения, которое обеспечивает минимальную величину вероятности пропуска дефекта при условии, что вероятность ложной тревоги не превышает заданной величины.

---

Здесь центр проблемы переносится на обоснованный выбор допустимой границы вероятности ложной тревоги.

Для того чтобы понять, является ли полученный диагноз достоверным, применяют неравенство Рао–Крамера [6]. При некоторых условиях на статистическую модель оно даёт нижнюю границу для дисперсии оценки неизвестного параметра, выражая её через информацию Фишера [2].

Если число состояний заранее не известно, целесообразно применить метод, предложенный Вальдом [7], в котором рассматриваются отношения вероятностей признаков, составленных в последовательном порядке. В соответствии с этим критерием каждое действие оценивается по наихудшему для него состоянию, и оптимальным является действие, приводящее к наилучшему из наихудших состояний.

Достоинствами применения метода Вальда являются:

- возможность поставить диагноз при неполном наборе значений диагностических признаков;
- распознавание состояний на основе диагностических признаков, для которых неприменимы другие методы.

Серьезным недостатком метода Вальда [2, 7] является том, что наиболее информативные признаки исключаются из анализа. Потому что они встречаются только при одном из дифференцируемых диагнозов, а их частота при втором равна нулю. Если эта частота оказывается в знаменателе, дальнейший анализ данного признака становится невозможен, а если в числителе, то десятичный логарифм нуля оказывается равным минус бесконечность, после чего учет такого признака также прекращается.

Метод Зигерта–Котельникова [8] применяется, если неизвестны стоимости потерь и выигрышей при постановке диагноза и, если известно, что потери от ошибочных решений примерно одинаковы. Правило

---

постановки диагноза находится из условия минимума доли ошибочных решений. Метод имеет недостатки:

- для принятия решения необходимо знать априорные вероятности появления диагностических признаков;
- все ошибки считаются одинаково нежелательными, т.е. имеют одинаковый вес.

При использовании метода минимального риска [9] вероятность принятия ошибочного решения складывается из вероятностей ложной тревоги и пропуска дефекта. Вероятность принятия ошибочного решения определяется как минимизация точки экстремума среднего риска ошибочных решений при максимуме правдоподобия. Основным достоинством метода является то, что он позволяет оценить вероятность принятия ошибочного решения при максимуме правдоподобия. Недостатком метода следует считать условие, по которому распределение диагностируемого параметра должно быть одномодальным.

Метод максимального правдоподобия в математической статистике — это метод оценивания неизвестного параметра путём максимизации функции правдоподобия. Основан на предположении о том, что вся информация о статистической выборке содержится в функции правдоподобия. Метод максимального правдоподобия был проанализирован, рекомендован и значительно популяризирован Р. Фишером [10]. Основной недостаток метода состоит в том, что он часто требует сложных вычислений.

Моргенштерн и Нейман предложили метод минимакса. Метод принятия решений, используемый тогда, когда выбирать приходится из множества диагнозов, устроенных в виде дерева. Оценки конечных позиций всех возможных диагнозов — это единственная информация, которую можно использовать. Основным недостатком метода является то, что находимые в результате значения максимальных ошибок оценок диагностических

---

параметров системы или их максимальных дисперсий часто оказываются сильно завышенными, так как их определение базируется на допущении о практически невероятном сочетании различных погрешностей исходных данных.

Как показано в [11, 12], основная доля отказов газоперекачивающих агрегатов приходится на подшипниковые узлы, уплотнение, механическую часть. К отказам механической части могут привести разные факторы, например, увеличение уровня вибрации.

### Постановка задачи

Инциденты на технологическом объекте, ведущие к неисправностям механической части, являются наиболее дорогостоящими [11, 12, 13]. Анализ статистики отказов показал, что особое внимание следует уделять увеличению уровня вибрации механической части ГПА [14]. Причинами являются факторы различной природы, которые зачастую приводят к дорогостоящим ремонтным работам ГПА. Такие работы могут быть как целесообразными, так и практически бесполезными, однако в том и другом случае требуют существенных экономических затрат и могут привести к снижению эксплуатационной надежности ГПА и всего технологического комплекса в целом.

Контроль за работой ротора нагнетателя ГПА осуществляется посредством датчиков, определяющих вибросмещения ротора относительно опор в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Исправное состояние ГПА определено паспортными данными ГПА со средним значением вибросмещения ротора  $x_1=60$  мкм и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_1=20$  мкм. Неисправное состояние ГПА определено средним значением вибросмещения ротора  $x_2=120$  мкм и среднеквадратическим отклонением  $\sigma_2=30$  мкм.

На рис.1, рис.2 приведены статистические данные для исправных и неисправных ГПА. По оси абсцисс отложено вибросмещения ротора ГПА, измеряемое в микрометрах. По оси ординат отложено число событий, зарегистрированных в журнале АСУ ТП в процессе эксплуатации ГПА.

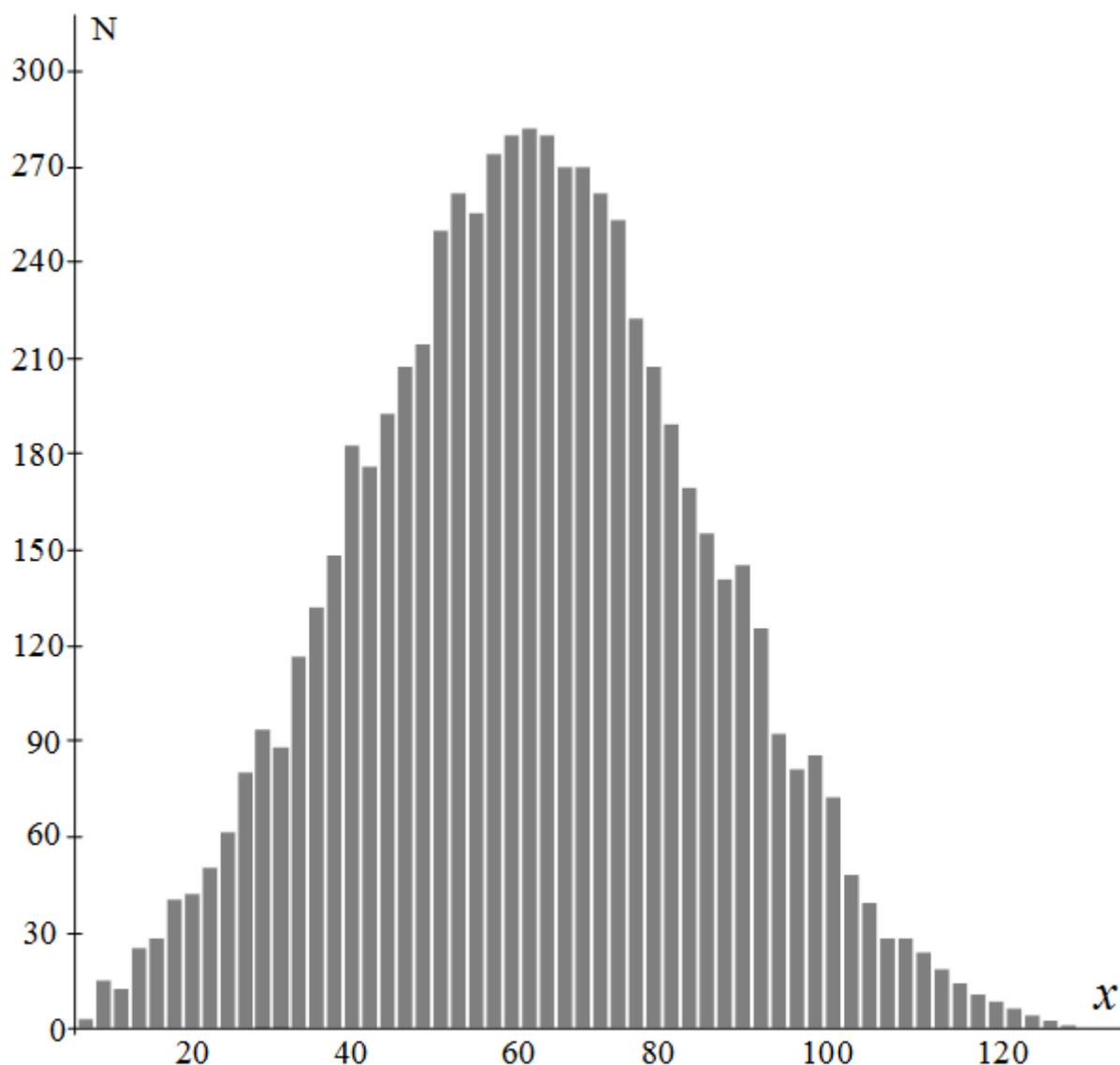


Рис. 1. – Гистограмма для ГПА, оставшихся в эксплуатации

Анализ статистики, приведенной на рис.1, рис.2, с привлечением специалиста–эксперта из числа эксплуатационного персонала показал, что неисправное состояние ГПА, определенное паспортными данными, требует уточнения. Это прежде всего связано с огромным количеством факторов, влияющих на работу ГПА, изменяющимися условиями эксплуатации и т.д.

---

Применяя статистические методы, требуется найти предельное значение вибросмещения ротора, выше которого следует выдать рекомендации эксплуатационному персоналу о необходимости вывода ГПА в ремонт.

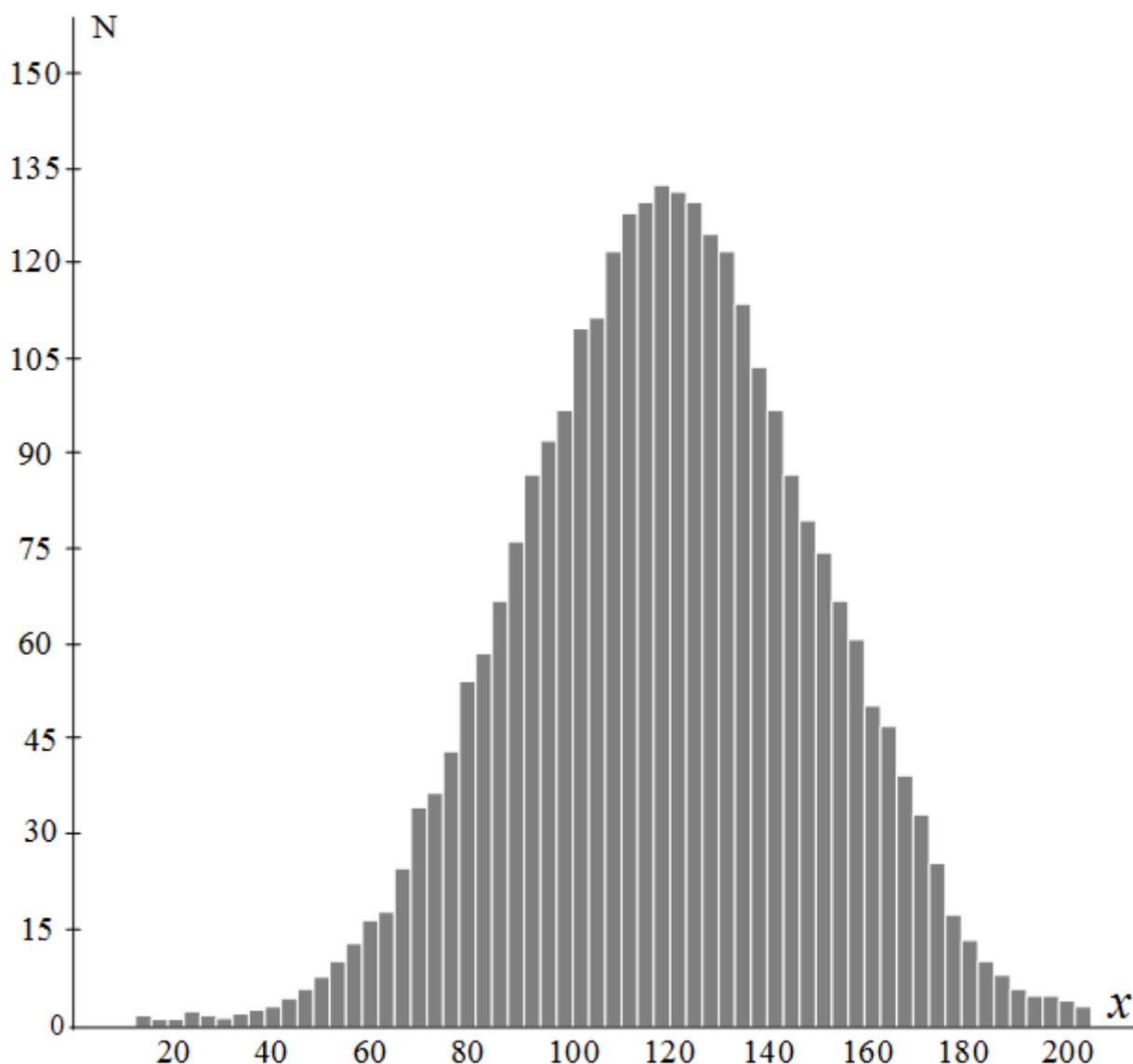


Рис. 2. – Гистограмма для ГПА, выведенных в ремонт по причине увеличения уровня вибросмещения ротора

Существует несколько способов проверки справедливости предположений о законе распределения величины (рис.1, рис.2 [15]). Рассмотрим наиболее распространенный способ, в котором в качестве критерия используется распределение  $\chi^2$ . При применении критерия

согласия Пирсона  $\chi^2$  среднеквадратичное отклонение закона распределения вероятностей от теоретического закона определится:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – эмпирическое распределение,  $np_i$  – теоретическое распределение.

Выберем нормальный закон теоретическим распределением. При расчетах по формуле (1) получили вероятности 0,975; 0,95 распределение величины вибро смещения ротора (рис.1, рис.2) соответственно подчиняются нормальному закону.

### **Применение статистических методов с целью прогнозирования состояния технологической установки**

Полученные входные данные в предыдущем пункте исследуем при помощи статистических данных. По методу минимального риска [16, 17, 18] отношение стоимости пропуска дефекта и ложного обнаружения дефекта  $C_{12}/C_{21}=20$ ,  $C_{11}=C_{22}=0$ . Где первый индекс–принятое состояние, второй индекс– действительное состояние,  $C_{21}$ –цена ложного обнаружения дефекта,  $C_{12}$ – цена пропуска дефекта,  $C_{11}$ ,  $C_{22}$  – цены правильных решений.

Из условия минимума среднего риска:

$$\frac{f\left(\frac{x_0}{D_1}\right)}{f\left(\frac{x_0}{D_2}\right)} = 20 \cdot \frac{0,1}{0,9} = 2,22 \quad (2)$$

где  $D_1$ –диагноз, который соответствует исправному состоянию (ГПА, оставшиеся в эксплуатации после увеличения уровня вибро смещения – рис.1);  $D_2$ –диагноз, который соответствует неисправному состоянию (ГПА, выведенные в ремонт по причине увеличения уровня вибро смещения ротора – рис.2).

Возможными ошибками при принятии решений являются: ложная тревога (ошибка первого рода), когда исправный объект признается

неисправным (дефектным) (вместо  $D_1$  считают, что имеет место  $D_2$ ), и пропуска дефекта (ошибка второго рода), когда объект, имеющий неисправность или дефект признается исправным (вместо  $D_2$  признается  $D_1$ ).

Плотности распределения для исправного  $D_1$  и неисправного  $D_2$  состояния ГПА подчиняются, как было показано выше, нормальному распределению:

$$f\left(x_0/D_1\right) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-60)^2}{800}} \quad (3)$$

$$f\left(x_0/D_2\right) = \frac{1}{3\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-120)^2}{1800}} \quad (4)$$

Подставим (3) и (4) в (2), получим:

$$\frac{\frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-60)^2}{800}}}{\frac{1}{3\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-120)^2}{1800}}} = 2,22 \quad (5)$$

Уравнение (5) имеет положительный корень  $x_0=79,956$  мкм. На рис. 3 приведены плотности распределения вибросмещения ротора для исправного состояния  $D_1$  и неисправного состояния  $D_2$  ГПА.

Из рис.3 следует, что при значении вибросмещения ротора ГПА более  $x_{01}=79,956$  мкм эксплуатационному персоналу следует принять решение о выводе в ремонт ГПА с целью проведения ремонтно–восстановительных работ. Для значений вибросмещения ротора ГПА меньших 79,956 мкм принимается решение об исправном состоянии ротора ГПА. Точный ответ о различиях или связях в отношении статистической выборки по результатам выборочного исследования рис.3 получить невозможно. Необходимо определить, достаточно ли велика разность между средними двух распределений для того, чтобы можно было объяснить ее действием независимой переменной, а не случайностью, связанной с малым объемом выборки.

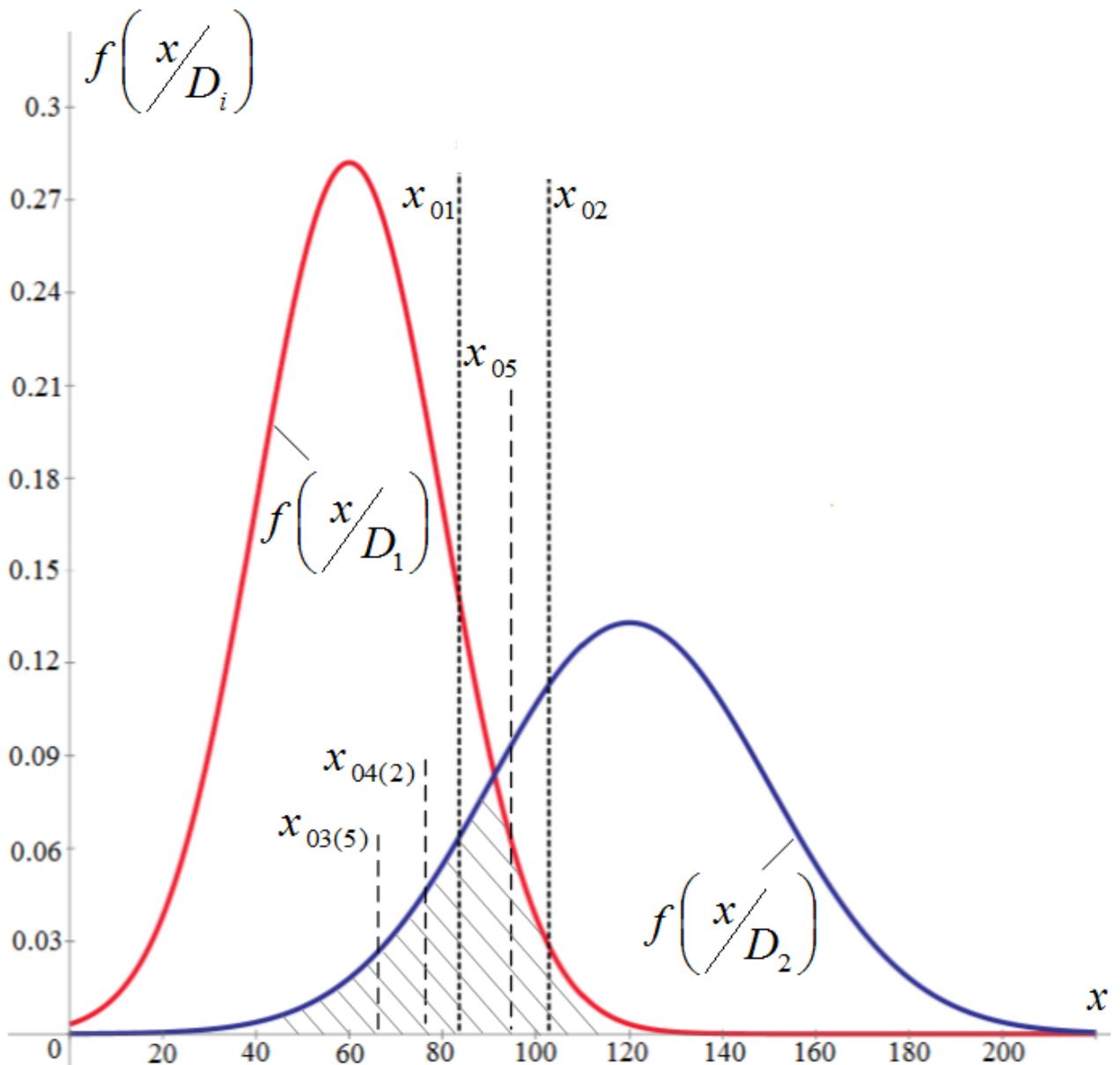


Рис. 3. – Плотности распределения для исправных  $D_1$  и неисправных  $D_2$  ГПА.

Поясним сказанное выше. Из рис. 3 видно, что области исправного  $D_1$  и неисправного  $D_2$  состояний ГПА пересекаются и поэтому принципиально невозможно выбрать значение вибросмещения ротора ГПА  $x_{01}$ , при котором не было бы ошибочных решений. Задача состоит в том, чтобы выбор  $x_{01}$  был в некотором смысле оптимальным, например, давал бы наименьшее число ошибочных решений. Поэтому в ситуации, приведенной на рис.3, целесообразнее использовать и другие методы статистического анализа, например, метод минимального числа ошибочных решений.

По методу минимального числа ошибочных решений [17] предельное значение вибросмещения ротора после преобразований:

$$\frac{\frac{1}{2\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-600)^2}{800}}}{\frac{1}{3\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-120)^2}{1800}}} = \frac{1}{9} \quad (6)$$

Решив уравнение, получим положительный корень  $x_{02}=106,508$  отметим значение на рис.3.

По методу минимакса граничное значение для вибросмещения ротора определится:

$$C_{21} \cdot \left(1 - F\left(\frac{x_{03}}{D_1}\right)\right) - C_{12} \cdot F\left(\frac{x_{03}}{D_2}\right) = 0 \quad (7)$$

Для значений, распределенных по нормальному закону, функции распределения выражаются с помощью функций Лапласа [17]:

$$F\left(\frac{x_{03}}{D_1}\right) = 0,5 + \Phi\left(\frac{x_{03} - \bar{x}_1}{\sigma_1}\right) \quad (8)$$

$$F\left(\frac{x_{03}}{D_2}\right) = 0,5 + \Phi\left(\frac{x_{03} - \bar{x}_2}{\sigma_2}\right) \quad (9)$$

где  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  – средние значения вибросмещения ротора ГПА состояний  $D_1$  и  $D_2$  соответственно.  $\Phi(x)$  определится по формуле:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (10)$$

где  $x$  – вибросмещение ротора ГПА.

Из уравнения (8), (9), (10) получим:

$$x_{03(n)} = x_{03(n-1)} - \frac{\varphi(x_{03(n-1)})}{\frac{d\varphi}{dx_{03}}(x_{03(n-1)})} \quad (11)$$

Решив (11), получим для первого приближения:  $x_{03(1)}=90$ . Далее определим второе приближение:

$$x_{03(2)} = x_{03(1)} - \frac{\varphi(x_{03(1)})}{\frac{d\varphi}{dx_0}(x_{03(1)})} \quad (12)$$

$$\varphi(x_{03(1)}) = C_{21} \cdot \left[ 1 - F\left(\frac{x_{03(1)}}{D_1}\right) \right] - C_{12} \cdot F\left(\frac{x_{03(1)}}{D_2}\right) \quad (13)$$

$$\varphi'(x_{03(1)}) = -C_{21} \cdot F\left(\frac{x_{03(1)}}{D_1}\right) - C_{12} \cdot F\left(\frac{x_{03(1)}}{D_2}\right) \quad (14)$$

Значения  $C_{21}=1$ ,  $C_{12}=20$ . В результате получим  $x_{03(2)}=71,482$ . Последующие приближения дают  $x_{03(3)}=62,592$ ;  $x_{03(4)}=60,77$ ;  $x_{03(5)}=60,706$ . Значения наиболее неблагоприятных вероятностей состояния для  $x_{03(5)}=60,706$ , отметим значение на рис.3:  $P_1^* = 0,654$ ;  $P_2^* = 0,346$ .

По методу Неймана – Пирсона [15, 17] минимизируется вероятность пропуска дефекта при заданном допустимом уровне вероятности ложной тревоги. Таким образом, вероятность ложной тревоги:

$$P_1 \cdot \int_{x_0}^{\infty} f\left(\frac{x}{D_1}\right) dx \leq A \quad (15)$$

где  $A$  – заданный допустимый уровень вероятности ложной тревоги;  $P_1$  – вероятность исправного состояния.

В результате того, что увеличиваются ошибки ложной тревоги, величина ошибки пропуска дефекта уменьшается, ее наименьшее значение будет соответствовать знаку равенства (15). Получим:  $x_{04(1)}=90$ ;  $x_{04(2)}=83,158$ ;  $x_{04(3)}=84,528$ ;  $x_{04(4)}=84,591$ ;  $x_{04(5)}=84,398$ . Отметим значение на рис.3.

По методу наибольшего правдоподобия получим  $x_{05}=87,9$ , отметим значение на рис.3. Результаты расчетов приведены в таблице № 1. Из сопоставления данных таблицы №1 и рис.3 видно, что метод минимального числа ошибок неприменим, потому что цены ошибок существенно различны. Граничное значение по этому методу приводит к значительной вероятности пропуска дефекта.

Таблица № 1

## Результаты расчета статистическими методами

№ п/п	Метод	Граничное значение	Вероятность ложной тревоги	Вероятность пропуска дефекта	Средний риск
1	Метод минимального риска	79,956	0,091	0,009	0,325
2	Метод минимального числа ошибок	106,508	0,067	0,033	0,662
3	Метод минимакса	60,706	0,437	0,002	0,485
4	Метод Неймана–Пирсона	83,158	0,111	0,011	0,331
5	Метод наибольшего правдоподобия	87,9	0,073	0,014	0,358

Метод минимакса предназначен для ситуации, когда отсутствуют предварительные статистические сведения о вероятности диагнозов  $D_1$  и  $D_2$ . Рассматриваются наименее благоприятные значения вероятностей первого и второго диагнозов, приводящих к наибольшему значению риска. В данной задаче он требует вывода из эксплуатации ГПА в 44% случаев увеличения вибросмещения ротора ГПА, так как исходит из наименее благоприятного случая – вероятность неисправного состояния  $P_2 = 0,346$ . Применение метода оправдано, если отсутствуют даже косвенные оценки вероятности неисправного состояния. Удовлетворительные результаты получаются по методу минимального риска. В результате применения статистических методов появляется возможность более ранней диагностики механической части ГПА, т.е. при 79,956 мкм., а не при 100 мкм как указывалось в

паспортных данных к ГПА, что позволит, возможно, избежать более дорогостоящего ремонта механической части ГПА.

### *Заключение*

Выполнен аналитический обзор существующих методов статистического исследования. Приведены выводы о достоинствах, недостатках, а также применимости методов. Выбраны методы статистического исследования, применимые для задач технической диагностики нефтегазохимического комплекса.

Первым шагом исследования является сбор данных с обязательным выполнением следующих пунктов:

- определить цель сбора данных;
- определить переменные, которые представляют особый интерес для исследователя;
- выбрать методы научного исследования.

Следующим шагом является представление данных, которые можно изобразить в графическом и численном виде. Гистограмма подходит для графического отображения данных, она показывает, насколько часто встречаются те или иные значения. Далее к данным может быть применена описательная статистика (медиана, стандартное отклонение, стандартная ошибка, доверительный интервал и т.д.)

Для того чтобы знать, какой метод статистического исследования применим, необходимо определить закон распределения исследуемой величины. Последним шагом является применение статистических методов, получение и анализ результатов, составление отчета статистического исследования.

В данной статье показано применение методов статистического анализа, которые успешно могут применяться для задач технической диагностики сложного нефтегазодобывающего комплекса. Статистический

---

анализ является одной из важнейших частей комплексного диагностического обследования, при помощи него можно пополнить базу знаний о технологическом комплексе, сделать выводы, а также получить рекомендации по реконструкции технологического объекта. Наиболее значимые и всеобъемлющие выводы могут делаться на основе тщательно спланированного статистического анализа, в котором могут применяться сложные алгоритмы и процедуры. Выполнение статистического исследования представляется трудной задачей, требующей кооперации специалистов разных областей деятельности.

### Литература

1. Кравченко Д.А., Финаев В.И. Проблемы диагностики сложных нефтегазохимических комплексов // Инженерный вестник Дона, 2018, №4 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5298](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5298).
2. R. Lyman Ott, An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis Fifth Edition, Duxbury is an imprint of the Wadsworth Group, a division of Thomson Learning, Inc. 2001. – p. 1213.
3. Luo, J.; Namburu, M.; Pattipati, K.; Qiauiio, L., Model-based Prognostic techniques. AUTOTESTCON 2003. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Proceedings. September 2003, – pp. 330–340.
4. Brandt S. Data Analysis: Statistical and Computational Methods for Scientists and Engineers Springer, 4th ed., 2014. — 523 p.
5. Kaplan D. Bayesian statistical methods. In: Little TD, Depaoli S, editors. Oxford handbook of quantitative methods. Oxford, UK: Oxford University Press; 2013. pp. 407–437.
6. Арсеньев Д.Г., Берковский Н.А. Рекуррентное вычисление нижних границ Рао – Крамера в байесовских задачах с нелинейными измерениями при постоянном векторе состояния. Научно-технические ведомости Санкт-



Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2012. № 4 (158). с. 57–64.

7. Гродзенский С.Я., Гродзенский Я.С., Сергиенко Н.С., Чесалин А.Н. Последовательный критерий Вальда: история и перспективы. Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2013. т. 1. с. 193–194.

8. H. D. Luke, The Origins of the Sampling Theorem, IEEE Commun. Mag., vol. 37, no. 4, 1999, pp. 106–108.

9. Барсуков С.В., Пахомов С.В., Логинова Н.С. Модель технического обслуживания объекта системы железнодорожного транспорта «По техническому состоянию» на основании диагностирования методом минимального риска. Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2017. Т. 2. с. 609–612.

10. L. Le Cam Maximum Likelihood: An Introduction International Statistical Review / Revue Internationale de Statistique Vol. 58, No. 2 (Aug., 1990), pp. 153–171.

11. Свердлов А. Б. Повышение надежности газоперекачивающих агрегатов путем применения технологии эпиламирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб., 2014. – № 3 (202). — (Энергетика). с. 62–69.

12. J. Obuchowski, A. Wylomanska, R. Zimroz: Selection of informative frequency band in local damage detection in rotating machinery, Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, pp. 138–152.

13. V. I. Pronyakin Problems of Formation of Diagnostic Features in the Diagnosis of Aircraft Engines MATEC Web of Conferences. 2017 – p. 5.

14. Zoltowski B, Zoltowski M. Selection measure of energy propagation in vibration diagnostic and modal analysis methods. Diagnostyka. 2018, 19(4), pp. 19–26.

---



15. Cochran, W. Some methods for strengthening the common 2 test. *Biometrics* 10, 2015 pp. 417–451.

16. T. V. Yakovleva, N. S. Kulberg, Mathematical statistics methods as a tool of two parametric magnetic-resonance image analysis, *Inform. Primen.*, 2014, Volume 8, Issue 3, pp 79–89.

17. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для бакалавров / В.Е. Гмурман. - М.: Юрайт, 2013 с.479.

18. Коберси И.С., Кияшко А.В., Македонов Е.А., Крамаренко Е.Р., Финаев В.И. Система управления напряжением генератора на базе нечёткой логики // *Инженерный вестник Дона*, 2015, №2 (часть 2) URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3076](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3076).

### References

1. Kravchenko D.A., Finaev V.I. *Inženernyj vestnik Dona (Rus)*, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5298](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5298).

2. R. Lyman Ott, *Duxbury is an imprint of the Wadsworth Group, a division of Thomson Learning, Inc.* 2001. p. 1213.

3. Luo, J.; Namburu, M.; Pattipati, K.; Qiauiuo, L., *AUTOTESTCON 2003. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Proceedings. September 2003*, pp. 330-340.

4. Brandt S. *Springer*, 4th ed., 2014. p. 523.

5. Kaplan D. *Oxford, UK: Oxford University Press*; 2013. pp. 407-437.

6. Arsen'ev D.G., Berkovskij N.A. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta. Fiziko matematicheskie nauki*. 2012. № 4 (158). pp. 57-64.

7. Grodzenskij S.YA., Grodzenskij YA.S., Sergienko N.S., Chesalin A.N. *Innovacii na osnove informacionnyh i kommunikacionnyh tekhnologij* 2013. V. 1. pp. 193-194.

---



8. H. D. Luke, IEEE Commun. Mag., vol. 37, no. 4, 1999, pp. 106-108.
9. Barsukov S.V., Pahomov S.V., Loginova N.S. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona. 2017. V. 2. pp. 609-612.
10. L. Le Cam. Revue Internationale de Statistique Vol. 58, № 2, 1990, pp. 153-171.
11. Sverdlov A. B. Nauchno tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. SPb, 2014. № 3 (202). (Энергетика). pp. 62-69.
12. J. Obuchowski, A. Wylomanska, R. Zimroz: Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, pp. 138-152.
13. V. I. Pronyakin MATEC Web of Conferences. 2017 p. 5.
14. Zoltowski B, Zoltowski M. Diagnostyka. 2018; 19(4), pp. 19-26.
15. Cochran, W. Biometrics 10, 2015 pp. 417-451.
16. T. V. Yakovleva, N. S. Kulberg, Inform. Primen., 2014, Volume 8, Issue 3, pp. 79.89.
17. Gmurman, V.E. [Probability theory and mathematical statistics: a textbook for bachelors]. M.: YUrajt, 2013 p.479.
18. Kobersi I.S., Kiyashko A.V., Makedonov E.A., Kramarenko E.R., Finaev V.I. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2 (part 2). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3076](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3076)