

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 629.03.01

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-58-69>

### Оценка безопасности производственных объектов по предельным значениям безотказности машин


**В.В. Дерюшев**<sup>ID</sup>, **С.В. Теплякова**<sup>ID</sup> ✉, **М.М. Зайцева**<sup>ID</sup>

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ [svet-tpl@yandex.ru](mailto:svet-tpl@yandex.ru)

#### Аннотация

**Введение.** На этапе проектирования технических устройств и выполнения соответствующих прочностных расчетов металлоконструкций принимаются достаточно большие запасы прочности, теоретически исключающие какие-либо отказы деталей. В действительности машины работают с частыми отказами. Интерес вызывают недиагностируемые отказы, приводящие к критическому снижению безопасности, особенно на опасных производственных объектах. Предполагается, что ранее применяемые подходы выборочного определения предельного (минимального) значения безотказности, основывающиеся на точечных оценках параметров распределения двухпараметрического закона Вейбулла, приводят к завышению расчетных показателей вероятности безотказной работы, т.е. занижению риска. Поэтому целью работы явилось рассмотрение подхода к оцениванию риска эксплуатации производственных объектов в ситуации случайного возникновения опасных и недиагностируемых отказов в системах.

**Материалы и методы.** В работе применялись методы оценивания безопасности технических устройств, основанные на теории вероятностей, а вероятность отказа машины определялась на основе известного метода теории надёжности. Данный метод заключается в расчете и построении функций распределения случайных величин (несущей способности и нагруженности), оказывающих влияние на возникновение отказа. Определен уровень повышения показателя надежности, приводящий к частым непрогнозируемым отказам технических устройств (машин) и снижению безопасности их эксплуатации.

**Результаты.** Выявлены и обоснованы признаки противоречивости прочностных расчетов, основанные на завышенных запасах прочности, в теории исключающие отказы деталей и машин в целом. Разработан и реализован новый подход к оцениванию риска эксплуатации производственных объектов в ситуации случайного возникновения опасных и недиагностируемых отказов системами безопасности. Разработан алгоритм определения трех параметров закона Вейбулла для совокупности по выборочным данным. Построены плотности распределения ресурса стрелы одноковшового экскаватора ЕК-14. Даны рекомендации по увеличению значения вероятности безотказной работы до 0,9989.

**Обсуждение и заключения.** Результаты проведенных исследований позволяют обосновать новый подход к оцениванию риска эксплуатации производственных объектов в случае возникновения опасных и недиагностируемых системами безопасности отказов базовых деталей, приводящих к негативным последствиям.

**Ключевые слова:** промышленная безопасность, надежность, безотказность, ремонтпригодность, долговечность, сохраняемость, отказ, машина, ресурс.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

**Для цитирования.** Дерюшев В.В., Теплякова С.В., Зайцева М.М. Оценка безопасности производственных объектов по предельным значениям безотказности машин. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(2):58–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-58-69>

## Production Facilities Safety Assessment According to the Maximum Values of Machines Reliability

Viktor V Deryushev , Svetlana V Teplyakova  ✉, Marina M Zaitseva 

Don State Technical University, 1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, Russian Federation

### Abstract

**Introduction.** At the stage of designing technical devices and performing appropriate strength calculations of metal structures, sufficiently large reserves of strength are taken, which, theoretically, exclude any failures of parts. In fact, the machines work with frequent failures. Of interest are undiagnosed failures that lead to a critical decrease in safety, especially at hazardous production facilities. It is assumed that the previously applied approaches of selective determination of the maximum (minimum) reliability value, based on point estimates of the distribution parameters of the two-parameter Weibull law, lead to an overestimation of the calculated indicators of the probability of failure-free operation, i.e. underestimation of risk. Therefore, the work objective is to consider an approach to assessing the risk of operating production facilities in a situation of accidental occurrence of dangerous and undiagnosed failures in systems.

**Materials and Methods.** Methods for technical devices safety assessment based on probability theory were used in the work, and the probability of machine failure was determined based on the well-known method of reliability theory. This method consists in calculating and constructing distribution functions of random variables (load-bearing capacity and loading) that influence the occurrence of failure. The level of increase in the reliability index was determined, leading to frequent unpredictable failures of technical devices (machines) and a decrease in the safety of their operation.

**Results.** The signs of inconsistency of strength calculations based on overestimated safety margins, which in theory exclude failures of parts and machines in general, are identified and substantiated. A new approach to risk assessment of operating production facilities in a situation of accidental occurrence of dangerous and undiagnosed failures by safety systems has been developed and implemented. An algorithm for determining the three parameters of Weibull's law for a population based on sample data has been developed. The resource distribution densities of the boom of the single-bucket excavator EK-14 are constructed. The recommendations are given to increase the probability of failure-free operation to 0.9989.

**Discussion and Conclusion.** The results of the conducted research allow us to substantiate a new approach to risk assessment of operating production facilities in the event of dangerous and undiagnosed failures of basic parts by safety systems, leading to negative consequences.

**Keywords:** industrial safety, safety, reliability, maintainability, durability, persistence, failure, machine, resource.

**Acknowledgements.** The authors express their gratitude to the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the comments, which made it possible to improve its quality.

**For citation.** Deryushev VV, Teplyakova SV, Zaitseva MM. Production Facilities Safety Assessment According to the Maximum Values of Machines Reliability. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;7(2):58–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-58-69>

**Введение.** Ключевыми факторами, определяющими безопасность опасных производственных объектов, являются так называемый «человеческий фактор», наличие систем безопасности и надежность используемых на объекте машин и механизмов. Как известно [1–4], надежность является комплексным свойством, включающим безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость. В данной статье рассматривается влияние безотказности машины, как одного из основных параметров надежности, на безопасность ее эксплуатации. При этом для анализа показателей безотказности используются традиционные методы теории надежности и некоторые новые подходы к определению параметров распределений случайных величин, позволяющие оценить предельные значения безотказности [1]. Следует отметить, что применяемые здесь методы оценивания безопасности строятся на основных понятиях теории вероятностей, основным из которых является понятие случайной величины<sup>1</sup>. Поэтому в данной работе рассматриваются только случайные отказы, приводящие к снижению безопасности. В то же время следует отметить, что не все отказы машин являются случайными. Например, отказы, связанные с систематическими ошибками измерительных приборов и «человеческим

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53195.3-2015. *Безопасность функциональная связанных с безопасностью зданий и сооружений систем. Часть 3. требования к системам*. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200124221> (дата обращения: 23.01.2023).

фактором», случайными не являются<sup>2</sup>. В таком случае нельзя применять для их анализа предлагаемые подходы без строгого математического обоснования<sup>3</sup>.

Выделяется четыре типа случайных отказов, возникающих в процессе эксплуатации машин и механизмов, применяемых на опасных производственных объектах (таблица 1).

Исследование диагностируемых отказов в рамках описываемой работы не представляет интереса, так как в данном случае приборы (устройства, датчики, сенсоры) системы безопасности промышленного объекта выполняют свои функции в полном объёме и катастрофическое снижение безопасности исключается. В случае же возникновения опасных и недиагностируемых отказов может возникнуть ситуация, когда система безопасности будет уязвима. При этом в соответствии с ГОСТ ISO 12100–2013 под безопасностью понимается способность машины выполнять свою(и) функцию(и) в течение всего срока службы при адекватном (достаточном) снижении рисков.

Таблица 1

Типы случайных отказов машин и механизмов

Тип отказа	Описание отказа	Пример отказа
Опасный	Оказывает значительное влияние на безопасность вплоть до возникновения катастрофы с вероятным травмированием персонала	Разрушение несущих конструкций техники (оборудования) вследствие возникновения усталостных разрушений
Безопасный	Влияния на безопасность эксплуатации не оказывает. Вследствие возникновения могут снижаться параметры экономики, эстетики, эргономики и другие	Проявление коррозионных явлений, возникновение дефектов лакокрасочного покрытия
Диагностируемый	Приборы (устройства, датчики, сенсоры) системы безопасности диагностируют отказы этого типа	Возникновение нарушения работоспособности гидравлической системы машины (оборудования). Нарушение предельных значений грузоподъемности
Недиагностируемый	Приборы (устройства, датчики, сенсоры) системы безопасности не диагностируют отказы этого типа	Проявление скрытых дефектов при расширении, например, усталостных трещин

Из определения следует, что ключевым понятием безопасности здесь является риск, который определяется как возможность осуществления неблагоприятного события, то есть сочетание степени негативного последствия с возможностью его возникновения.

**Материалы и методы.** Обычно негативным последствием является нанесение травм или другого вреда здоровью при эксплуатации машины. В то же время последствием случайного опасного отказа машины может быть экономический ущерб. В этом случае риск оценивает так называемую функциональную безопасность производственного объекта [3–5]. Следовательно, к исследованию безопасности производственного объекта, в котором происходит случайный опасный и недиагностируемый отказ машины, следует применять методы теории надежности как часть теории вероятностей. Именно риск является связующим звеном надежности машин и безопасности опасных производственных объектов, в том числе их функциональной безопасности.

Повышение вероятности наступления неблагоприятного события вследствие возникновения опасного и недиагностируемого отказа приводит к необходимости прогнозирования и оценивания риска негативных последствий, тяжесть которых является трудноопределимой величиной. В работе тяжесть вероятных негативных последствий, возникающих при опасном и недиагностируемом отказе, принимается одинаковой, а оценивание риска сводится к оцениванию вероятности наступления неблагоприятного события.

Вероятность отказа машины определена известными методами теории надёжности [6], заключающимися в построении функций распределения случайных величин, оказывающих влияние на возникновение отказа. При

<sup>2</sup>ГОСТ Р 51901.14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200065647> (дата обращения: 23.01.2023).

<sup>3</sup>ГОСТ Р 50779.27-2017 Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146523> (дата обращения: 23.01.2023).

рассмотрении силовых элементов конструкции строились функции распределения характеристик несущей способности и нагруженности.

Для построения функции распределения генеральной совокупности случайной величины обычно формируется репрезентативная выборка значений, полученная на основании испытаний. Однако в реальных условиях провести испытания является часто затруднительным из-за финансовых, технологических и временных ограничений. Для экономии затрат в ряде исследований [6–10] применяется подход корректировки параметров выборочных распределений. В работе используется данный подход для определения предельного (минимального) значения безотказности, что позволяет обеспечить максимальную безопасность рассматриваемого объекта путём повышения минимальной расчётной безотказности и минимизации риска возникновения неблагоприятного события. Требуемая безотказность достигается при корректировке параметров распределения случайных величин, влияющих на вероятность наступления опасного и недиагностируемого отказа.

С точки зрения надежности машина является идеально безотказной, если в пределах заданного ресурса отказа не возникает. В этом случае детали данной машины откажут приблизительно в одно время, отработав заданное значение ресурса  $T_p$  [10, 11].

Практика определения надежности отечественных машин показывает, что средняя наработка на отказ составляет  $T=20\text{--}200$  ч, поэтому за ресурс до капитального ремонта  $T_p=8\ 000\text{--}10\ 000$  ч происходит от 40 до 500 отказов, то есть десятки и сотни [12–15]. Многие из них являются опасными и недиагностируемыми. В этом случае фактический ресурс  $T_{pф}$  значительно меньше заданного  $T_p$ , а вероятность отказа стремится к единице. В то же время, для обеспечения требуемого уровня безопасности необходимо уменьшить риски возникновения неблагоприятных событий, т.е. вероятности отказов.

Рассматривать вариант повышения безопасности машины за счет уменьшения вероятности наступления отказа одной детали нецелесообразно, так как одновременно в машине эксплуатируются сотни и тысячи деталей, поэтому риск наступления неблагоприятных событий растёт.

При составлении структурной схемы надежности среди всех деталей машин выделим группу деталей, которую будем называть базовой. В эту группу входят детали, отказы одной из которых приводит к опасному и недиагностируемому отказу машины. В этом случае необходимо использовать последовательность структурной схемы надежности машины. Тогда риск отказа определится по известной формуле [15]:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - Q_i), \quad (1)$$

где  $Q$  — риск (вероятность) отказа машины;  $Q_i$  — вероятность отказа  $i$ -ой детали,  $m$  — объем группы деталей.

Например, если вероятность наступления отказа одной детали в базовой группе одинаковая и равна  $Q_i = 0,05$ , что является вполне приемлемым условием безотказности детали в эксплуатации, а объем всех деталей в базовой группе машины  $m = 200$ , то вероятность опасного и недиагностируемого отказа машины составит:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^{200} (1 - 0,05) = 0,997.$$

Такой показатель риска является неприемлемым. То есть можно предположить, что для снижения риска необходимо увеличивать ресурс каждой детали, в этом случае риск будет снижаться. Например, если увеличить ресурс каждой детали на порядок, а именно, если вероятность отказа равна  $Q_i = 0,005$ , то вероятность отказа машины останется значительно высокой:

$$Q = 1 - \prod_{i=1}^{200} (1 - 0,005) = 0,63.$$

Разработка рекомендаций для увеличения ресурса второй группы деталей (все остальные детали и узлы, не вошедшие в первую группу), к которой относятся расходные материалы и запасные части, приводит только к минимизации суммарных затрат на устранение отказов, никак не влияя на безопасность эксплуатации.

Повышение надежности путем уменьшения рассеивания отказов деталей из базовой группы сокращает риски, связанные с опасными и недиагностируемыми отказами. В результате средняя наработка на отказ возрастет, а отказы будут возникать реже. Количество отказов снизится, но полностью их исключить не удастся, риск неблагоприятных событий будет сохраняться. Фактический ресурс, хотя и приблизится к заданному, определяющему допустимый риск, но будет ниже.

Тогда увеличение ресурса деталей из базовой группы в заданных пределах не позволяет достигнуть высокого уровня безотказности и для решения этой задачи необходим другой методический подход. Предлагаемый новый подход должен предусматривать появление расчётных отказов деталей из базовой группы только за пределами

заданного ресурса машины. В дальнейшем речь пойдет только о деталях из базовой группы, которые будем называть ответственными деталями.

### Новый подход к оцениванию безотказности

Изучение надежности машин показало, что ресурс деталей может рассеиваться в значительных пределах. Рассмотрим этот факт на примере одной детали из некоторой совокупности таких же деталей. Ее ресурс является величиной случайной, определяемой параметрами совокупности, истинные параметры которой являются неизвестными и оцениваются только по параметрам выборочного распределения. Относительный размах выборочного распределения может быть определен по формуле:

где  $Tr_{max}$  — максимальное значение ресурса в выборке;  $Tr_{min}$  — минимальное значение ресурса в выборке.

$$R = \frac{Tr_{max} - Tr_{min}}{Tr_{min}} \quad (2)$$

Здесь следует отметить, что для выборки, как и для совокупности, выполняется принципиальное условие:  $Tr_{min} > 0$ . Поэтому для описания статистических закономерностей рекомендуется применять вероятностный закон со сдвигом Вейбулла (для прочности и ресурса) и закон Фишера-Типпета (для действующих напряжений). Распределения, полученные при использовании данных законов, имеют ограничения слева и справа соответственно. Кроме того, по форме функции распределения можно анализировать изменение интенсивности отказов с течением времени.

Тогда относительный размах, оцениваемый по формуле (2), отражающий отклонение крайнего верхнего значения выборочного распределения относительно крайнего минимального значения, может составлять от нескольких единиц до сотен и более. Поэтому плотность распределения ресурса деталей для выборки и совокупности может по-разному располагаться относительно заданного ресурса машины, например, как показано на рис. 1.

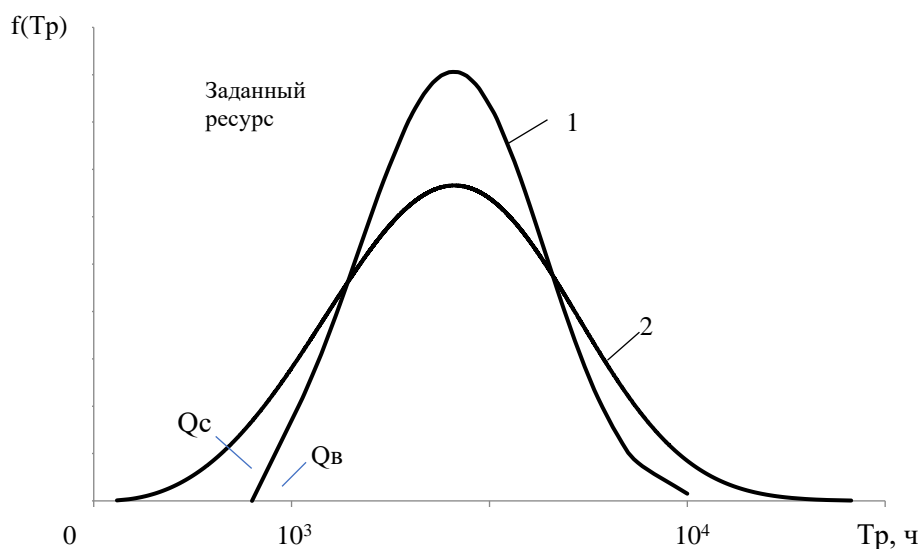


Рис. 1. Кривые плотностей распределения вероятности отказа для выборки (1) и совокупности (2) для трехпараметрического закона Вейбулла

Можно сделать вывод, что результат оценивания вероятности безотказной работы детали определяется степенью адекватности переноса результатов выборочных испытаний на совокупность. Очевидно, что распространение точечных оценок параметров распределения двухпараметрического закона Вейбулла, получаемых методом наименьших квадратов, может привести к завышению расчетных показателей вероятности безотказной работы, т.е. занижению риска. Основная причина этого заключается, как отмечается в [1], в оценке параметра сдвига только по результатам выборочных испытаний. При этом объем совокупности никак не учитывается. Однако можно предположить, что при увеличении объема рассматриваемой совокупности будет происходить уменьшение истинной величины минимального ресурса  $Tr_{min}^n$ , т.е. в совокупности всегда найдется деталь, ресурс которой меньше определенного значения в ходе выборочных испытаний:  $Tr_{min}^n < Tr_{min}$ .

Поэтому с целью повышения достоверности оценки безопасности деталей по выборке и приближении ее к истинному значению, определяемому по совокупности, необходимо скорректировать кривую плотности распределения для опасных и недиагностируемых отказов.

Для корректировки параметров распределения предлагается использовать следующую методику.

На первом этапе по результатам испытаний, в соответствии с рекомендациями [4], определяются параметры формы  $\beta_v$  и масштаба  $\eta_v$  для выборки объемом  $n$ . Минимальное значение ресурса в выборке принимается в качестве выборочного параметра сдвига  $T_{0v} = T_{p\min}$ .

На втором этапе определяется параметр сдвига для совокупности. В первую очередь параметр сдвига требует физического обоснования. Для рассматриваемой случайной величины — технического ресурса — таким физическим ограничением является нулевой ресурс. Поэтому здесь предлагается вероятностный подход. В соответствии с ним задается объем совокупности  $N$ , квантиль распределения Стьюдента  $d = t_p(N - 1)$ , у которого степень свободы  $(N - 1)$  и уровень доверительной вероятности  $p$ . Далее определяется параметр сдвига для совокупности по следующей формуле:

$$T_{0c} = T_{0v} \left(1 - e^{-\frac{d}{\beta_v \sqrt{N-n}}}\right). \quad (3)$$

Из формулы (3) следует, что при возрастании  $(N - n)$ , т.е. при возрастании объема совокупности, параметр сдвига уменьшается в пределе до нуля, что соответствует существующему физическому ограничению.

На третьем этапе происходит коррекция параметров формы  $\beta_c$  и масштаба  $\eta_c$  для совокупности в соответствии с формулами, предложенными в работе [5, 6]. Достоверность такой корректировки доказывается в работе [5].

Алгоритм построения трехпараметрического закона Вейбулла для совокупности по выборочным данным приведен на рис. 2 и представляет собой следующую схему расчета параметров.

1. По исходному выборочному ряду  $X$  оцениваются следующие числовые характеристики: среднее значение  $\bar{x}$ , стандартное отклонение  $\sigma_x$ , коэффициент вариации  $C_v$ , коэффициент асимметрии  $C_s$  и минимальное значение  $x_{\min}$ .

2. В зависимости от  $C_s$  определяется значение коэффициента вариации  $C_v$  для совокупности, используя аппроксимирующее выражение:

$$C_v = 0,0009 \times C_s^4 - 0,0105 \times C_s^3 + 0,0277 \times C_s^2 + 0,3234 \times C_s + 0,31,$$

3. Коэффициент вариации  $C_v$  определяет значение коэффициента формы распределения совокупности  $\beta_c$  по формуле:

$$\beta_c = 0,9889 \times C_v^{-1,093}.$$

Для подтверждения методики проведем численный эксперимент, суть которого заключается в проведении следующей последовательности действий:

- признание параметров заданной совокупности истинными;
- моделирование вариационного ряда совокупности требуемого объема;
- формирование из истинной совокупности выборочных распределений объемом  $n$  в количестве  $m$ ;
- определение самого невыгодного варианта с максимальным значением сдвига выборки;
- корректировка сдвига и расчет параметров формы и масштаба для скорректированной выборки;
- сравнение скорректированных параметров с истинными.

Очевидно, что в реальных условиях проведения наблюдений (испытаний) в период эксплуатации машины можно получить лишь начальный участок левой ветви. При этом партия машин должна быть представительной и составлять из не менее 30 машин с наработкой 8–10 тыс. часов. Получение же экспериментальных данных для статистической обработки и построение всей кривой распределения ресурса объекта за весь период эксплуатации является невозможной задачей.

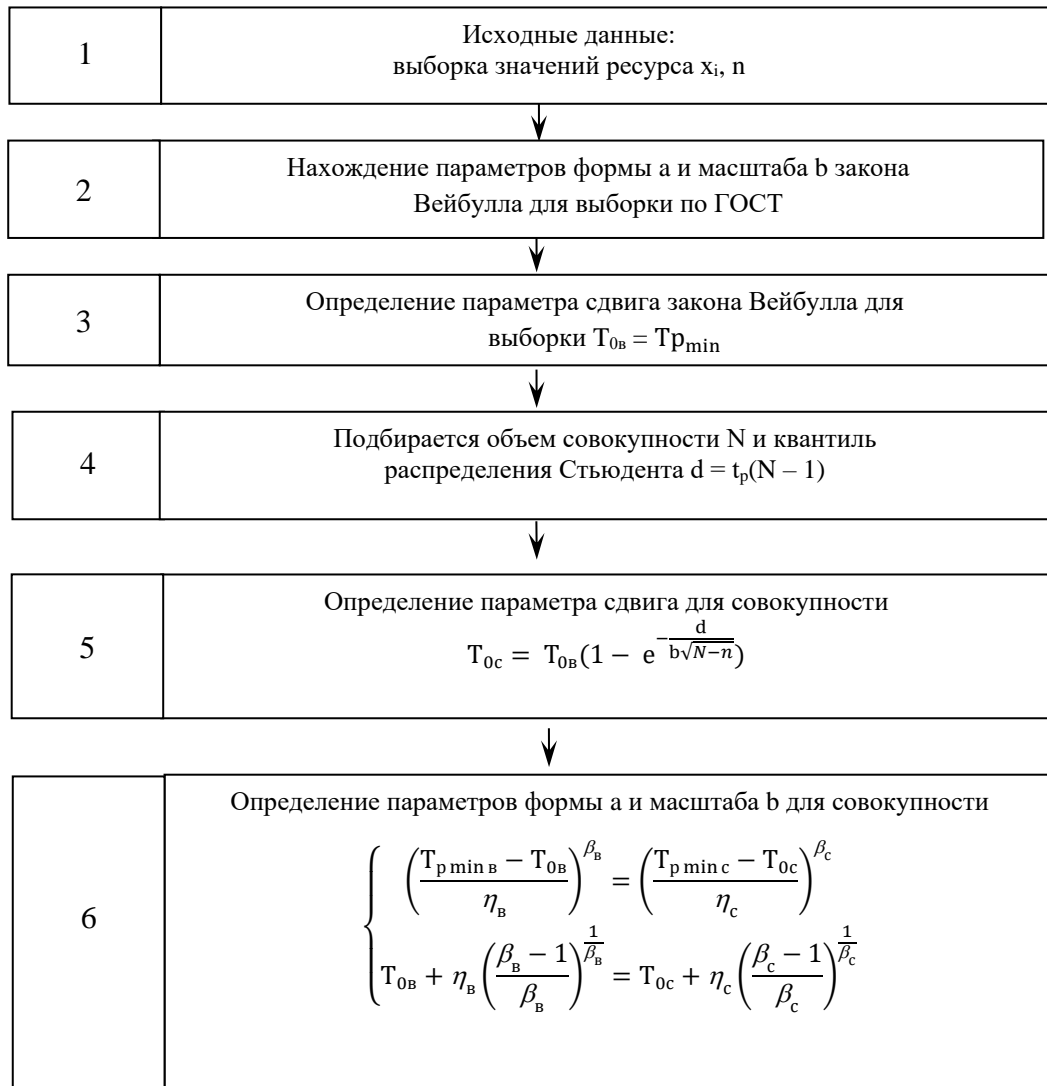


Рис. 2. Алгоритм определения трех параметров закона Вейбулла для совокупности по выборочным данным

Поэтому был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого для выборочных данных ресурса детали (деталей) объемом  $n=50$  определены параметры трехпараметрического распределения Вейбулла выборки.

**Результаты исследования.** По предложенному выше алгоритму и последовательности действий проведен численный эксперимент. Первоначально задали параметры истинной совокупности, смоделировали вариационный ряд совокупности объемом  $N=10^4$ , из него извлекли случайным образом выборки объемом  $n=50$  в количестве  $m=5$ ;  $n=100$  в количестве  $m=1$ ;  $n=150$  в количестве  $m=1$  и  $n=1000$  в количестве  $m=1$ . Далее выбрали наиболее худший вариант выборки, соответствующий максимальному отклонению значения сдвига от сдвига совокупности. Плотности распределения закона Вейбулла для исходной совокупности и выборок, полученных из нее, приведены на рис. 3.

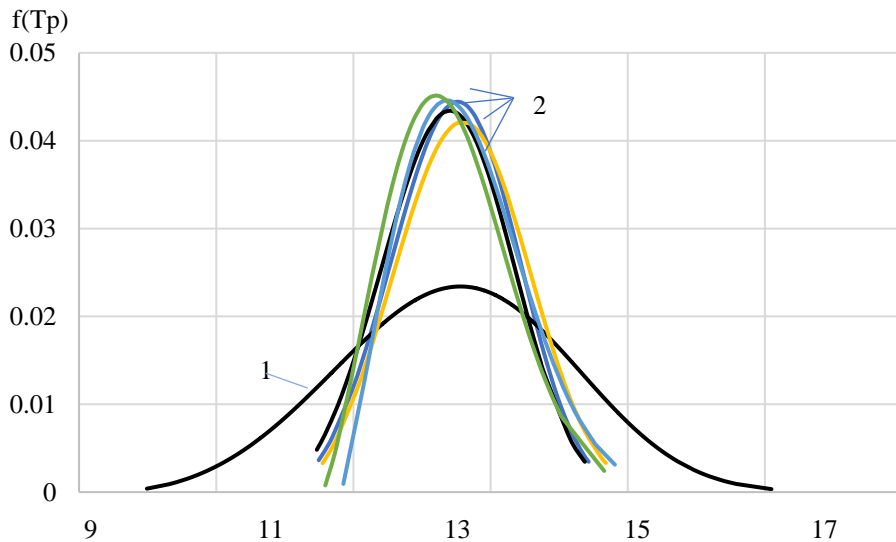


Рис. 3. Плотности распределения совокупности (1), моделированных из нее выборок объемом n=50 (2)

По результатам расчетов оцениваем параметры, сравнивая между собой значение сдвига истинной совокупности и выборок, взятых из нее (таблица 2).

Таблица 2

Параметры выборок и совокупности

Параметры	Совокупность	Выборки объемом n=50					
			1	2	3	4	5
a	155 900	Исходные	132 787	154 333	143 348	138 096	167 488
		Корректир.	135 008,7	159 917,03	151 330,36	143 957,4	166 778,2
b	1,07	Исходные	1,07	0,98	0,96	1,02	0,92
		Корректир.	1,19	1,20	0,95	1,13	0,94
x min	5 509	Исходные	7 344	6 007	6 813	5 962	7 491
		Корректир.	8 160,36	6 675,00	7 569,74	6 625,23	7 490,71
		Δ, %	10,004	10,007	9,997	10,011	0

Анализ показывает, что выборочные параметры сдвига существенно отличаются от сдвига совокупности. Вероятность попадания в реальное значение сдвига минимальная, а увеличение объема выборок не дает гарантии попадания в нее минимального значения совокупности. Поэтому, чтобы добиться снижения рисков наступления опасного отказа, необходима корректировка параметров.

Для определения уровня достоверности при корректировке параметра сдвига трехпараметрического распределения Вейбулла предлагается критерий параметрической достоверности:

$$D_{ВВР} = e^{-\left(1-\frac{n}{N}\right)\Delta} \quad (4)$$

где  $n$  и  $N$  — соответственно объемы выборок и генеральных совокупностей конечного объема;  $\Delta$  — отклонение параметров выборочных распределений от истинного значения параметров совокупности.

Расчеты показали, что критерий параметрической достоверности для выборки с максимальным значением сдвига составляет 0,67.

Для проведения корректировки берем самый невыгодный вариант, то есть с максимальным значением сдвига выборки относительно значения совокупности. Графическое представление плотностей распределения этих выборок приведено на рис. 4.



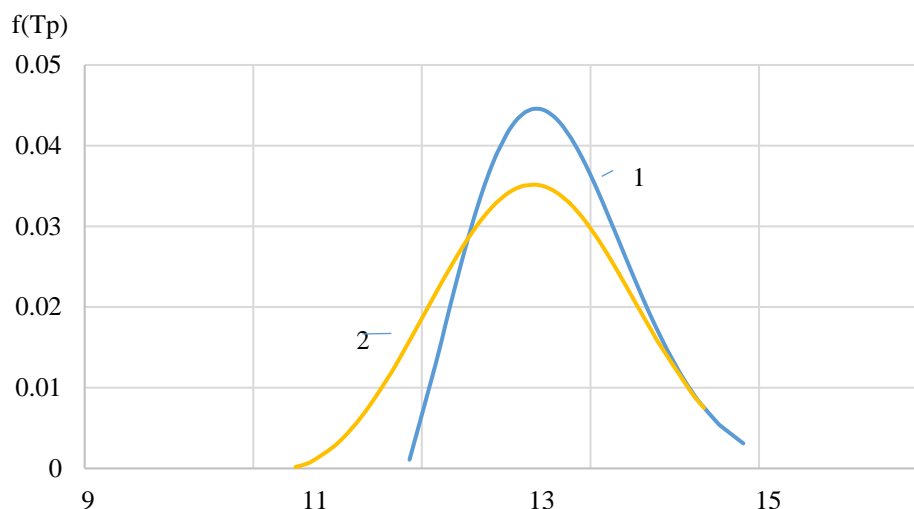


Рис. 4. Плотности распределения исходной (1) и скорректированной (2) выборок

#### Определение риска неконтролируемого опасного отказа детали стрелы одноковшового экскаватора ЕК-14

В качестве апробации предложенного метода определения параметров совокупности по выборочным данным рассмотрен пример для ответственной детали одноковшового экскаватора — боковой стенки стрелы с усталостным ресурсом до списания  $T_p=20$  тыс. ч. Заданный ресурс определяется заводом изготовителем как ресурс до списания. Для стрелы, как базового элемента экскаватора, заданный ресурс составляет 20 тысяч часов.

Стрела одноковшового экскаватора ЕК-14 имеет коробчатое сечение, выполненное из проката стали Ст3, с толщиной боковой стенки 10 мм. Опыт эксплуатации показал, что отказ стрелы заключается в появлении усталостной трещины в опасном сечении, а различного рода ремонтные мероприятия не решали проблему роста трещины. Единственным решением проблемы является ее замена. Поэтому для стрелы определены выборочные данные по ресурсу и осуществлен переход от выборочных данных к параметрам совокупности [14, 16, 17].

Численный и натурный эксперимент показывает, что достоверность определения параметра сдвига совокупности по данным выборочных испытаний не отвечает необходимым требованиям. Поэтому необходимо производить корректировку полученных данных по предлагаемой методике.

Далее по предложенной последовательности из совокупности получена и откорректирована выборка. Корректировка параметров выборочного распределения позволила приблизиться к параметру сдвига совокупности, но не достичь его. Причем параметр сдвига совокупности не достиг значение в 10 тысяч часов, что в два раза ниже заданного ресурса, и подтверждает наличие преждевременных отказов.

Поэтому для деталей из базовой группы предлагается сдвигать (увеличивать) значение ресурса с помощью изменения параметров конструкции. Например, увеличить предел выносливости стали, заменив сталь серийного выпуска детали на более прочную, и (или) уменьшить действующее напряжение путем увеличения толщины стенки или размеров сечения. В работах [14, 15] рассчитаны и сравнены значения ресурса для боковой стенки стрелы с вариантами рекомендаций по изготовлению детали. Рекомендации предусматривали: увеличение толщины стенки с 10 до 12, а затем до 14 мм прокатного листа в опасном сечении детали; замену используемой марки стали Ст3 (малоуглеродистой) на низколегированные 09Г2С или 15ХСНД; увеличение опасного сечения стрелы до 20 %.

Параметры нагруженности задаются детерминировано. Усталостная прочность детали ограничена снизу имеющимся контролем материала и готовой детали, а нагруженность — сверху расчетными режимами работы и наличием элементов безопасности (предохранительных клапанов, муфт предельного момента и т.п.). Поэтому при усталостном разрушении деталей для генеральной совокупности возможны случаи, когда параметры нагруженности превышают параметры усталостной прочности вследствие воздействия неконтролируемых случайных факторов. Следствием этого является необходимость ограничения снизу ресурса детали, определяемого по распределению генеральной совокупности, а не по выборке.

Расчеты показали значение вероятности безотказной работы 0,9989 для стрелы одноковшового экскаватора, изготовленной из стали 15ХСНД с толщиной прокатного листа 12 мм, а вероятность отказа соответственно — 0,0011.

**Обсуждение и заключения.** Для создания безопасных машин необходимо, чтобы обоснованный по предлагаемой методике минимальный ресурс базовых деталей стремился к значению заданного ресурса машины. Исключением из этого правила являются только некоторые детали с преждевременными отказами, причины

возникновения которых установить невозможно из-за отсутствия соответствующих методов и средств. Кроме того, допустимы плановые замены отдельных деталей с низким ресурсом (увеличение их ресурса невозможно или нецелесообразно). Отказы таких деталей не влияют на безопасность машины.

Таким образом, обоснован новый подход к оцениванию риска эксплуатации производственных объектов в случае возникновения опасных и недиагностируемых системами безопасности отказов базовых деталей, приводящих к негативным последствиям.

### Список литературы

1. Панфилов А.В., Дерюшев В.В., Короткий А.А. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;5:48–55. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55>
2. Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И. и др. *Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем*. Новосибирск: Наука; 2021. 795 с.
3. Deryushev V.V., Kosenko E.E., Kosenko V.V., et al. Technical decisions in uncertain environment at risk. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;2:56–61.
4. Котесов А.А. Методика определения параметров вероятностного распределения совокупности прочностных характеристик конструкционных сталей по выборочным данным. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2020;4:23–29. [https://doi.org/10.46973/0201-727X\\_2020\\_4\\_23](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2020_4_23)
5. Сикан А.В. Практические приемы оценки параметров распределения Вейбулла при выполнении гидрологических расчетов. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2011;19:37–45.
6. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем. *Вычислительные технологии*. 2009;14(6):58–70.
7. Doronin S.V., Reizmunt E.M., Rogalev A.N. Erratum to: Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018;47(4):387. <https://doi.org/10.3103/S1052618818040167>
8. Doronin S.V., Reizmunt E.M., Rogalev A.N. Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017;46(4):364–369. <https://doi.org/10.3103/S1052618817040069>
9. Kotesova A.A., Teplyakova S.V., Popov S.I., et al. Ensuring assigned fatigue gamma percentage of the components. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019;698(6):066029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/6/066029>
10. Лепихин А.М. Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования. *Вопросы материаловедения*. 2007;3:208–213.
11. Doronin S., Rogalev A. Numerical approach and expert estimations of multi-criteria optimization of precision constructions. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018;2098:323–337.
12. Махутов Н.А. *Безопасность и риски: системные исследования и разработки*. Новосибирск: Наука; 2017. 724 с.
13. Биргер И.А. *Техническая диагностика*, 2-е изд. Москва: URSS: ЛЕНАНД; 2018. 238 с.
14. Клюев В.В., Лозовский В.Н., Савилов В.П. *Диагностика деталей машин и механизмов*: в 2 ч. Ч. 1. В.В. Клюев (ред.). Москва: Спектр; 2017. 176 с.
15. Клюев В.В. (ред.). *Неразрушающий контроль*: справочник в 8 т. Т. 1 в 2 кн. Кн. 1: Соснин Ф.Р. *Визуальный и измерительный контроль*. Кн. 2: Соснин Ф.Р. *Радиационный контроль*. 2-е изд., испр. Москва: Машиностроение; 2008. 560 с.
16. Махутов Н.А., Албагачиев А.Ю., Алексеева С.И. и др. *Прочность, ресурс, живучесть и безопасность машин*. Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»; 2008. 574 с.
17. Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Doronin S.V., et al. Probabilistic modeling of safe crack growth and estimation of the durability of structures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2000;23(5):395–401. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00303.x>

### References

1. Panfilov AV, Deryushev VV, Korotkii AA. Recommended Safety Systems for Risk-Oriented Approach. *Occupational Safety in Industry*. 2020;5:48–55. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-48-55> (In Russ.).
2. Moskvichev VV, Makhutov NA, Shokin YuI, et al. *Prikladnye zadachi konstruktivnoy prochnosti i mekhaniki razrusheniya tekhnicheskikh sistem*. Novosibirsk: Nauka; 2021. 795 p. (In Russ.).

3. Deryushev VV, Kosenko EE, Kosenko VV, et al. Technical decisions in uncertain environment at risk. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2019;2:56–61.
4. Kotesov AA. Method for determining the parameters of the probability distribution of the population strength characteristics of structural steels based on sample data. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya*. 2020;4:23–29. [https://doi.org/10.46973/0201-727X\\_2020\\_4\\_23](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2020_4_23) (In Russ.).
5. Sikan AV. Practical procedures of estimating parameters of Weibull distribution for hydrological computations. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2011;19:37–45. (In Russ.).
6. Lepikhin AM, Moskvichev VV, Doronin SV. Reliability, survivability and safety for complex technical systems. *Computational Technologies*. 2009;14(6):58–70. (In Russ.).
7. Doronin SV, Reizmunt EM, Rogalev AN. Erratum to: Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2018;47(4):387. <https://doi.org/10.3103/S1052618818040167>
8. Doronin SV, Reizmunt EM, Rogalev AN. Problems on Comparing Analytical and Numerical Estimations of Stressed-Deformed State of Structure Elements. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017;46(4):364–369. <https://doi.org/10.3103/S1052618817040069>
9. Kotesova AA, Teplyakova SV, Popov SI, et al. Ensuring assigned fatigue gamma percentage of the components. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019;698(6):066029. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/6/066029>
10. Lepikhin AM. Nerazrushayushchii kontrol' i otsenka opasnosti defektov svarki na stadii ekspluatatsii oborudovaniya. *Materials of science issues*. 2007;3:208–213. (In Russ.).
11. Doronin S, Rogalev A. Numerical approach and expert estimations of multi-criteria optimization of precision constructions. *CEUR Workshop Proceedings*. 2018;2098:323–337.
12. Makhutov NA. *Bezopasnost' i riski: sistemnye issledovaniya i razrabotki*. Novosibirsk: Nauka; 2017. 724 p. (In Russ.).
13. Birger IA. *Tekhnicheskaya diagnostika*, 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: URSS: LENAND; 2018. 238 p. (In Russ.).
14. Klyuev VV, Lozovskii VN, Savilov VP. *Diagnostika detalei mashin i mekhanizmov*: in 2 parts. Part. 1. V.V. Klyuev (Ed.). Moscow: Spektr; 2017. 176 p. (In Russ.).
15. Klyuev VV. (Ed.). *Nerazrushayushchii kontrol'*: ref in 8 vol. Vol. 1 in 2 books. Book. 1: Sosnin FR. *Vizual'nyi i izmeritel'nyi kontrol'*. Book. 2: Sosnin FR. *Radiatsionnyi kontrol'*. 2<sup>nd</sup> ed., rev. Moscow: Mashinostroenie; 2008. 560 p. (In Russ.).
16. Makhutov NA, Albagachiev AYu, Alekseeva SI, et al. Prochnost', resurs, zhivuchest' i bezopasnost' mashin. Moscow: LIBROKOM Publishing house; 2008. 574 p. (In Russ.).
17. Lepikhin AM, Moskvichev VV, Doronin SV, et al. Probabilistic modeling of safe crack growth and estimation of the durability of structures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2000;23(5):395–401. <https://doi.org/10.1046/j.1460-2695.2000.00303.x>

Об авторах:

**Дерюшев Виктор Владимирович**, профессор кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, [ORCID](#)

**Теплякова Светлана Викторовна**, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [ScopusID](#), [ORCID](#), [svet-tpl@yandex.ru](mailto:svet-tpl@yandex.ru)

**Зайцева Марина Михайловна**, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ScopusID](#), [ORCID](#), [marincha1@rambler.ru](mailto:marincha1@rambler.ru)

Заявленный вклад соавторов:

**В.В. Дерюшев** — научное руководство, анализ результатов исследований. С.В. Теплякова — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов. М.М. Зайцева — анализ результатов исследований, доработка текста, коррективировка выводов, подготовка текста, формирование выводов.

Поступила в редакцию 04.04.2023.

Поступила после рецензирования 22.04.2023.

Принята к публикации 23.04.2023.

*Конфликт интересов*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*About the Authors:*

**Viktor V Deryushev**, professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Dr. Sci. (Eng.), [ORCID](#)

**Svetlana V Teplyakova**, associate professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci. (Eng.), [ScopusID](#), [ORCID](#), [svet-tpl@yandex.ru](mailto:svet-tpl@yandex.ru)

**Marina M Zaitseva**, associate professor of the Operation of Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Cand. Sci. (Eng.), associate professor, [ScopusID](#), [ORCID](#), [marincha1@rambler.ru](mailto:marincha1@rambler.ru)

*Claimed contributorship:*

**VV Deryushev**: academic advising, analysis of the research results. **SV. Teplyakova**: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations. **MM Zaitseva**: analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions, preparation of the text, formulation of the conclusions.

**Received** 04.04.2023.

**Revised** 22.04.2023.

**Accepted** 23.04.2023.

*Conflict of interest statement*

The authors do not have any conflict of interest.

*All authors have read and approved the final manuscript.*