

Analysis of Reliability and Durability of Machines in Extreme Conditions

P.H. Suleymanov

Azerbaijan State Scientific-Research Institute of Labour Protection and Safety Engineering (Tabriz st., 108, Baku, AZ 1008, Azerbaijan)

For correspondence:

Suleymanov Panah / e-mail: p.suleymanov@azdemtteti.az

Abstract

The article deals with the issues of studying the problems of reliability and durability of machines and equipment according to literary sources. The received data is analyzed. Some patterns related to the reliability and durability of machines and equipment operated in extreme conditions are discussed. Depending on the task at hand, when testing the reliability of machines and equipment, two types of tests are used: identification and control tests. The collection of data to determine the reliability and durability of machines and equipment is carried out using the relevant standards.

Keywords: machines, equipment, reliability, durability, operation, conditions, emergency, analysis.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_02_42_52

Received 01.03.2023

Revised 16.06.2023

Accepted 21.06.2023

For citation:

Suleymanov P.H.

[Analysis of reliability and durability of machines in extreme conditions]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 42-52 (in Russian)

Ekstremal vəziyyətlərdə maşınların etibarlılığının və uzunömürlülüüyünün analizi

P.H. Süleymanov

Azərbaycan Dövlət Əməyin Mühafizəsi və Təhlükəsizlik Texnikası Elmi-Tədqiqat İnstitutu
(Təbriz küç. 108, Bakı, AZ1008, Azərbaycan)

Yazışma üçün:

Süleymanov Pənah / e-mail: p.suleymanov@azdemtteti.az

Xülasə

Məqalədə, maşın və avadanlıqların etibarlılıq və uzunömürlülük problemlərinin ədəbi mənbələr əsasında öyrənilməsi məsələlərinə baxılıb. Alınan məlumatlar analiz edilib. Fövqəladə vəziyyətlərdə və ekstremal şəraitlərdə istismar olunan maşın və avadanlıqların etibarlılığı və uzunömürlülüüyü ilə bağlı bəzi qanunauyğunluqlar müzakirə olunub. Maşın və avadanlıqların etibarlılığını yoxlayarkən qarşıya qoyulan vəzifədən asılı olaraq, iki növ sınaqdan istifadə olunur: təyinetmə və nəzarət sınaqları. Maşın və avadanlıqların etibarlılığını və dayanıqlığını müəyyən etmək üçün məlumatların toplanması müvafiq standartlardan istifadə etməklə həyata keçirilir.

Açar sözlər: maşınlar, avadanlıqlar, etibarlılıq, uzunömürlülük, istismar, şərait, fəvqəladəlik, analiz.

DOI 10.52171/2076-0515_2023_15_02_42_52

УДК 621-192; 621.81-192

Анализ надёжности и долговечности машин в экстремальных условиях

П.Г. Сулейманов

Азербайджанский государственный научно-исследовательский институт по охране труда и техники безопасности (ул. Тебриз, 108, Баку, AZ1008, Азербайджан)

Для переписки:

Сулейманов Панах / e-mail: p.suleymanov@azdemtteti.az

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы изучения проблем надёжности и долговечности машин и оборудования по литературным источникам. Полученные данные анализируются. Обсуждаются некоторые закономерности, связанные с надёжностью и долговечностью машин и оборудования, эксплуатируемых в экстремальных условиях. В зависимости от поставленной задачи при испытаниях на надёжность машин и оборудования применяют два вида испытаний: определительные и контрольные испытания. Сбор данных для определения надёжности и долговечности машин и оборудования осуществляется с применением соответствующих стандартов.

Ключевые слова: машины, оборудования, надёжность, долговечность, эксплуатация, условия, чрезвычайность, анализ.

Введение

Современная техника, применяемая при ликвидации результатов землетрясений, при тушении пожаров различного характера, при выполнении аварийно-спасательных работ на суше и на воде, на транспорте, в строительстве, на нефтяных скважинах, а также используемая при ликвидации последствий других многочисленных природных и техногенных процессов, характеризуется многообразием различных машин и оборудования, механизмов, агрегатов, приспособлений и инструментов, надежность которых является определяющим фактором при обеспечении безопасности людей и их имущества и имеет большое экономическое и социальное значение.

Технологии, применяемые при ликвидации результатов чрезвычайных и экстремальных ситуаций, имеют свою специфику. В состав оборудования, эксплуатируемого в чрезвычайных и экстремальных ситуациях, входят все известные виды механических соединений, электро-, гидро- и пневмосистемы, трансмиссии, двигатели различного вида, узлы и механизмы общего назначения, различные электрооборудования и т.д. Безусловно, машины и оборудования, эксплуатируемые в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, первым долгом относятся к объектам, функционирование которых связано с обеспечением безопасности.

К оборудованию, предназначенному для эксплуатации в экстремальных ситуациях, относятся: автомобили, тракторы, краны различных типов, насосы, компрессоры, режущие и деформирующие устройства, телескопические соединения и многие другие различные механизмы и устройства.

К оборудованию, работающему в экстремальных условиях, можно отнести также и буровое и нефтепромысловое оборудование. К буровому оборудованию относятся роторы и вертлюги, насосы, талевая система, привод ротора и др. К оборудованию, предназначенному для добычи нефти и газа, относятся: колонные головки и фонтанные арматуры различных типов, которыми оснащаются устья фонтанирующих и газлифтных скважин; подземные и наземные устройства для насосного метода добычи; специальные оборудования для комбинированной и раздельной добычи в различных пластах и др.

Анализ условий эксплуатации многочисленных машин и оборудования показывает, что их надежность и долговечность во многом связаны со сложностью взаимодействия отдельных их узлов и соединений с окружающей средой, в которой они работают, с несовершенством их конструкций, нестабильностью свойств материалов их деталей [1-8] и др.

Цель работы – определить закономерности, связанные с надежностью и долговечностью машин и оборудования, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

Надежность и долговечность машин и оборудования, работающих в чрезвычайных и экстремальных ситуациях, зависят от многочисленных связанных между собой и не связанных факторов, которые определяют их безотказность в условиях эксплуатации.

Теория надежности имеет два основных направления: вероятностно статистическое и детерминированное.

В рамках первого направления разработаны математические методы оценки

надежности высоконадежных структур технических систем [9].

Второе направление рассматривает механизмы процессов, оказывающих основное влияние на надежность, разрабатываются новые методы расчета и технологические методы повышения надежности материалов, элементов и объектов. В настоящее время объединяются эти направления, при этом методы и результаты из одной области используются в другой и на этой основе возникает единая общая наука о надежности технических объектов [9].

Установлено, что современная теория надежности основывается на фундаментальных законах математики и физики. Практически, принимая различные методы математики, можно решать любые задачи, связанные с надежностью машин и оборудования. Учитывая и принимая во внимание физические основы разрушения материалов, можно прогнозировать изменение характеристик и основных свойств элементов машин и оборудования за определенный промежуток времени эксплуатации. Кроме того, при помощи математических методов статистики можно определить оптимальные условия эксплуатации машин и оборудования, выполняющих различные технологические процессы [10-12] и др.

Причины, снижающие работоспособность машин и оборудования

Результаты анализа отказов машин и оборудования, работающих в чрезвычайных и экстремальных ситуациях, показывают, что их возникновение непосредственно связано с различными причинами. Можно условно разделить их на механические, электрические, акустические, гидравлические, пневматические, кинематиче-

ские, электромагнитные, химические и др. Каждый класс машин и оборудования имеет свою специфическую причину отказов. Указанные причины можно отнести также и к отдельным узлам и механизмам машин и оборудования, работающих в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях. Например, для пожарных автомобилей характерен отказ двигателей, связанный с механическими, гидравлическими, тепловыми и электрическими воздействиями: для коробки передач, картера заднего моста и ходовой части – с механическими, кинематическими и химическими; для тормозных систем – с механическими, гидравлическими и пневматическими; для электрооборудования – с электрическими, электромагнитными; для насосного отсека – с механическими (наличие трещин и деформаций, следы коррозии и др.); для вакуумной системы – с механическими и пневматическими; для пожарно-механического вооружения – с механическими (наличие вмятин, потёртостей, внутренних отслоений высасывающих рукавов, повреждений, деформаций и смятой тетивы и ступени лестниц) и гидравлическими воздействиями – (необеспечение шиберами герметичности, несмыкание соединительных головок напорных штуцеров с высасывающими и напорно-высасывающими рукавами, обеспечение герметичности клапанов и уплотнителей) и т.д. Анализ причин и видов отказов обычно проводится с целью их предупреждения [13-15].

Количество показателей надежности для многих видов машин и оборудования приведены в государственных и отраслевых стандартах, технических условиях и другой нормативно-технической документации.

При анализе надежности машин и механизмов иногда возникают ситуации, при которых случайная величина является сочетанием двух или более случайных величин с различными распределениями.

Количественные характеристики надежности машин и механизмов, в том числе машин и оборудования, эксплуатируемых в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, оцениваются по результатам испытаний с учетом основных положений теории вероятностей.

Математический аппарат теории надежности базируется на основных положениях и теоремах теории вероятностей [16-18].

В процессе эксплуатации машин и механизмов, работающих в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, иногда из-за изменения нагрузок и условий эксплуатации происходят непредвиденные, случайные процессы.

Большинство физических процессов и явлений, происходящих в материалах, имеет физико-статистическую природу. Следовательно, подход к анализу состояния технических объектов должен быть, как правило, структурно-вероятностным: следует рассмотреть как физическую структуру объектов и материалов, так и статистические, кинематические закономерности процессов.

Характер процессов, вызывающих отказ машин и оборудования, можно изучать на субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом уровнях.

Как известно, классификация возникновения отказов может быть проведена по типу применяемых материалов, по виду энергии, по виду условий эксплуатации и др. Материалы деталей машин и механиз-

мов обычно представляют собой твердые тела, такие как металлы, сплавы, кристаллы, полимеры и т.д.

В зависимости от места протекания процессы бывают объемные, поверхностные и протекающие в подвижных и неподвижных соединениях деталей.

Согласно [16], эксплуатационные воздействия, влияющие на процессы возникновения отказов, можно классифицировать по следующим показателям: по воздействию окружающей среды (температура, давление, влажность, химический состав, электромагнитные излучения и т.д.) и воздействиям, возникающим только при работе элементов (трение, электрический ток, нагрев при работе и т.д.), влияние которых, как правило, зависит от режима эксплуатации (интенсивности, цикличности, стабильности и т.д.).

По воздействию окружающей или рабочих сред различаются адсорбционные, диффузионные, химические, коррозионные, радиационные, кавитационные, эрозийные процессы. По характеру изменения во времени эксплуатационные воздействия можно разделить на возмущения и случайные влияния (стационарные, квазистационарные или нестационарные) [17].

По виду изменений, происходящих в материале, различаются обратимые (например, физическая адсорбция газов) и необратимые (коррозия, растворение и т.д.) процессы [19].

Как известно, функциональные зависимости, описывающие статистические законы состояния, не включают фактор времени в явном виде. Они могут быть использованы для прогнозирования надежности в случаях, когда известны закономерности изменения параметров и характери-

стик объектов во времени в процессе эксплуатации [17].

При оценке надёжности машин и механизмов, работающих в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, наряду с конструктивными и функциональными характеристиками, необходимо учитывать и влияние механических воздействий: температуры, давления, влажности, холода, света, пыли песка, радиации и других, изменяющих как физико-механические характеристики отдельных деталей, так и эксплуатационные показатели машин и оборудования в целом.

Скорость изменения параметров машин и механизмов характерна для многих процессов изменения свойств материала и старения. Идентичными зависимостями можно описать процессы, связанные с текучестью, ползучестью, усталостью, пластическим течением и разрушением твёрдых материалов трением и износом полимеров и др.

Образование активных частиц, помимо нагрева материала, может происходить также за счёт ионизации, диссоциации, образования радикалов, под действием электромагнитного поля, электрического разряда, ультразвукового излучения и других факторов [17].

Кроме того, изменение параметров деталей машин и механизмов, эксплуатируемых в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, часто происходит под воздействием химических процессов: переход атомов, молекул, ионов, дислокаций, дисперсных частиц и т.д. из одного состояния в другое.

Дефекты состояния материалов деталей оказывают определяющее влияние на их свойства и состояние. Исследователи

дефектов состояния материалов разделяют их на точечные, двумерные, поверхностные, трехмерные и обычные.

При пластической деформации, облучении или закалке в материале происходит большое число неравновесных процессов, приводящих к развитию или отсутствию дефектов различного характера [17].

Как известно, прочность и износостойкость деталей машин характеризуются в основном одномерными дефектами состояния материала.

Дислокация в кристалле образует изолированные замкнутые петли. Дислокация имеет два вида: краевая и винтовая. Повышение твердости материалов при дислокации в первую очередь связано с возникновением препятствий движению дислокаций [20].

Многие структурные изменения в материалах деталей машин, ухудшающих их износостойкость, могут происходить и в результате диффузий. Для деталей, помимо объёмной диффузии, существенное значение имеет поверхностная диффузия, которая приводит к изменению формы деталей, наращиванию, сглаживанию неровностей, возникновению выступов и впадин на поверхности и др.

Выявлено, что усталостное разрушение в основном является результатом пластической деформации материалов [21-22].

Многочисленными исследованиями установлено, что усталостное разрушение можно разделить на четыре этапа. На первом этапе происходит накопление пластической деформации, второй этап отличается образованием микротрещин, третий этап – развитием микротрещин до критических размеров, четвертый – хрупким разрушением.

Известно, что усталостное разрушение начинается с поверхности деталей. В связи с этим методы и способы обработки, которые формируют состояние поверхностей деталей, таких как шероховатость поверхности, остаточное напряжение, микротвёрдость поверхностного слоя, оказывают существенное влияние на усталостное разрушение материала поверхности деталей машин.

Следует отметить, что на износостойкость деталей машин положительное влияние оказывают оптимальные величины шероховатости поверхности, сжимающие остаточные напряжения, величина и глубина распространения микротвёрдости поверхностного слоя.

Существует два основных вида адсорбции: внешняя и внутренняя. Внешняя адсорбция влияет на наружные поверхности деталей и вызывает снижение предела текучести. Внутренняя адсорбция возникает на поверхности деталей, приводит к появлению дефектов внутри материала деталей, в результате чего снижается прочность и увеличивается хрупкость материала.

Разрушение поверхностей деталей вследствие коррозий происходит в результате воздействия на них жидкой или газообразной среды, что приводит к термодинамической неустойчивости их материалов.

Суть химической коррозии основывается на взаимодействии материалов с агрессивными средами различного типа. Электрохимическая коррозия непосредственно связана с коррозионной средой. Существенными элементами коррозионной среды могут быть вода, различные виды растворов веществ и другие химические и нехимические соединения.

Электрохимическая коррозия характеризуется взаимодействием металла с электролитом.

Газовая коррозия является частичным случаем химической и проявляется в активных газовых средах при повышенных температурах (например, в атмосфере водорода при давлении 150 атмосфер и температуре 560°C предел прочности стали через сутки уменьшается в 2 раза) [17].

Атмосферная коррозия является одной из основных причин разрушения металлов. Известны три основных вида атмосферной коррозии: сухая коррозия, которая при отсутствии влаги проявляется на поверхности деталей, скорость коррозии мала; влажная коррозия, которая происходит под тонким слоем влаги, скорость коррозии очень велика; мокрая коррозия, которая проявляется под воздействием капельной конденсации влаги на поверхностях деталей, скорость коррозии при этом виде небольшая.

Коррозия в неэлектриках происходит под воздействием агрессивных органических и неорганических соединений.

Контактная коррозия происходит при контакте разнородных материалов в среде электролита. Щелевая коррозия происходит в присутствии электролита между разнородными металлами. Коррозия под напряжением проявляется при одновременном воздействии деформации и коррозионной среды.

Разрушение материалов поверхностей деталей в результате эрозии очень редко происходит по одной причине, что усложняет оценку природы эрозии. Наиболее исследованными видами эрозии являются: механохимическая, микроударная, термическая, гидроэрозия, газовая, абразивная,

гидроабразивная эрозия и т.д.

Когда для пластической деформации недостаточна энергия потока жидкости, газа или твердых частиц, происходит механохимическая эрозия. Когда материал поверхности в потоке газа, жидкости или твердых частиц получает удары и энергия этих ударов достаточна для пластической деформации, структурных или фазовых превращений, наблюдается микроударная эрозия.

Процесс гидроэрозии происходит в механохимическом механизме или в результате микроударного разрушения.

В результате кавитации часто проявляются локальные гидравлические удары из-за гидродинамических флуктуаций давления.

Газовая эрозия является результатом контакта поверхности материалов с высокотемпературными и химически активными газовыми струями. Как известно, газовой эрозии способствуют термическая усталость, поглощение газов твердыми материалами, вторичные закалки и отпуск, цементация, азотирование и т.д.

Разрушение поверхностей деталей в среде раскаленных газов называется абляцией. Для процесса абляции характерны пиролиз, испарения, сублимация и др.

Гидро- и газоабразивная эрозия происходит в потоке жидкостей или газов под действием твердых частиц. Основными факторами, оказывающими влияние на гидро- и газоабразивную эрозию, являются твердость, прочность, размер, форма частиц, скорость и угол их атаки, характер их перемещение и др.

Гидроабразивная эрозия при кавитации наблюдается при одновременном воздействии на материал динамических пото-

ков жидкости, абразивных частиц и локальных кавитационных гидроударов.

Иногда при быстром нагреве происходит испарение (сублимация) материала деталей. Процесс сублимации обычно не характерен для деталей оборудования, эксплуатируемых в чрезвычайных и экстремальных ситуациях. Однако некоторые материалы, применяемые для покрытий (например, кадмий и цинк), в вакууме при температурах выше 120-180⁰ С могут испаряться с довольно значительными скоростями (порядка 1 мм/год), что заставляет учитывать процесс сублимации при расчете работоспособности деталей.

Одной из основных причин, снижающих работоспособность машин и оборудования, является процесс старения материалов деталей.

Результаты многочисленных наблюдений показывают, что при старении может происходить как улучшение, так и ухудшение физико-механических показателей материалов деталей, а также и других характеристик машин и механизмов.

Для деталей машин, изготовленных из металлов, в процессе старения существенное значение имеет мартенситное превращение и изменение мартенситной структуры.

К мартенситным превращениям относятся также аллотропические превращения в безуглеродистых сплавах. Аллотропические превращения происходят в результате формирования кристаллических решеток, имеющих разные системы и число атомов. Аллотропическим превращениям подвержены также некоторые чистые материалы.

Одним из материалов, для которых характерно более интенсивное старение по сравнению с металлами, являются полиме-

ры. Для них характерен процесс деструкции. Процессы деструкции происходят под влиянием тепла, света, кислорода, воды и других факторов. Деструкция происходит в результате распада основных макромолекул. Наиболее часто встречается термическая деструкция под действием тепла, фотохимическая деструкция под воздействием ультрафиолетового излучения, окислительная деструкция под действием химических агентов.

Кроме вышеуказанных видов старения, также различают электрическое старение под влиянием приложенного напряжения.

К вышеуказанным причинам можно прибавить непрерывность работы машин и оборудования, сверхперегрузку при эксплуатации, различные климатические условия и др.

В зависимости от места протекания все указанные процессы делятся на объемные и поверхностные, и, соответственно, их интенсивность определяется объемными или поверхностными характеристиками.

Для повышения безотказности машин и оборудования необходимо разработать такие конструктивные и технологические мероприятия, которые направлены на снятие указанных недостатков.

Однако случайный характер происходящих процессов при эксплуатации машин и механизмов, некорректность, нелинейность, дискретность показателей надежности затрудняет решение поставленной задачи.

Наиболее точные данные о надежности машин и оборудования можно получить в результате проведения экспериментально-исследовательских работ. В связи с

этим при определении параметров надежности применяются различные *методы моделирования*.

Основной задачей оценки надежности является определение оптимальных параметров машин и механизмов, обеспечивающих наиболее эффективные условия эксплуатации, оптимальные характеристики, способы обслуживания и восстановления [5, 17].

Оценка критериев надежности машин и оборудования обычно производится с применением методов системного анализа. В многофункциональных системах из-за увеличения числа возможных состояний трудоемкость ее применения становится нецелесообразной. Для этих условий лучше применять логико-вероятностный метод [17].

Для сложных технических систем возможны различные методы системного анализа.

Часто для увеличения надежности машин и оборудования, ликвидации недостатков, связанных с конструктивными, технологическими, эксплуатационными, организационными и другими причинами, используются различные методы резервирования: временное, структурное, информационное, функциональное, нагрузочное, оптимальное и др.

Наличие ограничений усложняет задачу оптимизации при резервировании, и для ее решения применяются различные способы и методы, такие как метод простого перебора, метод неопределенных множителей Лагранжа, градиентные методы (метод наискорейшего покоординатного спуска), метод максимального элемента, метод динамического программирования, метод ветвей и границ [23].

Зачастую при резервировании для расчета надежности машин и оборудования с восстановлением используются топологические методы с построением графа состояний [17].

Восстановление отказавшего элемента – процесс его перевода из неработоспособного состояния в работоспособное. Поэтому в графе состояний систем с восстановлением наряду с переходами из предыдущих состояний в последующие должны быть указаны и обратные переходы из последующих состояний в предыдущие с интенсивностями восстановления μ [17].

Задача проектирования технических объектов предусматривается стандартами. Иногда оценка надежности при проектировании не соответствует общетехническим нормам стандартов, и тогда разрабатываются различные методы и способы.

Для существенного повышения надежности машин и оборудования необходимо обеспечить достаточно высокий уровень техобслуживания, подготовленность обслуживающего персонала, квалифицированное проведение диагностики, совершенствование методики обработки полученных данных.

Направления восстановительных работ и ремонта непосредственно связаны с основными типами отказов, условиями эксплуатации и др. В настоящее время наиболее рациональным способом повышения качества техобслуживания и ремонта является система предварительного планирования [17]. При техобслуживании и ремонте необходимо учитывать назначение и тип отказов машин и оборудования. В

зависимости от типа повреждений различают текущий, средний и капитальный ремонт.

Для построения различных моделей эксплуатации машин и оборудования применяются методы теории массового обслуживания. С точки зрения практического применения наиболее часто используется стационарный режим функционирования систем массового обслуживания.

Для машин и оборудования, применяемых в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, основной задачей является получение информации об их работоспособности в конкретных условиях эксплуатации. Используя результаты функциональных испытаний, можно в целом оценить и надежность оборудования, работающего в экстремальных условиях.

Следует учитывать, что время испытания должно быть идентичным со средней наработкой машин и механизмов на отказ.

Заключение

В зависимости от поставленной задачи при испытаниях на надежность машин и оборудования необходимо применять два вида испытаний: определительные и контрольные испытания.

Сбор данных для определения надежности и долговечности машин и оборудования осуществляется с применением соответствующих стандартов.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

REFERENCES

1. **Babaev S.G.** Nadyozhnosti dolgovechnost burovogo oborudovaniya / Babaev S.G.: – Moskva: Nedra, – 1974. – s. 184. *(in Russian)*
2. **Tyurin S.F.** Obespechenie nadezhnosti tekhnicheskikh sredstv putem ih troirovaniya i raschetvereniya. / Tyurin S.F.// Nadyozhnost, – Moskva: –2019. N.1, – c. 4-9. *(in Russian)*
3. **Shebe H.**, Predelnaya nadyozhnost strukturnogo rezervirovaniya / H. Shebe, Shubinskij I.B.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2016- s. 3-13. *(in Russian)*
4. **Ancupov A.V.** Metodologiya prognozirovaniya nadyozhnosti elementov mashin po razlichnym kriteriyam / Ancupov A.V., Ancupov A.V. (ml.), Ancupov V.P. // Moskva: – 2014. N.1, – c. 5-14. *(in Russian)*
5. **Bajkov I.R.** Kompleks pokazatelej dlya ocenki nadyozhnosti gazoperekachiva-yushchih agregatov / Bajkov I.R., Kitaev S.V., Smorodova O.V.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2018. – N.4, – s. 16-21. *(in Russian)*
6. **Viktorova V.S.** O pokazatelyah nadyozhnosti tipa srednyaya narabotka / Viktorova V.S.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2014. N.4, – s. 27-29. *(in Russian)*
7. **Pohabov Yu.P.** Obespechenie nadyozhnosti unikalnyh vysokootvetstvennyh sistem / Pohabov Yu.P.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2017. – N.3, – s. 17-23. *(in Russian)*
8. **Repin D.S.** Algoritm operativnogo obnaruzheniya izmeneniya harakteristik nadyozhnosti / Repin D.S., Filaterov G.F.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2019. N.4, – s. 8-11. *(in Russian)*
9. **Nechiperenko V.I.** Strukturnyj analiz i metody postroeniya nadyozhnyh sistem / Nechiperenko V.I. – Moskva: Sovetskoe radio, – 1968. – s. 256. *(in Russian)*
10. **Ermolenko V.A.** Osobennosti rascheta pokazatelej nadyozhnosti gruzopodyomnyh mashin / Ermolenko V.A., Vitchik P.V.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2016. N.2, – s. 20-25. *(in Russian)*
11. **Pereguda A.I.** Matematicheskaya model nadyozhnosti izdeliya podverzhennogo udarnym nagruzkam / Pereguda A.I.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2014. N.2, – s. 43-52. *(in Russian)*
12. **Fillipov B.I.** Obrabotka dannyh, poluchennyh pri ispytaniyah na nadyozhnost / Fillipov B.I., Trush T.B.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2017. – N.2, – s. 24-30. *(in Russian)*
13. **Glebovich S.A.** Upravlenie otkazoustojchivosti pri ocenke tekhnicheskogo so-stoyaniya kompensatorov truboprovodov / Glebovich S.A.// Izvestiya TulGu, – Tula: – 2019. N.10, – s. 58-63. *(in Russian)*
14. **Dolganov A.I.** O naznachenii urovnya nadyozhnosti / Dolganov A.I., Saharov A.V.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2018. N.3, – s. 18-21. *(in Russian)*
15. **Mihajlov V.S.** Uluchshenie effektivnosti ocenok pokazatelej nadyozhnosti razlichnyh planov ispytaniy odnorodnoj produkcii / Mihajlov V.S.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2022. – N.2, – s. 30-37. *(in Russian)*
16. **Qafarov A.M.** Etibarlılığın və uzunömürlülüğün əsasları / Qafarov A.M., Şərifov Z.Z., Y.A. Xankişiyev. – Bakı: ADA – 2020. 358 c. *(in Azerbaijani)*
17. **Nevzorov V.N.** Nadyozhnost mashin i oborudovaniy (v 2-h tomah) / Nevzorov V.N., Sugak E.V. – Krasnoyarsk: SGTU, T.1, – 1998. – 240 s. *(in Russian)*
18. **Osincev K.V.** Metodologiya eksperimentalnogo opredeleniya pokazatelej nadyozhnosti pri provedenii staticheskikh ispytaniy sharovyh kranov na izgib / Osincev K.V., Kuznecov N.A.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2020. – N.3, – s. 15-20. *(in Russian)*
19. **Buyanovskij I.A.** Vliyanie dvuhslojnogo pokrytiya – orientanta na smazochnyuyu sposobnost masel / Buyanovskij I.A., Ignatev Z.V., Bolshakov A.N. i dr. // Trenie i smazka v mashinah i mekhanizmah, – Moskva: – 2015. N.4, – s. 11-15. *(in Russian)*
20. **Ivanova V.S.** Ustalostnoe razrushenie materialov / Ivanova V.S. – Moskva: – MIR – 1980 – 272 s. *(in Russian)*
21. **Baranov L.A.** Nadyozhnost obektov s nestacionarnoj intensivnostyu otkazov / Baranov L.A., Ermolin E.A.// Nadyozhnost, – Moskva: – 2017. – N.4, – s. 15-20. *(in Russian)*
22. **Gafarov A.M.** Progressivnye metody mekhanicheskoy obrabotki (v 2-h tomah) / Gafarov A.M. – Baku: Nauka, T.1, – 2001. 286 s. *(in Russian)*
23. **Sulejmanov P.G.** Povyshenie nadyozhnosti mashin i oborudovaniy, eksplua-tiruemyh v ekstremalnyh usloviyah / Sulejmanov P.G. – Baku: Nauka, 2018. 308 s. *(in Russian)*