

УДК 628.5

В.С. Казаков, А.С. Алексеев

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрены некоторые современные методы диагностирования предельного технического состояния и рекомендованные нормативными документами технологии оценки остаточного ресурса эксплуатации оборудования теплоэнергетических установок, позволяющие повысить эффективность, надежность и экологическую безопасность их дальнейшего практического использования в энергетической отрасли.

Ключевые слова: теплоэнергетическое оборудование, эксплуатация, диагностика, остаточный ресурс.

Вопросы теории и практики оценки качества эксплуатации применительно к задачам повышения надежности работы энерготехнологической, теплотехнической и электроэнергетической отраслей промышленности рассмотрены в литературных источниках в целом недостаточно полно - ни в прикладной области, если не считать появившихся в последние годы некоторых нормативных документов, ни тем более в научных исследованиях. В то же время продукция указанных отраслей не только общественно востребована, но и весьма специфична по своему характеру – это производство тепло- и энергоносителей в виде высокопотенциальных потоков горячей и холодной воды, технологического пара и конденсата, электроэнергии, сжатого воздуха, сжиженных природного и прочих газов. Современный уровень требований к этим энергоносителям, прежде всего как к продукции, устанавливаемый международными, российскими стандартами и нормативными документами, достаточно высок и определяет с учетом особенностей технологии не только технические условия функционирования самого производства (котельные, ТЭЦ, АЭС, компрессорные установки, газоразделительные и газоперекачивающие станции, трубопроводные системы), но и ограничения по условиям охраны и безопасности труда, медико-биологическим и экологическим показателям воздействия на персонал и окружающую среду. В целом основа инженерных подходов в современной энергетике – это решение задач создания безопасных технологий производства энергоносителей с прогнозируемыми показателями продукции и обеспечение высокой надежности эксплуатации энергетического оборудования.

Энергетические установки, будучи сложными и ответственными техническими объектами, содержат напряженные узлы и агрегаты, которые при аварии могут стать источником повышенной опасности для производства и окружающей среды. К настоящему времени около 70% энергоустановок исчерпали свой предельный (проектный) ресурс, но, находясь в удовлетворительном техническом состоянии, продолжают работать. Возникает необходимость внедрения в теплоэнергетический комплекс новых технологий, современных методов диагностики и систем контроля, позволяющих прогнозировать возможность дальнейшей эксплуатации оборудования, рассчитывать остаточный ресурс его работы [1-4].

Отказом оборудования считается нарушение его работоспособного состояния. Если оборудование после отказа или технического освидетельствования не подлежит восстановлению, то такое состояние считается предельным. Нецелесообразность восстановления оборудования, имеющего повреждение, может быть обусловлена как технико-экономическими показателями, так и нарушениями установленных нормативных требований безопасности эксплуатации. Признаки предельного состояния оборудования, установленные нормативно-технической документацией, являются критериями предельного состояния. Одним из таковых является остаточный ресурс - запас возможной наработки

оборудования после момента контроля его технического состояния (или ремонта), в течение которого обеспечивается соответствие требованиям нормативно-технической документации всех его основных технико-экономических показателей.

Остаточный ресурс оборудование может иметь не только до истечения расчетного срока службы, но и после него. Это обусловлено действующими нормами и правилами расчета сроков службы оборудования, предусматривающими обеспечение необходимых характеристик надежности, прочности, износостойкости изделий, экологической безопасности при наиболее неблагоприятных режимах нагружения в заданных условиях эксплуатации, а также при минимальных уровнях механических характеристик конструкционных материалов, обеспечиваемых стандартом.

Для принятия обоснованных решений необходимо иметь достаточную информацию о нагруженности основных и наиболее напряженных элементов в течение всего предыдущего периода эксплуатации, а также об изменении технического состояния этих элементов.

Диагностирование предельного технического состояния и прогнозирование величины остаточного ресурса может быть надежно осуществлено при одновременном выполнении следующих условий [1]:

- известны параметры технического состояния (ПТС) оборудования;
- известны критерии предельного состояния оборудования;
- имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений ПТС.

Так, при прогнозировании остаточного ресурса теплоэнергетических установок можно считать:

- предельным состоянием оборудования, работающего с коррозионно-активной средой, - уменьшение толщины его стенок до расчетной величины (при эксплуатации периодически осуществляется контроль толщины стенок);
- предельным состоянием теплообменных поверхностей - ухудшение теплообмена из-за отложений на трубах, выражающееся в снижении температуры на выходе нагреваемого рабочего тела до предельно допустимого значения (при эксплуатации ведется непрерывный контроль температуры на выходе из аппарата).

Информативными параметрами для прогнозирования и расчета остаточного ресурса также могут быть:

- величины возникающих повреждений (глубина коррозии, величина эрозионного или механического износа);
- параметры сопутствующих процессов (уровни вибрации агрегатов, величины утечек в уплотнениях, температура узлов трения и др.);
- технологические параметры (давление, температура, расход продукта);
- показатели качества и эффективности функционирования оборудования (производительность, расход электроэнергии, коэффициент полезного действия и т.п.).

По многим характерным для энергетического оборудования деградиционным процессам (коррозии, изнашиванию, усталостным и температурным напряжениям) указанные факторы выявляются по другим видам повреждений (образованию трещин, межкристаллитной коррозии), которые требуют проведения специальных исследований с использованием статистических методов обработки.

В общем случае для выбора наиболее информативных параметров составляется полный перечень предельных состояний оборудования и соответствующих контролируемых параметров, связанных с каждым предельным состоянием. При этом из данного перечня могут исключаться зависимые (вторичные) параметры, если при контроле основных параметров обеспечивается получение достоверных данных в необходимом объеме.

По результатам анализа определяются имеющиеся источники получения исходных данных для прогнозирования (вахтовые журналы, ведомости дефектов, контрольные кар-

ты, диаграммы и др.). При их недостатке могут планироваться специальные дополнительные наблюдения за изменением эксплуатационных параметров.

Для расчета предельного срока службы при наличии достаточной статистической базы данных используются классические методы графической экстраполяции [1]. Так может быть рассчитана, например, продолжительность работы агрегатов (узлов), подверженных контролируемому износу: через определенные периоды эксплуатации $t_1, t_2 \dots t_n$ измеряют максимальные величины возникших повреждений (износа, коррозии, деформаций) $h_1, h_2 \dots h_n$ и экстраполируют кривую зависимости до предельно допустимой величины повреждений $h_{пр}$. Такой метод позволяет получить достаточно точные оценки диагностирования надежности работы, если известен вид функциональной зависимости $h(t)$ и при измерениях величины h определяются действительно максимальные значения повреждений.

Возможность прогнозирования остаточного ресурса оборудования имеется в тех случаях, когда критерии предельного состояния оборудования определены в численных значениях и в ходе эксплуатации ведутся измерения (периодические или непрерывные) и регистрация параметров, определяющих предельное состояние.

В зависимости от вида агрегата, технического состояния и условий эксплуатации теплоэнергетического оборудования могут быть предложены следующие методики по оценке остаточного ресурса [1; 2]:

А. Оценка остаточного ресурса по циклам нагружения. При эксплуатации емкостных конструкций энергетических установок, например сосудов, фактически действующие нагрузки и напряжения в их элементах отличаются от расчетных, могут возникать различные повреждения, которые создают дополнительные концентрации напряжений. Поэтому при оценке остаточного ресурса сосудов необходимо проведение исследования их циклического напряженного состояния с учетом имеющихся концентраторов напряжений для определения фактического и допускаемого числа циклов нагружения. Остаточный ресурс определяется вычитанием из допускаемого числа циклов нагружения их фактического значения [5].

Такой метод применим для оценки остаточного ресурса барабанов котлов, аккумуляющих баков, теплообменных аппаратов, различных сосудов, работающих под давлением и с тепловой нагрузкой. Данная методика не может быть рекомендована для оценки остаточного ресурса сосудов при наличии в их элементах дефектов типа раковин и трещин.

Б. Диагностирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния. Этот метод расчета остаточного ресурса используется для прогнозирования изнашивания и других монотонных процессов ухудшения технического состояния узлов и агрегатов машин, оборудования и приборов. Он заключается в получении (экспериментально или аналитически) функции, характеризующей процесс изменения параметра технического состояния при всех возможных вариантах его изменения [6]. Остаточный ресурс определяется как отношение величины параметра технического состояния к моменту контроля к его предельному значению с учетом нормативного отклонения.

Данная методика может быть рекомендована, если изменение ПТС к моменту контроля составляет не менее половины предельного отклонения параметра. В этом случае погрешность прогнозирования не превышает 8...9%.

В. Оценка остаточного ресурса по изменению технологических параметров. В тех случаях, когда технологические показатели оборудования (давление, температура, расход теплоносителей и пр.) монотонно изменяются во времени (по наработке), для прогнозирования остаточного ресурса может быть применена статистическая методика, использующая при обработке материалов законы изменения технологического параметра с оценкой соответствующих показателей на базе метода наименьших квадратов [7]. Алгоритм разработан для линейного, квадратичного и экспоненциального законов изменения

показателя назначения. Данная методика может быть рекомендована для оценки остаточного ресурса цилиндров компрессора, теплообменных аппаратов, насосов, трубопроводов и др.

Г. Диагностирование остаточного ресурса по развитию коррозионных повреждений. Заключается в проведении периодических обследований оборудования, при которых должны быть проведены измерения в точках, равномерно распределенных по поверхности, максимальной глубины коррозии. По результатам замеров выполняется расчет скорости коррозии [8].

Данная методика может быть рекомендована для оценки остаточного ресурса больших поверхностей оборудования, находящихся в одинаковых условиях эксплуатации и образования коррозии. Если невозможно измерить глубину коррозии на всех участках обследуемой поверхности, то измерения осуществляют выборочно. Для участков поверхности, существенно отличающихся по условиям эксплуатации и образования коррозии (местные перегревы, повышенные скорости технологической среды и т.п.), применение данного метода нецелесообразно, так как неравномерность коррозии и ее глубина и будут зависеть главным образом от различий этих условий.

Д. Оценка остаточного ресурса по изменению показателей качества и эффективности работы оборудования. Контролируя изменение таких параметров, как производительность, коэффициент полезного действия, уровень вибрации и шума, величина утечки через уплотнения, можно по мере приближения их значений к предельно допустимым прогнозировать момент наступления отказа.

Методика заключается в оценке остаточного ресурса путем статистической обработки значений измеренных параметров технического состояния [9]. Ее использование дает удовлетворительную погрешность прогнозирования, если продолжительность наблюдений составляет не менее 20% от ожидаемой наработки до предельного состояния. При этом число измерений в ходе испытаний для монотонных процессов зависит от доверительной вероятности и допустимой ошибки, а для немонотонных составляет не менее 100.

Е. Оценка остаточного ресурса по эквивалентной температуре эксплуатации. Методика заключается в определении скорости наружной коррозии, которая зависит от эквивалентной рабочей температуры, приведенного напряжения в стенке конструкции и доли использования ресурса, равной отношению срока эксплуатации элемента ко времени до его разрушения [10].

Данная методика может быть рекомендована для оценки остаточного ресурса оборудования, эксплуатирующегося при высоких температурах, например трубчатых систем теплообменных аппаратов, радиационных поверхностей нагрева, корпусных деталей топki котла и т.п.

Ж. Оценка остаточного ресурса по приведенным напряжениям и эквивалентному давлению. Расчет ведется по одному из известных эксплуатационных параметров: приведенным напряжениям, эквивалентной температуре, эквивалентному давлению, эквивалентной наработке [10]. Вид зависимостей определяется формой образцов и материалом, из которого они выполнены.

Данная методика может быть рекомендована для оценки остаточного ресурса змеевиковых теплообменников и коллекторов котла, трубопроводных систем.

З. Оценка остаточного ресурса по коэффициенту асимметрии нагружения. При несимметричных нагрузках расчет заключается в определении коэффициента асимметрии нагружения, который зависит от температурных колебаний, числа циклов для режимов пусков-остановов, возможности теплового и гидроудара в процессе эксплуатации. При этом оценка остаточного ресурса дается по величине накопленных повреждений в металле [11].

Данная методика позволяет проводить лишь приближенную оценку остаточного ресурса и может быть рекомендована для оборудования и его элементов, подвергающихся несимметричным нагрузкам.

Таблица

Выбор метода диагностирования и оценки остаточного ресурса энергетического оборудования

Виды оборудования		Методы расчета остаточного ресурса *								
		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
Котельные установки	Барaban котла	+	+	+	+	+	+	-	+	+
	Топочное устройство	-	+	+	+	+	+	-	+	+
	Радиационные поверхности нагрева	-	+	+	+	+	+	+	+	+
	Пароперегреватель	+	+	+	+	+	+	+	-	+
	Экономайзер	+	+	+	+	+	+	+	-	+
	Воздухоподогреватель	+	+	+	+	+	+	+	-	+
	Обмуровка котла	-	+	-	-	+	+	-	-	+
	Водопроводы	-	-	+	+	-	-	+	-	+
	Паропроводы	-	-	+	+	-	+	+	-	+
	Коллекторы	+	+	+	+	+	+	+	-	+
	Арматура	+	+	+	+	+	+	-	+	-
	Тягодутьевые устройства	+	+	+	+	+	+	-	+	+
Компрессорные установки	Поршневой цилиндр	+	+	+	-	+	-	-	+	+
	Ресивер	+	-	-	+	-	-	-	-	+
	Воздухоохладитель (промежуточный)	+	+	+	+	+	+	-	-	+
	Воздухоохладитель (концевой)	+	+	+	+	+	+	-	-	+
	Маслоохладитель	-	+	+	+	+	+	-	-	+
	Водоохладитель	-	+	+	+	+	+	-	-	+
	Воздухопроводы	+	-	+	+	-	+	+	+	+
	Водопроводы	-	-	+	+	-	-	+	-	+
	Маслопроводы	-	-	+	+	-	-	+	-	+
	Арматура	+	+	+	+	+	+	-	+	-

* Буквенные обозначения соответствуют названиям методов расчета, указанным в тексте.

И. Оценка остаточного ресурса приборными методами. В последние годы наряду со средствами неразрушающего контроля применяют встроенные приборы, предназначенные для непосредственной оценки остаточного ресурса [1]. Это счетчики ресурса, индикаторы нагруженности и датчики повреждений цифрового и аналогового типов. К первому типу относятся устройства, основу которых составляют микропроцессоры, бортовые ЭВМ и т.п. Они фиксируют в цифровой форме историю нагружения данного конструктивного элемента, например последовательность деформаций при циклическом нагружении.

Основу счетчиков аналогового типа составляют чувствительные элементы - датчики, установленные на объекте и подвергаемые тем же воздействиям, что и исследуемый объект. Вследствие возникающих в датчике необратимых повреждений его рабочие параметры меняются. Измеряя эти параметры, можно сделать выводы о степени повреждения соответствующего узла, агрегата или детали. В качестве чувствительных элементов используют проволочные, фольговые или полупроводниковые тензорезисторы.

Примером цифрового счетчика ресурса может являться портативный рентгеновский дифрактометр [12]. Оценка остаточного ресурса проводится методами рентгеновской дифрактометрии: определяются в два контрольных этапа остаточные напряжения в выбранных зонах на поверхности металлической детали, включая все наиболее нагружаемые в процессе эксплуатации, рассчитываются скорость изменения остаточных напряжений и назначенный ресурс, вычитанием из которого фактической наработки получается величина остаточного ресурса.

Данный прибор имеет широкий спектр применения и может быть рекомендован для определения остаточного ресурса оборудования из всех видов металлов и сплавов, различных размеров и форм (плоских, цилиндрических, сферических, ступенчатых и т.п.). Точность определения остаточного ресурса приборными методами составляет 1...10%.

Для удобства выбора и практического использования исследованных методов проведения диагностирования и оценки остаточного ресурса эксплуатации в качестве примера разработана технологическая карта, в которой рассмотрены возможности их применения к некоторым основным видам оборудования паровых и водогрейных котельных, а также поршневых компрессорных установок. Результаты анализа применимости указанных методов, включающие рекомендации нормативно-технической документации, периодической литературы с учетом практического опыта эксплуатации подобного оборудования [10;13;14], представлены в таблице.

Анализ эксплуатационных характеристик, возможностей и области применения рассмотренных методик позволяет заключить, что наиболее универсальными в инженерной практике являются расчетные методы оценки остаточного ресурса оборудования по изменению технологических параметров и технического состояния, а также приборные методы.

В практике диагностирования все большее применение находят комбинированные методики, сочетающие возможности аналитических и инструментальных подходов, преимущественно с использованием современных информационных технологий. Программные комплексы с экспертными системами позволяют эффективно проводить комплексную диагностику технического состояния оборудования авиационных, турбинных, компрессорных, энергетических, теплотехнических, газоиспользующих и др. высокотехнологичных установок. Экспертная система способна имитировать действия специалиста-эксперта, а также использует преимущества компьютерной обработки информации, позволяющие выбирать и применять различные методы инженерных решений, значительно повысить достоверность информации, уменьшить вероятность ошибок при диагностировании.

Выбор метода прогнозирования остаточного ресурса зависит от условий эксплуата-

ции, характера преобладающего процесса деградации (изнашивания, коррозии, усталости, ползучести и др.), необходимой точности и достоверности прогноза, а также от технических возможностей реализации метода. В основе механизма выбора метода - требуемый объем диагностических мероприятий и достаточно надежная система экспертной оценки результатов. При невысоких требованиях к точности и достоверности применяются упрощенные методы. В случае необходимости гарантированных оценок используются уточненные методы, в том числе базирующиеся на теории надежности. Оценка работоспособности оборудования по результатам диагностических обследований обычно осуществляется путем выявления возникших повреждений, определения их величины и сопоставления с их предельно допустимыми нормативными значениями. Выявленные дефекты относят к допустимым или недопустимым и принимают решение о возможности дальнейшей эксплуатации, необходимости ремонта оборудования, его модернизации или утилизации.

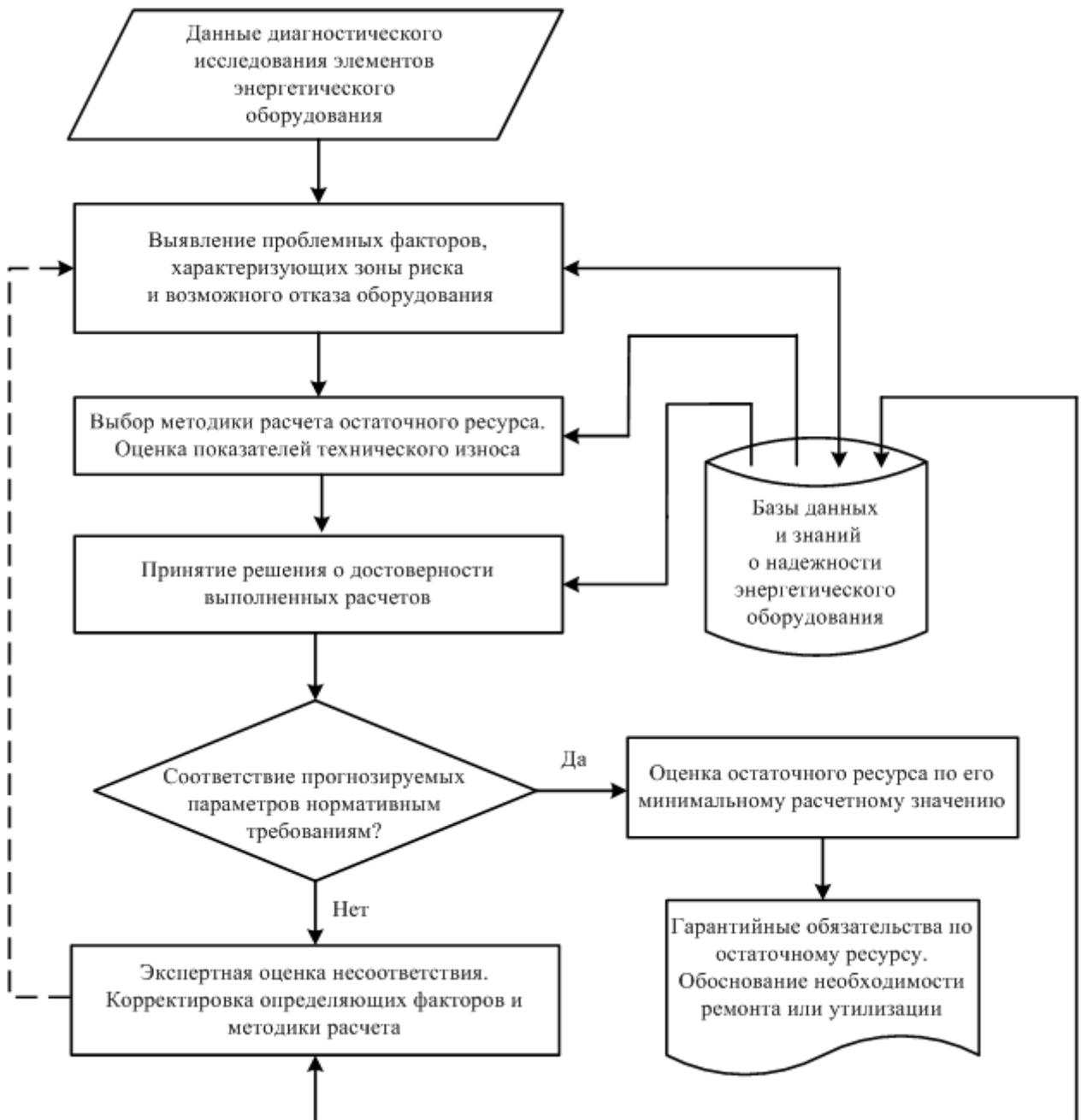


Рис. Блок-схема процесса выбора методики расчета остаточного ресурса оборудования

Механизм выбора методики расчета остаточного ресурса можно представить в виде блок-схемы работы модуля экспертной системы принятия решения о качестве эксплуатации (рисунок), где базы данных и знаний, полученные с применением инструментальных и аналитических методов диагностики, используются при комплексном диагностировании и экспертизе показателей эксплуатационной надежности технического объекта. Это позволяет не только обоснованно выбирать конкретный метод расчета остаточного ресурса, но и профессионально, с заданной доверительной вероятностью прогнозировать эксплуатационные показатели установки.

Современные информационные технологии существенно расширяют возможности расчетных методик, увеличивают достоверность анализа и оперативность принятия конкретных решений. Это значительно улучшает в целом динамику согласования режимов работы энергосистемы с нагрузками потребителей, что особо важно для энергетических установок, так как способствует повышению качества их продукции и эксплуатационной надежности. В свою очередь, использование современных методов диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса не только дает возможность повысить уровень безопасности энергетического производства, но и способствует увеличению межремонтного периода работы оборудования, повышает его работоспособность и экономическую эффективность при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носов, В.В. Диагностика машин и оборудования: учеб. пособие / В.В. Носов. - СПб.: Лань, 2012. - 384 с.
2. Болотин, В.В. Ресурс машин и конструкций / В.В. Болотин. - М.: Машиностроение, 1990 - 448 с.
3. Казаков, В.С. Прогнозирование остаточного ресурса эксплуатации энергетического оборудования / В.С. Казаков, В.И. Слезко // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: тр. XII Всерос. науч.-техн. конф. - Воронеж: ВГТУ, 2013. - С.166-167.
4. Казаков, В.С. Диагностика эксплуатационных показателей эффективности работы энергетических установок / В.С. Казаков, В.И. Слезко, О.В. Кондратьева // Современные инновации в науке и технике: сб. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. - Курск: ЮЗГУ, 2014.- Т.2. - С.201-205.
5. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках.
6. ГОСТ 27.302-86. Надежность в технике. Методы определения допускаемого отклонения параметра технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса составных частей агрегатов машин.
7. ГОСТ 27.202-83. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции.
8. РД 26.260.004-91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.
9. РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным.
10. СТО 17230282.27.100.005-2008. Основные элементы котлов, турбин и турбоприводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования.
11. СО 153-34.17.442-2003. Инструкция по порядку продления срока службы барабанов котлов высокого давления.
12. Способ оценки остаточного ресурса деталей: пат. 2215280 РФ: МПК G01N3/00 /Котелкин А.В., Звонков А.Д., Лютцау А.В. - Заявл. 21.05.02; опубл. 27.10.03.
13. РД 09-244-98. Инструкция по проведению диагностирования технического состояния сосудов, трубопроводов и компрессоров промышленных аммиачных холодильных установок.
14. Казаков, В.С. Современные методы диагностирования показателей надежности и экологической безопасности при эксплуатации энерготехнологического оборудования / В.С. Казаков, Т.В. Клименко // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - №3. - С. 26-31.

Материал поступил в редколлегию 26.01.15.