

П.С. Кунина, П.П. Павленко, Е.И. Величко

П.С. Кунина,
П.П. Павленко,
Е.И. Величко

**ДИАГНОСТИКА
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ И ГАЗА**

ДИАГНОСТИКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА НЕФТИ И ГАЗА



П.С. Кунина, П.П. Павленко, Е.И. Величко

**ДИАГНОСТИКА
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА
НЕФТИ И ГАЗА**

Краснодар
2010

УДК 621.643

ББК 39.7

К 91

Рецензенты:

*доктор технических наук, профессор кафедры "Нефтегазового
промысла" Кубанского государственного технологического
университета" **Вартумян Георгий Тигранович;***

*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
"Промышленной теплоэнергетики и тепловых электрических станций"
Кубанского государственного технологического университета"
Гапоненко Александр Макарович*

Кунина, Полина Семеновна.

К 91 Диагностика энергетического оборудования трубопроводно-
го транспорта нефти и газа: монография / П.С. Кунина,
П.П. Павленко, Е.И. Величко. – Краснодар: Издательский
Дом – Юг, 2010. – 552 с.

ISBN 978-5-91718-082-3

В книге изложены основные понятия и задачи диагностики энергетического оборудования нефтегазовой отрасли, рассмотрены возможные воздействия на агрегаты различных факторов, виды неисправностей, причины их возникновения и методы обнаружения на различных этапах эксплуатации. Особое внимание уделено методам объективной оценки технического состояния перекачивающих агрегатов методами неразрушающего контроля.

Книга предназначена для инженерно-технического состава, занятого проектированием, эксплуатацией и техническим обслуживанием энергетического оборудования нефтегазовой отрасли. Она может быть использована в качестве учебного пособия для студентов специальностей 130501 и 130602, и слушателей магистратуры, обучающихся по направлениям 130500 «Нефтегазовое дело» и 151000 «Технологические машины и оборудование».

ББК 39.7

УДК 621.643

ISBN 978-5-91718-082-3

© П.С. Кунина, 2010

© П.П. Павленко, 2010

© Е.И. Величко, 2010

© ООО «Издательский Дом – Юг», 2010

Эпиграф

1. Рано или поздно бутерброд с маслом обязательно упадет.
2. Бутерброд с маслом обязательно падает маслом вниз.
3. Если, в редких случаях, бутерброд с маслом не упадет маслом вниз – на ковре все равно останется масляное пятно.
4. Общественность всегда выражает глубокую озабоченность по поводу падения очень большого бутерброда с большим слоем масла, причем жалеют не того, кто уронил и не того, на кого попало, а жаль сам бутерброд.
5. Когда найден виновник падения бутерброда с маслом, всегда приходит успокоение – дело сделано.
6. Бутерброд с маслом никогда не падает без причины.
7. Если падение бутерброда с маслом не оставляет повода для оптимизма, прими как должное, постарайся сделать правильные выводы и принять адекватное решение для ликвидации последствий.
8. Изучая упавший бутерброд с маслом и анализируя свое несчастье, помни, что в мире поминутно падает 48,5 бутербродов с маслом, ты не одинок.
9. Изучая траекторию движения и динамическое воздействие на бутерброд с маслом ты познаешь мир.
10. Если избежать падения бутерброда с маслом невозможно, прими меры, чтобы это случилось как можно реже.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	13
1. СЛОЖНАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ	15
1.1 Общая характеристика технических систем	15
1.1.1 Определение состава сложных технических систем	15
1.1.2 Классификация технических систем	16
1.2 Техническое состояние сложной технической системы ..	17
1.3 Классификация систем технического обслуживания	19
1.3.1 Основные виды эксплуатации оборудования	19
1.3.2 Виды ремонта	21
1.3.3 Этапы управления системой обслуживания и ремонта оборудования	22
1.4 Последовательный структурный анализ сложных технических систем	23
1.5 Анализ надежности, риска и безопасности эксплуатации объекта	27
1.6 Существующие методы анализа надежности, риска и безопасности	29
1.7 Стадия 1 – предварительный анализ опасностей (ПАО) ...	31
1.7.1 Анализ работоспособности системы (объекта)	33
1.7.2 Классификация технических систем по характеру отказов	41
1.7.3 Основные периоды функционирования оборудования	44
1.7.4 Введение ограничений на анализ	47
1.8 Стадия 2-выявление последовательности опасных ситуаций	48
1.8.1 Назначение и основные задачи технической диагностики	48
1.8.2 Стадия 2 – выявление последовательности опасных ситуаций (дерево событий, дерево отказов)	56
1.8.3 Методы построения «дерева отказов»	60
1.8.3.1 Структура дерева отказов	60

1.8.3.2 Основные правила построения дерева отказов	62
1.8.3.3 Построение дерева отказов методом графов	64
1.8.3.4 Построение дерева отказов с помощью графических символов и логических знаков	65
1.8.3.5 Метод построения дерева отказов при помощи таблицы решений	70
1.8.3.6 Формирование дерева отказов по методу И.М. Синдеева	74
1.8.3.7 Оптимизация выбора формы дерева отказов для определения технического состояния агрегата в условиях эксплуатации	77
1.9 Третья стадия изучения риска – анализ последствий	83
1.10 Анализ критичности (аварийных ситуаций)	88
2. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕХНИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ	90
2.1 Параметры, характеризующие работу перекачивающего агрегата	90
2.2 Основные причины, способствующие деструкции оборудования	93
2.3 Виды факторов воздействия на агрегат	96
2.4 Функционально – типологический анализ структуры возможных факторов воздействия на реальную техническую систему	101
2.5 Производственные дефекты	104
3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ	110
3.1 Методы контроля	110
3.1.1 Методы неразрушающего контроля	110
3.1.2 Методы разрушающего контроля	113
3.2 Измерительные системы	113
3.2.1 Требования, предъявляемые к системам измерения ..	113
3.2.2 Классификация измерительных систем, используемых для диагностики энергетических установок	117

3.2.3	Неавтоматизированный метод получения и обработки информации	119
3.2.4	Автоматизированный способ получения и обработки информации	121
3.3	Системы диагностики	123
3.4	Ошибки измерения	124
4.	КОНТРОЛЬ СТАТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ИСПЫТАНИЙ	127
4.1	Дефектоскопия	127
4.2	Контроль загрязнений	137
4.3	Методы разрушающего контроля	145
5.	ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ПРИЧИНЫ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ	149
5.1	Изнашивание твердых тел	149
5.1.1	Характер изменения скорости износа	149
5.1.2	Факторы, влияющие на износ	152
5.2	Основные виды износа	153
5.3	Коррозия	164
6.	ВИДЫ НЕИСПРАВНОСТЕЙ И РАЗРУШЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ	171
7.	НЕИСПРАВНОСТИ И ВИДЫ РАЗРУШЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ	199
7.1	Виды разрушений подшипников качения	200
7.2	Контроль технического состояния подшипников качения	210
8.	НЕИСПРАВНОСТИ СИСТЕМЫ СМАЗКИ	212
9.	НЕИСПРАВНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ	217
9.1	Центровка шестерен	220
9.2	Повреждения поверхности зубьев шестерен	223
9.3	Дефекты и неисправности зубчатых соединительных муфт	234

10. ВИДЫ И ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЙ ВАЛОВ АГРЕГАТОВ	237
10.1 Несоосность валов агрегатов	237
10.2 Виды разрушений валов	240
10.3 Неисправности элементов, служащих для передачи крутящего момента от валов к дискам роторов и зубчатых колес	250
10.4 Силовые корпуса перекачивающих агрегатов	253
11. ОТКАЗЫ И НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК	257
11.1 Выбор типа привода для силовой установки	257
11.2 Виды отказов и некоторые причины износа электрических машин	266
12. ПРИЧИНЫ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТУРБОПРИВОДОВ И НАГНЕТАТЕЛЕЙ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ	285
12.1 Компоновка агрегатов компрессорной установки	285
12.2 Виды отложений на элементах проточных частей газоперекачивающих агрегатов	290
12.3 Неисправности и причины дестабилизации работы проточной части осевого компрессора	294
12.3.1 Влияние атмосферных условий	294
12.3.2 Абразивный износ элементов проточной части осевого компрессора	295
12.3.3 Дисбаланс роторов	296
12.4 Устойчивость работы роторной группы (осевые компрессоры, турбины, нагнетатели)	299
12.4.1 Причины появления неустойчивости течения газового потока	301
12.5 Неисправности камер сгорания, топливных форсунок и методы их обнаружения	313
12.6 Анализ характерных неисправностей лопаток газовых турбин, осевых компрессоров и нагнетателей	323
12.6.1 Особенности работы газовых турбин	323
12.7 Виды колебаний лопаток	342
12.8 Повреждения бесконтактных уплотнений	345

12.9	Неисправности газоохладителей	346
12.10	Повреждения дисков компрессоров и турбин	347
12.11	Повреждение силовых корпусов авиационных конвертированных двигателей	351
12.12	Неисправности системы запуска газотурбинного привода	352

13. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТА ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ

		355
13.1	Колебательные процессы как информационная база данных оценки технического состояния объекта ..	355
13.2	Колебания механических систем, фиксируемые приборами–анализаторами спектра вибрации	358
13.2.1	Случайные колебания механических систем	358
13.2.2	Методы анализа вынужденных колебаний	364
13.2.3	Общие принципы анализа вибрации как основа программ приборов–анализаторов спектров	367
13.2.4	Выделение спектральных составляющих вибрации	371
13.3	Модулированные случайные процессы	373
13.3.1	Колебательные движения «квазилинейной» системы	373
13.3.2	Колебательное движение нелинейной консервативной системы	374
13.4	Резонансные колебания системы	376
13.5	Стохастические модели нелинейных колебательных процессов	380
13.5.1	Задачи идентификации объекта диагностики	380
13.5.2	Эргодичность случайного процесса	383
13.5.3	Понятие стационарности случайных процессов	384
13.5.4	Локальные методы решения нелинейных задач статистической динамики	387
13.5.4.1	Метод малого параметра	387
13.5.4.2	Исследование флуктуационных процессов системы	390
13.6	Исследование спектра вибрации методом «слабых резонансов»	393

13.6.1	Общие положения	393
13.6.2	Применение уравнения «слабых резонансов» для анализа спектра вибрации	401
13.7	Крутильные колебания круглого стержня	406
13.8	Основные параметры записи информативных колебаний технической системы	408
13.9	Октавные полосы	414
13.10	Анализ адекватности идентификации неисправностей .	416
13.11	Выбор формы записи колебательных процессов	418
13.12	Определение оптимального местоположения точек измерения	420
13.13	Оценка интенсивности вибраций перекачивающих агрегатов	424
13.13.1	Классификация агрегатов в зависимости от их конструктивных особенностей	425
13.13.2	Оценка вибрационного состояния агрегата	427
13.13.3	Выбор интервалов периодических проверок	431
13.14	Алгоритм диагностирования	433
14.	МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АГРЕГАТА ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ...	439
14.1	Методы анализа вибраций перекачивающих агрегатов в условиях эксплуатации	440
14.1.1	Метод определения тенденций	440
14.1.2	Метод сравнения	441
14.2	Реализация алгоритма диагностирования силовой установки по вибропараметрам	444
14.3	Программы диагностирования технического состояния газоперекачивающих агрегатов по параметрам вибрации	448
14.3.1	Программа «Подшипник»	448
14.3.2	Программа «Ротор»	458
14.3.3	Механическая часть	462
14.3.4	Программа «Центровка»	468
14.3.5	Программа «Электродвигатель»	470
14.3.6	Электрическая часть	471
14.3.7	Программа «Состояние зубчатого зацепления»	473

14.3.8	Программа «Муфта»	477
14.3.9	Программа «Корпусные конструкции»	479
15.	ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ	
	ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ ПО	
	ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ	482
15.1	Анализ средств и методов работоспособности центробежного нагнетателя по термогазодинамическим параметрам	482
15.2	Формализованная модель оценки технического состояния центробежного нагнетателя по термогазодинамическим параметрам	483
15.2.1	Формы представления анализируемых процессов ..	483
15.2.2	Основные требования, предъявляемые к диагностическим математическим моделям	485
15.2.3	Методическая структура моделирования технического состояния нагнетателя	486
15.3	Выбор критериев оценки технического состояния проточной части центробежного нагнетателя	489
15.3.1	Общие положения	489
15.3.2	Методы выбора диагностических критериев	490
15.3.3	Выбор первой группы критериев методом автомодельных функций	491
15.3.3.1	Автомодельная функция описания термогазодинамических процессов в осевом компрессоре	492
15.3.3.2	Автомодельная функция описания термогазодинамических процессов в центробежном нагнетателе	493
15.4	Неисправности, выявляемые при диагностировании по термогазодинамическим параметрам	495
15.4.1	Общие сведения	495
15.5	Определение технического состояния центробежного нагнетателя по термогазодинамическим параметрам с использованием методов математического моделирования	496
15.5.1	Сущность методов математического моделирования	496

15.5.2	Постановка задачи	497
15.5.3	Компоновка моделирующего алгоритма	498
15.6	Формирование алгоритма расчетных диагностических показателей	499
15.6.1	Расчетные диагностические показатели	499
15.6.2	Создание блока нормативно – справочной информации	503
15.6.3	Структурная схема алгоритма расчета диагностических параметров	508
15.7	Формирование основной базы данных для алгоритма диагностирования технического состояния центробежного нагнетателя	515
15.7.1	Содержание базы данных	515
15.7.2	Базовые показатели сравнения	517
15.8	Вычисление текущих отклонений диагностических параметров	518
15.9	Оценка погрешностей измерения диагностических параметров	520
15.10	Определение эталонных термогазодинамических характеристик	528
15.11	Идентификация технического состояния проточной части компрессорного агрегата	529
15.12	Требования к измерениям при проведении диагностирования по термогазодинамическим параметрам	535
15.13	Описание программы диагностирования газового тракта центробежного нагнетателя по термогазодинамическим параметрам	535
	СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	540