



Костюков В.Н., д-р техн. наук,
генеральный директор
НПЦ «Динамика»;
Науменко А.П., канд. техн. наук,
ведущий специалист
НПЦ «Динамика»

644043, г. Омск,
ул. Рабиновича, 108.
E-mail: info@dynamics.ru

УДК 621.314.222

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ И ДИАГНОСТИКИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ*

*Продолжение. Начало в № 11, 2010

Рассмотрены состояние и перспективы развития современных методов и средств мониторинга положения и диагностики поршневых компрессоров опасных непрерывных производств. Проведен обзор принципов контроля технического состояния, которые реализованы практически во всех известных системах мониторинга. Рассмотрена схема, реализованная в системе мониторинга технического состояния поршневых компрессоров в реальном времени КОМПАКС[®].

Ключевые слова: поршневые машины, поршневые компрессоры, мониторинг, диагностика, вибрация.

An article considers state and perspectives of development of modern methods and means of monitoring of the state and diagnostics of piston compressors at dangerous continuous manufactures. A survey of principles of control of the technical state which are realized in practically all famous monitoring systems was made. An article considers the system of monitoring of the technical state of piston compressors in real time КОМПАКС[®].

Key words: piston machines, piston compressors, monitoring, diagnostics, vibration.

7. Практика мониторинга состояния системами КОМПАКС

Для оценки эффективности применения систем мониторинга КОМПАКС целесообразно привести несколько примеров адекватной реакции различных параметров ВА-сигналов на изменение состояний различных узлов ПК (рис. 5–12).

7.1. Неисправности клапанов

Тренды вибропараметров системы мониторинга состояния ПК (рис. 5, участок 1) имеют большое количество выбросов, что свидетельствует о частом повышении уровня вибрации, являющимся следствием появления неисправностей клапанов и разрушения их деталей.

Проблема подбора клапанов для существующих технологических режимов работы ПК появляется в результате проведения модернизации установок, изменения технологических процессов. В существующих технологических условиях функционирования компрессоров могут использоваться клапаны различных производителей, однако необходимо проводить их подбор под конкретный технологический режим.

За 5 месяцев эксплуатации клапанов с заводскими регулировками было заменено

17 клапанов (рис. 5, участок 2). После ревизии, ремонта всех клапанов, их регулировки примерно за четыре месяца до окончания наблюдения уровень вибрации существенно снизился и стал ниже предупредительного. Разрушения клапанов прекратились (рис. 5, участок 3).

Тренды параметров ВА-сигналов систем real time-мониторинга, в отличие от трендов периодического контроля, эффективно отражают изменение состояния клапанов, наглядно отображают процесс возникновения и развития неисправностей, а также последствия действий персонала. На тренде (рис. 6) параметры ВА-сигнала адекватно отреагировали на изменения состояния клапанов. После их замены вибростояние пришло в норму, абсолютное значение параметра ВА-сигнала снизилось более чем в 4 раза.

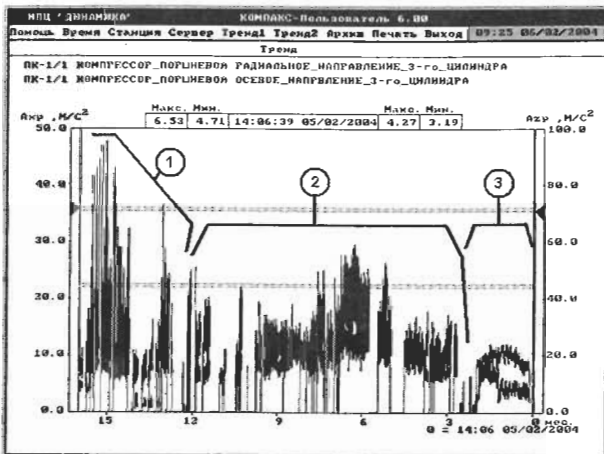


Рис. 5. Тренд вибрации клапанов

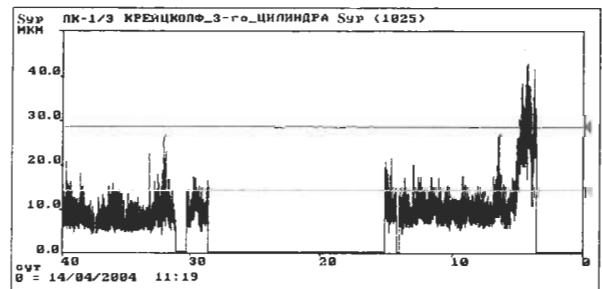


Рис. 8. Тренд вибрации крейцкопфа

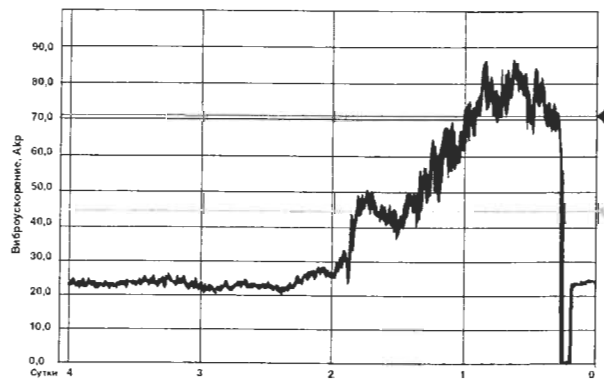


Рис. 6. Тренд вибрации клапанов

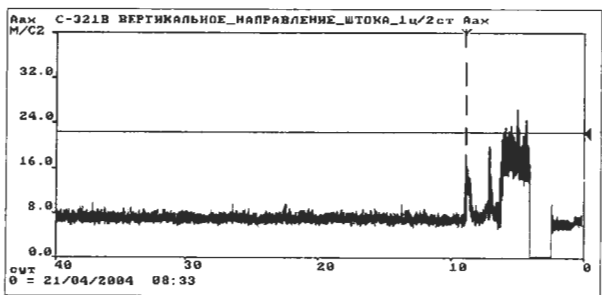


Рис. 9. Тренд вибрации штока

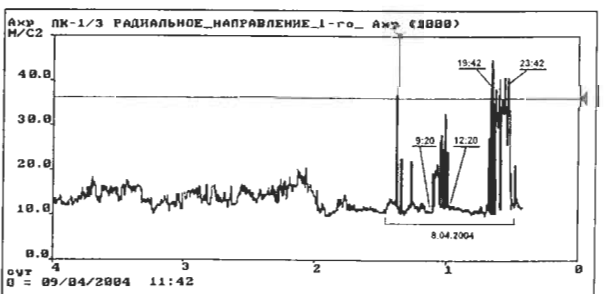


Рис. 7. Тренд вибрации цилиндра

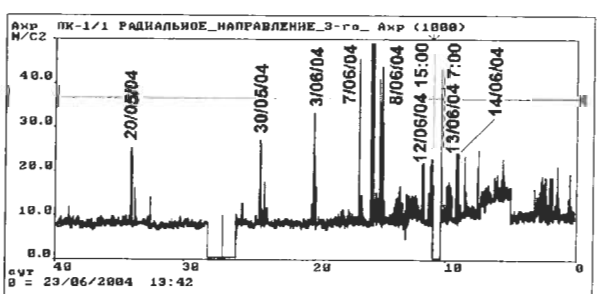


Рис. 10. Тренд при гидроударах

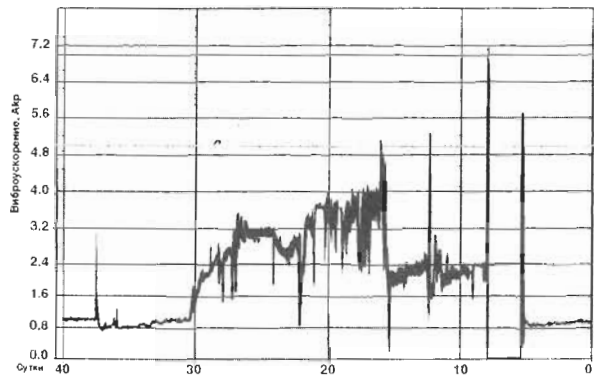


Рис. 11. Тренд вибрации подшипника

7.2. Неисправности деталей цилиндро-поршневой группы

На рис. 7 приведен классический мультимодальный тренд [9] параметра ВА-сигнала при возникновении и развитии неисправностей деталей ЦПГ. Система *real time*-мониторинга при достижении ПК состояния «**НЕДОПУСТИМО**» предупредила внезапную аварийную остановку компрессора, указав причины – неисправность деталей ЦПГ.

7.3. Неисправности деталей кривошипно-ползунного механизма

Тренд параметров ВА-сигнала на рис. 8 показывает, что система *real time*-мониторинга при достижении ПК состояния «**НЕДОПУСТИМО**» предупредила внезапную аварийную его остановку, указав причины – неисправность деталей КПМ.

По тренду параметра ВА-сигнала (рис. 9) с вибродатчика, установленного над штоком поршня, видно, что ПК был остановлен в состоянии «**ТРЕБУЕТ ПРИНЯТИЯ МЕР**» с предписанием «Проверь крепление, проверь зазоры». После проведения ремонта – заменены сальниковых уплотнений – состояние данного узла компрессора стало «**ДОПУСТИМЫМ**».

7.4. Нарушение технологического режима

Одной из основных причин отказов ПК является нарушение технологического режима компримирования. Попадание конденсата или жидкости в полости сжатия приводит к возникновению гидроударов. А это ведет к повышенным динамическим нагрузкам на узлы и детали компрессора. Повышенные динамические нагрузки приводят к преждевременным неисправностям. Тренд на рис. 10 отражает реакцию ВА-сигнала на попадание конденсата в полость сжатия. Поэтому по параметрам ВА-сигнала

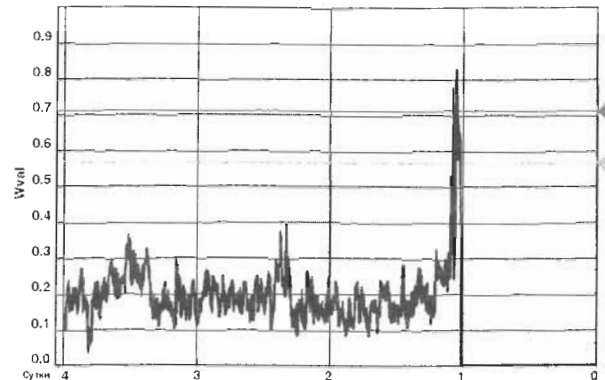


Рис. 12. Тренд спектрального инварианта

можно контролировать правильность ведения режима компримирования и предотвращать неожиданные отказы ПК.

7.5. Неисправности коренных подшипников

Мультимодальный тренд параметра ВА-сигнала на рис. 11 свидетельствует о деградации вкладышей коренного подшипника. Система *real time*-мониторинга предупреждала об изменении состояния ПК и переходе его в состояние «**ТРЕБУЕТ ПРИНЯТИЯ МЕР**». После перехода субъекта в состояние «**НЕДОПУСТИМО**» персонал своевременно провел ремонт. В момент пуска после ремонта виден процесс приработки.

7.6. Спектральная инварианта

Анализ гармонических составляющих амплитудно-частотного спектра вибрации корпуса ПМ с датчиков, установленных на крышке цилиндра, диагностируемой машины и спектрального инварианта показывает, что уровень спектрального инварианта от 0,57 до 0,87 соответствует состоянию деталей ЦПГ «**ТРЕБУЕТ ПРИНЯТИЯ МЕР**» для машин типа «4М16-22,4/23-64», «2М10-11/42-60». Превышение уровня инварианта величины 0,87 соответствует состоянию деталей ЦПГ «**НЕДОПУСТИМО**». Тренд спектрального инварианта, приведенный на рис. 12, показывает его реакцию на возникновение неисправностей деталей ЦПГ.

8. Особенности реализации систем диагностики и мониторинга

С середины 1990-х гг. до сегодняшних дней в известных, в основном зарубежных, системах диагностики и мониторинга ПК основное внимание уделяется мониторингу состояния и диагностированию следующих узлов:

- ◆ **клапаны** – работоспособность;
- ◆ **цилиндр** – изнашивание уплотнений, колец и рабочих поверхностей, ослабление крепления поршня;
- ◆ **кривошипно-ползунный механизм** (КПМ) – увеличенный зазор в подшипнике верхней головки шатуна, изнашивание опорной поверхности ползуна, изнашивание штока, ухудшение смазки;
- ◆ **кривошипно-шатунный механизм** (КШМ) – увеличенный зазор в шатунном и коренном подшипниках, ухудшение смазки;
- ◆ **корпус компрессора** – ослабление крепления, фундамента.

Для этого измеряют следующие параметры (рис. 13 а), б):

- ◆ вибрацию корпуса компрессора (Frame Vibration);
- ◆ вибрацию кривокопфного узла (Crosshead Vibration);
- ◆ положение штока (обычно – в вертикальном направлении, иногда – в горизонтальном) (Rod Drop);
- ◆ изнашивание штока (Rod Run-Out);
- ◆ вибрацию подшипников (Main Bearing Vibration);
- ◆ температуру клапанов (Valve Temperature);
- ◆ давление в полостях нагнетания (Pressure Volume Curve);
- ◆ нагрузку на шток (Rod Loading).

Одними из эффективных методов контроля технического состояния и диагностики поршневых машин (ПМ) являются измерение параметров и анализ индикаторной диаграммы [25, 26]. Однако данный метод оказывается эффективным при диагностике двигателей внутреннего сгорания и ПК, компримирующих технологически стабильные газы. Опыт эксплуатации показывает, что ПК, применяемые в производстве водорода в стабильных процессах, которые производят чистый сухой водородосодержащий или другой газ, работают более надежно. В то же время ПК, работающие в производстве водорода с нестабильными процессами или процессами, которые производят подачу водородосодержащего газа (ВСГ) «влажным» или «загрязненным» (или то и другое), имеют тенденцию к более частым возникновением неисправностей [27].

В этом случае параметры индикаторной диаграммы существенно зависят от свойств газа, характеризуют динамическую нагрузку на узлы и детали, но не в полной мере характеризуют их техническое состояние.

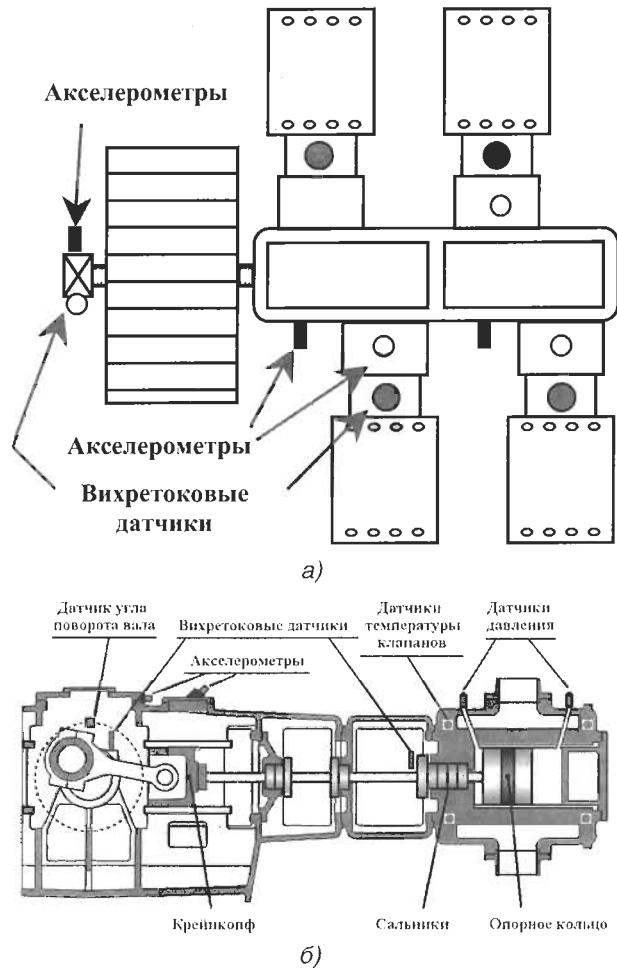


Рис. 13. Установка датчиков на корпусе ПК

Очевидно, что для ПК, работающих в таких условиях, использовать параметры индикаторной диаграммы для диагностирования и контроля изменения ТС можно лишь после обеспечения стабилизации физико-химических свойств газа путем установки сепараторов, каплеотбойников и коалесцеров [16] соответствующей производительности.

Большие объемы ремонтов клапанов ПК и определяющая стоимость их ремонта привели к разработке специальных систем контроля состояния только клапанов [28]. Однако использование подобных средств требует дополнительных затрат как на их приобретение и установку, так и затрат на приобретение и установку дополнительных средств для контроля ТС и диагностику остальных, не менее важных, узлов и деталей ПК.

Попытки создания систем диагностики ТС узлов и деталей ПК [28, 29, 30] приводят к тому, что на практике такие системы оказываются либо избыточными [29] в связи с тем, что пред-

назначены для проведения исследований и испытаний и разрабатывались для использования в лабораторных условиях, либо не обеспечивающими безопасную эксплуатацию ПК [28, 30, 31] в реальных условиях опасных производств, либо позволяющими диагностировать состояние только отдельных узлов и деталей ПК, например только клапанов [30].

Вибрация корпуса компрессора является одним из основных параметров, по которому сегодня осуществляют противоаварийную защиту ПК. Как правило, повышенный уровень вибрации корпуса свидетельствует о серьезных изменениях в техническом состоянии компрессора, ослаблении крепления, фундамента. При этом большинство систем производит измерение виброскорости [31], хотя ИСО 10816-6 рекомендует измерять три вибропараметра: виброускорение, виброскорость, виброперемещение.

Измерение вибрации крейцкопфного узла осуществляют путем установки акселерометра над ползуном крейцкопфа вертикально или под углом 45° к оси движения ползуна. Основные назначения оценки параметров вибрации: оценка изменения зазора между скользящей поверхностью ползуна и зеркалом направляющей, изменение состояния баббитового слоя, степень изнашивания баббитового слоя. Практический опыт использования измеренной вибрации показал, что в сигнале проявляется и состояние трущихся поверхностей пальца крейцкопфа и вкладышей подшипника, условия смазывания. Оценка вместо СКЗ вибрации амплитудных параметров, которые часто называют Impact Monitoring или Shock Monitoring, т.е. мониторинг пиковых значений виброускорения (Impact Factor, Impact Events) с помощью датчика ударных нагрузок [32, 33, 34], позволила определять такие дефекты и неисправности, как ослабление гайки штока, болтов, чрезмерный зазор ползуна, изнашивание пальцев и попадание жидкости в процесс сжатия [33].

Принцип измерения Impact Events:

1. Датчик регистрирует короткие ударные импульсы (пиковые значения виброускорения).
2. Подсчитывается количество импульсов, превышающих уровень срабатывания в течение заданного временного окна.
3. Временное окно настраивается в зависимости от скорости вращения коленчатого вала по формуле: $960/(\text{частота вращения, мин}^{-1})$.

4. Пороговое значение устанавливается для машин со скоростью вращения (g – ускорение свободного падения):

- около 300 мин^{-1} – $7g$;
- около 600 мин^{-1} – $12g$;
- около 1200 мин^{-1} – $16g$.

В системах PROGNOST [35] используется сегментация временной реализации виброускорения крейцкопфа. Сигнал представлен как функция угла поворота вала и разделен на 36 сегментов через 10 градусов по углу поворота. Каждый из сегментов имеет свой предупредительный уровень и анализируется индивидуально. Сегментация позволяет разделить сигнал и установить соответствие между функционированием отдельных узлов и параметрами сигнала. Необходимость сегментации связана со специфичностью вибросигнала, связанной с высокой виброактивностью отдельных узлов, например клапанов, энергия вибросигнала от работы которых в несколько раз превышает энергию от работы других узлов ПК [35, 36]. Этот метод был впервые использован в приборе ПАРК-1 [1] и развит в [2, 11, 17].

Большинство ПК, используемых на производстве нефтегазохимического комплекса, являются горизонтальными. Значительный вес КПМ и деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) приводит к существенным нагрузкам на трущиеся детали. Поэтому одной из основных задач диагностики ПК является оценка состояния опорных деталей и поверхностей. Важным узлом ЦПГ является система опорных колец (rider ring), поскольку их износ приводит к изменению положения штока, что, в свою очередь, увеличивает нагрузку на газовые сальники, износ которых неизбежно приведет к пропуску взрывопожароопасного газа. С целью оценки состояния опорных колец измеряют положение штока – вертикальное отклонение от первоначального состояния, а иногда и горизонтальное смещение, что позволяет строить орбиту движения штока. Одними из первых такое решение предложили специалисты Bently Nevada в середине 90-х гг. прошлого века, назвав его измерением положения штока – Rod Drop (буквально – «падение штока») [31, 37, 38].

Используя датчик относительной вибрации (вихретоковый датчик), можно измерить отклонения положения штока в вертикальной (Y) и горизонтальной (X) осях (рис. 14 а). Наибольшей информативностью обладают сигналы с датчиков, установленных со стороны полости

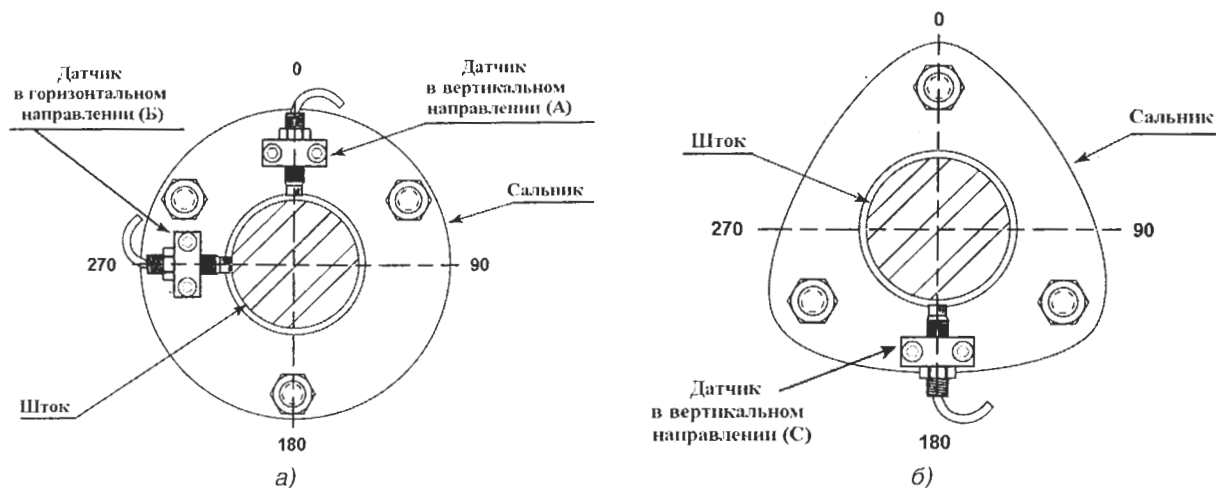


Рис. 14. Способы установки датчиков положения штока

нагнетания [38]. Однако в некоторых случаях для повышения глубины диагностирования устанавливают датчики и со стороны ползуна (рис. 14 б) [38].

Измерение положения штока (rod drop) – это процесс измерения абсолютного значения величины расстояния между поверхностью штока и датчиком в вертикальном направлении (для горизонтальных машин).

Измерение пикового значения сигнала с датчиков позволяет оценить состояние чаще всего опорных, а иногда и других колец поршня. Изменение состояния баббитового слоя кресткопфа также будет отражаться на параметрах в основном сигнала с датчика, установленного со стороны ползуна (рис. 14 б). Основным инструментом анализа сигнала является анализ орбит движения штока, что, вообще говоря, сложно поддается автоматизации. Наиболее развитые системы используют анализ амплитуды отклонения штока (абсолютное перемещение) в 36 сегментах по углу поворота вала (через каждые 10 градусов), что позволяет оценить изнашивание сопряженных поверхностей и увеличение зазора в деталях ЦПГ. Переменную составляющую сигнала анализируют в 8 сегментах – через 45 градусов угла поворота вала [35, 36], что дает возможность оценить степень повреждения колец, состояние ползуна кресткопфного узла, заброс конденсата в полость нагнетания.

Кроме того, измерение динамики (по углу поворота вала) изменения положения в вертикальной (Y) и горизонтальной (X) осях (рис. 2 а) позволяет оценить соосность ползуна кресткопфа и поршня. Этот тип измерений называют Rod Run Out или Rod Deflection [39, 40].

Вследствие особенностей сопряжения кресткопфа с головкой шатуна, тепловых расширений допуски на изменение положения штока в вертикальном направлении больше, чем в горизонтальном. Так, пиковое значение отклонения штока в вертикальном направлении обычно лежит в пределах от 90 до 150 мкм, а в горизонтальном – от 40 до 50 мкм [39].

Вихретоковые датчики устанавливают и для мониторинга состояния подшипников скольжения как самого компрессора, так и двигателя (рис. 15) [31]. Что позволяет получить орбиту движения вала и по ней оценить состояние смазочного слоя, изнашивание вкладышей. Альтернативой вихретоковым датчикам является установка акселерометров, сигнал с которых имеет достаточно информации о состоянии смазки, изнашивании вкладышей, о динамических нагрузках на КШМ [41].

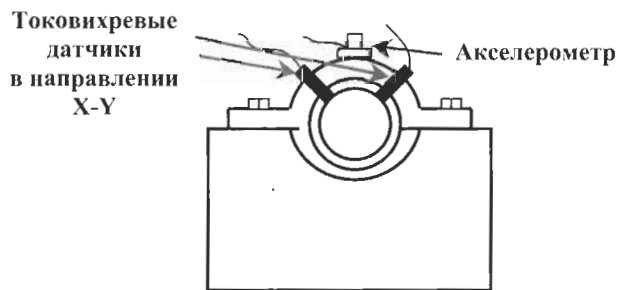


Рис. 15. Измерение вибрации подшипников

В поршневых компрессорах используются самодействующие клапаны, которые открываются при возникновении перепада давления. Когда элементы и детали клапана начинают повреждаться, то возникает пропуск газа. Это заставляет газ повторно сжиматься, что приводит

Датчики температуры



Рис. 16. Измерение температуры клапанов

к его нагреву. Различие температуры клапанов или газа в полостях сжатия и нагнетания (рис. 16) от 4 до 20 °С указывает на проблемы с клапанами.

Нагрузка на шток (Rod Loading) – это сила, которая связана с площадью поверхности поршня и давлением в цилиндре с учетом давления в обеих полостях нагнетания и сил инерции, – является важным параметром безопасной эксплуатации ПК. Кривую нагрузки штока получают путем построения изменения величины вектора суммарной силы по углу поворота вала. Для

обеспечения адекватного смазывания пальца крейцкопфа вектор нагрузки на него должен изменять направление за один оборот вала, что должно приводить к проворачиванию пальца крейцкопфа. Несбалансированная нагрузка приводит к проблемам смазки пальца крейцкопфа и его преждевременному изнашиванию. В английской литературе этот процесс имеет название Rod Reversal. Согласно API Std 618 [39] Rod Reversal (обратный ход штока): величина, измеренная в градусах оборота коленчатого вала, между каждым изменением знака кривой суммарной силы, нагружающей шток. Этот же стандарт рекомендует: «продолжительность этого обратного хода должна быть не меньше 15 градусов угла поворота коленчатого вала, а величина суммарной обратной нагрузки должна быть не менее 3% фактического суммарной нагрузки в противоположном направлении». Некоторые изготовители ПК предъявляют еще более жесткие требования.

Второй проблемой является усталостная прочность. Повышенные динамические нагрузки приводят к накоплению усталостных повреждений, сокращению ресурса штока и его деформации или преждевременному разрушению.

Таблица 4

Физические величины и их параметры, измеряемые системами мониторинга ПК

Сигнал	Параметр
Вибрация	
Крейцкопф (виброускорение)	СКЗ (36 сегментов); Impact factor
Корпус (виброскорость)	СКЗ (1 оборот вала)
Подшипник (виброускорение)	СКЗ (36 сегментов); Impact factor
Положение (вихретоковый датчик)	
Положение штока	Пик-пик (8 сегментов)
Орбита движения вала	Пик-пик (1 оборот вала)
Осевая нагрузка	Среднее
Давление в полости нагнетания	
Индикаторная диаграмма	Пик-пик (1 оборот вала)
Давление всасывания/нагнетания	Пик-пик (1 оборот вала)
Температура	
Подшипник	Среднее
Впускные клапаны	Среднее
Нагнетательные клапаны	Среднее
Сальники	Среднее
Баббит крейцкопфа	Среднее
Газ на приеме	Среднее
Газ на выкиде	Среднее

Давление в полостях нагнетания измеряют с учетом углового положения вала (рис. 13б), а силы инерции учитывают путем расчета по величине веса и скорости возвратно-поступательного и вращательного движений масс.

Таким образом, в настоящее время в большинстве случаев датчики устанавливаются в местах, указанных на рис. 13б, при этом системы измеряют сигналы и параметры, приведенные в табл. 4 [35, 42].

9. Эффективность реализации систем мониторинга и диагностики

Очевидно, что измерение прямых структурных и термодинамических (технологических) параметров, величины которых указывает производитель ПК или другие нормативные документы [39], позволяет реализовать системы, обеспечивающие противоаварийную защиту. При этом, несмотря на измерение в таких системах прямых структурных и технологических параметров и параметров вибрации отдельных узлов, весьма проблематично обеспечить определение ТС с достаточной для практики глубиной диагностирования.

Анализ измеряемых параметров и соответствующих им неисправностей (табл. 5) [35, 42] показывает, что по параметрам ВА и других сигналов, измеряемым этими системами, нельзя однозначно выявить возникновение конкретной неисправности или дефекта. Любой из измеряемых параметров сигналов может свидетельствовать о возникновении сразу нескольких неисправностей или дефектов в различных узлах машины. Поэтому уточнение диагноза приходится производить в процессе ремонта машины. В связи с этим такие системы можно использовать только для оценки общего ТС машины с рекомендациями общего вида: «Проверь состояние того или иного узла» без указания конкретной неисправности или дефекта.

Вместе с тем для определения 12 отклонений состояния ПК от своих номинальных значений и изменения технологического режима предполагается установка на один цилиндр не менее 12 датчиков различных физических величин (рис. 13, табл. 5). Таким образом, для определения технического состояния четырехцилиндрового ПК потребуется не менее 36 датчиков.

В заключение целесообразно привести несколько примеров реализации систем мониторинга ПК, разработанных и предлагаемых наиболее известными компаниями.

Компании Bruel & Kjer Vibro (Дания) и Tomassen Compression Systems (Нидерланды) разработали систему мониторинга ПК на основе известной системы COMPASS [36].

COMPASS 3560 – система мониторинга машинного оборудования типа 3560 – применяется для контроля состояния промышленного оборудования, совершающего вращательные и возвратно-поступательные движения. Система может быть использована в научных исследованиях, промышленности, энергетике для детального анализа состояния машин и механизмов, диагностики ответственных частей оборудования при различных режимах их функционирования (запуск, остановка, рабочий режим при различных нагрузках).

Система мониторинга машинного оборудования типа 3560 – это классическая параллельная система, которая представляет собой модульную конструкцию, интегрированную в единую систему. Основой системы является монитор механических колебаний 2520, включающий модули различного назначения, обеспечивающий непосредственно измерения различных параметров вибрации, вращательных движений и т.д. Монитор механических колебаний 2520 объединен с центральной рабочей станцией (компьютером) и дополнительными терминалами при помощи интерфейса сети Ethernet TCP/IP.

Имеется возможность измерения параметров вибраций при помощи переносного сборщика данных 2526 с последующим переносом результатов измерений в память рабочей станции (компьютер).

Монитор механических колебаний 2520 включает:

а) измерительные модули, которые позволяют измерять параметры вибрации (ускорение, скорость, перемещение, частоту вращения и т.д.) и осуществляющие аналогово-цифровые преобразования сигналов первичных измерительных преобразователей (например, пьезоэлектрических акселерометров), установленных в различных частях контролируемого механизма;

б) вспомогательные модули: генератора напряжения различной формы, модули выборки, памяти, интерфейсные модули;

в) вычислительные модули, осуществляющие обработку результатов измерения, вычисления спектральных характеристик контролируемых процессов, управление и контроль монитора механических колебаний 2520 в целом.

Таблица 5

Дефекты и неисправности, определяемые системами мониторинга ПК [35, 36]

Неисправность	
Механическая разболтанность (поршень, вкладыш, шток)	+ + + + + +
Заброс жидкости (конденсата)	+ + + +
Чрезмерный зазор в направляющем башмаке крестковца	+ + + +
Чрезмерный зазор втулки/пальца крестковца	+ + + +
Утечки сальников, заклинивание штока	+ + + +
Износ опорных колец	+ + + +
Утечки газа через поршневые кольца	+ + + +
Неисправности нагнетательных клапанов	+ + + + + +
Неисправности всасывающих клапанов	+ + + + + +
Проблемы с нагрузкой штока (включая обратный ход, чрезмерную погрузку и т.д.)	+ + + + + +
Чрезмерная температура коренных подшипников (ухудшение смазки)	+ + + + + +
Чрезмерная вибрация картера и цилиндра	+ + + + + +
Решение для управления	+ + + + + + + + + + + +
Решение для предохранения	+ + + + + + + + + + + +
Требования API-618 (4-ая ре.)	+ + + + + + + + + + + +
Измеряемый параметр	
Вибрация корпуса	
Температура коренных подшипников	
Крестковец (ускорение)	
Угол поворота вала	
Давление в цилиндре	
Комбинированная нагрузка на шток	
Положение штока со стороны поршня	
Температура впускных клапанов	
Температура нагнетательных клапанов	
Температура сальников	
Температура баббита крестковца	
Температура газа на приеме	
Температура газа на выкиде	
Impact factor крестковец	
Impact factor подшипники	

Вычислительные модули позволяют определить спектры входных сигналов на основе быстрого преобразования Фурье, проводить фильтрацию, усреднение, вычислять вероятностные характеристики.

После обработки результаты измерений поступают из монитора механических колебаний 2520 в рабочую станцию (компьютер), где реализованы алгоритмы прогнозирования состояния машин и оборудования, предсказания и выявления дефектов, хранения данных, слежения за тенденциями изменения параметров вибрационных процессов, общего управления и контроля работы системы в целом. Сюда же переносятся данные, собранные с помощью устройства 2526. Система реализует принцип настройки под требования заказчика. Таким образом, алгоритмы принятия решений и обработки сигналов могут быть построены пользователем по своему усмотрению. Число каналов может достигать 112.

Компания Bently Nevada (США) предлагает использовать параллельную систему на базе 3500 Series platform с использованием модулей 3500/70M для измерения Impact Events, виброускорения в шести сегментах по углу поворота вала, виброскорости (модули 3500/42M), угла поворота вала (модули 3500/77M). Стандартные модули системы позволяют проводить измерение положения штока с помощью вихретокового датчика (модули 3500/72M), давления в полостях нагнетания (модули 3500/77M), температуры клапанов и других узлов (модули 3500/60 или 3500/61) [34, 38, 37, 40, 42].

Компания Prognost Systems GmbH (Германия, США) (ранее называлась KOTTER PROGNOST Systems GmbH) разработала систему мониторинга ПК под названием Prognost-NT, Prognost-SILver [35], которые построены по классической параллельной схеме в блочно-модульном исполнении. Измеряемые параметры приведены в табл. 1 за исключением измерения Impact Factor или Impact Events.

Система построена на шасси 19" и может обслуживать до 8 компрессоров одновременно с подключением до 68 взрывозащищенных измерительных каналов к одному измерительному устройству. Измерительное устройство имеет 17 четырехканальных модулей аналогового ввода (модули A1x предназначены для приема и оцифровки аналоговых сигналов). Модули аналогового ввода доступны в модификациях для пяти типов датчиков:

- ◆ ИСР акселерометры (крейцкопф, цилиндр, подшипники, корпус), велосиметры (корпус, подшипники, трубопровод);

- ◆ токовые сигналы 4–20 мА от любых датчиков, давление (индикаторная диаграмма, на всасе, нагнетании и т.д.), температура (подшипники, газ, клапаны и т.д.);

- ◆ токовыхревые датчики (положение штока, коленчатый вал, аксиальное смещение);

- ◆ датчики с выходом по напряжению (± 10 , ± 5 , ± 2 , ± 1 В);

- ◆ фазовые отметчики (сигналы NAMUR).

Все аналоговые сигналы от измерительных модулей конвертируются в цифровой вид и поступают по внутренней шине на модуль MP (Machine Protection), который индуцирует состояния с помощью светодиодов и осуществляет выполнение алгоритмов противоаварийной защиты путем трансляции данных в контроллер системы Safety Controller (SC1). Последний передает данные либо в систему управления (DCS), либо в систему противоаварийной защиты (ESD).

При возникновении аварийных ситуаций вырабатываются тревожные сигналы, которые транслируются на релейный модуль, подключенный с помощью релейных выходов к системе управления производственным процессом, или системе распределенного управления (DCS), или к устройству аварийного останова машины (ESD). Модуль для двунаправленной связи между PROGNOST® и DCS назван модулем интеграции данных процесса и анализа. Этот модуль обеспечивает связь системы PROGNOST® со всеми обычными системами управления. Питание системы (24 В) осуществляется от двух независимых источников.

Для размещения системы во взрывоопасной зоне непосредственно в машинном зале существует модификация системы во взрывонепроницаемой оболочке типа Ex d.

Для обмена данными с системами верхнего уровня имеется модуль передачи данных с портом Ethernet (ES1).

Практически аналогичную систему предлагает и компания SKF (США) [43] под названием Complex System Hardware – Prognost с частичным использованием собственных измерительных модулей и датчиков на основе VM600 Machinery Protection System.

Классическая параллельная система HOERBIGER Holding AG (Zug, Switzerland) [28, 44, 45, 46, 47] имеет ряд подсистем, которые могут использоваться отдельно или совместно:

- **RecipCOM** – система мониторинга ПК путем анализа положения штока и нагрузки

на него, вибрации крейцкопфа, температуры клапанов, анализа индикаторной диаграммы, измерения температуры и давления в системе смазки, измерения температуры подшипников, температуры подшипников привода;

– **HydroCOM** – система регулирования производительности ПК путем регулирования параметров клапанов и их защиты;

– **SafeCOM** – система защиты ПК путем измерения температуры клапанов, вибрации корпуса, положения штока;

– **ValCOM** – система защиты клапанов путем измерения их температуры и анализа индикаторной диаграммы.

Компания Metrix Instrument Co. (США, Houston, Texas) разработала и предлагает систему мониторинга «здоровья» машин, включая ПК. Эта система мониторинга параметров имеет параллельную архитектуру и аналогична системам серий 3300, 7200, and 3000 компании Bentley Nevada.

Анализ архитектур и принципов функционирования рассмотренных систем говорит о том, что:

1) системы являются системами мониторинга параметров, а не диагностики и мониторинга технического состояния (см. определение понятия «мониторинг» в [1]);

2) все системы имеют параллельную архитектуру, что приводит к неоправданным и необоснованным затратам и повышению стоимости систем;

3) параметры ВА-сигнала используются для оценки общего ТС узлов ПК и свидетельствуют о возникновении достаточно обобщенных классов неисправностей и дефектов;

4) в системах измеряется ряд термодинамических, включая измерение параметров индикаторной диаграммы, и прямых структурных параметров.

10. Заключение

В качестве резюме изложенного выше можно констатировать:

1. Практически во всех известных системах мониторинга и диагностики:

– методология определения технического состояния узлов и деталей ПК опирается в основном на измерение прямых структурных и термодинамических (технологических) параметров (относительные смещения, давление, температура) и реализует on-line-технологии;

– технология on-line-мониторинга обеспечивает достаточно высокую величину статиче-

ской и динамической ошибок распознавания состояния оборудования [1], поэтому подобные системы можно использовать только для мониторинга состояния оборудования опасных производственных объектов второй, третьей и более низких категорий опасности [1];

– экспертные системы используют величины прямых структурных и термодинамических (технологических) параметров;

– параметры косвенных процессов (виброакустических колебаний) используются для оценки величины этих параметров без проведения диагностирования и причин возникновения неисправностей и дефектов;

– методология мониторинга строится на принципе: один датчик – один параметр – один класс дефектов или неисправностей.

2. В системе real-time-мониторинга КОМПАКС®:

– методология real-time-мониторинга и диагностирования основана на измерении параметров косвенных процессов (ВА-колебаний). С целью расширения возможностей системы предусмотрено измерение прямых структурных и термодинамических параметров;

– реализованы алгоритмы экспертной системы поддержки принятия решений с автоматическим определением (в темпе измерения диагностических сигналов) более 20 неисправностей узлов и дефектов и степени их опасности;

– реализованы требования, предъявляемые к системам мониторинга состояния оборудования опасных производственных объектов [1];

– научно обоснованный период постановки диагноза [9] позволяет получить величину статической и динамической ошибок распознавания состояния оборудования менее 5%, что дает возможность осуществлять мониторинг состояния оборудования первой категории опасности [1];

– разработанная и реализованная методология мониторинга и диагностирования поршневых компрессоров позволила обеспечить в системе КОМПАКС® использование всего пяти акселерометров на один цилиндр вместо 12 разнообразных датчиков физических величин в известных системах, при этом количество определяемых дефектов и неисправностей вдвое превышает количество дефектов и неисправностей, определяемых известными системами;

– по параметрам сигнала с одного датчика определяется до 5 дефектов и неисправностей.

Библиографический список

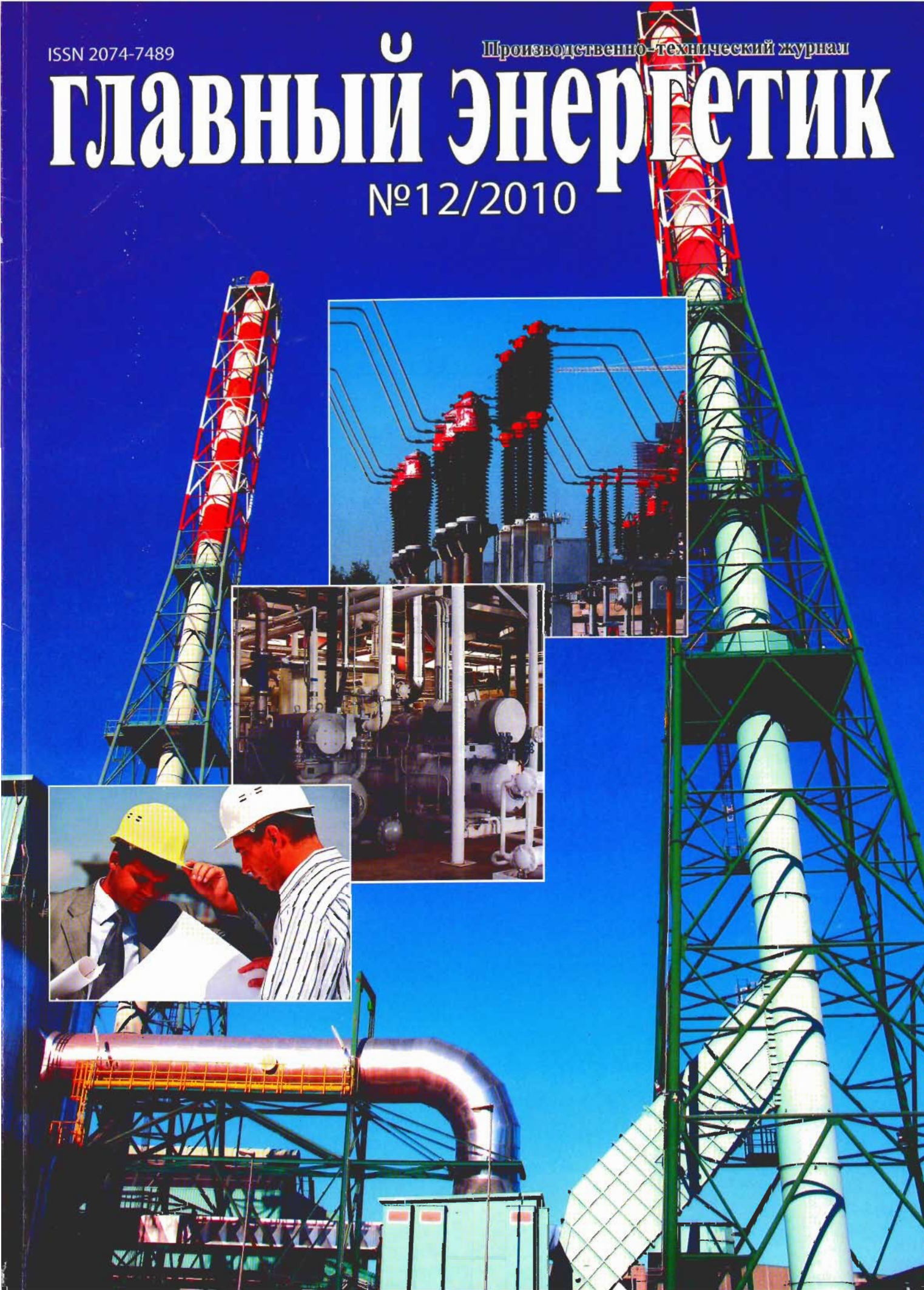
25. **Науменко А.П.** О спектральном представлении индикаторной диаграммы: Тез. докл. науч.-техн. семинара стран СНГ «Диагностика, повышение эффективности, экономичности и долговечности двигателей». – С-Пб., 1992. – С. 9.
26. Alberto Guilherme Fagundes Schirmer, Nelmo Furtado Fernandes, Jose Eduardo De Caux Online Monitoring of Reciprocating Compressors / NPRA Maintenance Conference May 25-28th 2004. San Antonio, 2004.
27. Leonard S.M. Increasing the reliability of reciprocating compressors on hydrogen services / National Petroleum refiners association Maintenance Conference. New Orleans. LA. 1997.
28. **Франчик С.** Система мониторинга и анализа работы клапанов поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. – 2005. – № 5. – С. 4–6.
29. Автоматизированная система измерений, накопления и обработки данных при испытаниях поршневых компрессоров / П.И. Пластинин, Т.С. Дегтярева, В.А. Светлов, А.В. Сячинов // Компрессорная техника и пневматика. – 1997. – № 3–4 (16–17). – С. 12–14.
30. **Рябцев А.Н.** Решения фирмы «Хербигер» для поршневых компрессоров при производстве сжатых газов // Компрессорная техника и пневматика. – 2002. – № 7. – С. 16–18.
31. Reciprocating Compressors. Field Application Note. Reliability Direct, Inc. Url: <http://www.reliabilitydirect.com/appnotes/ recipapp.html> (дата обращения 14.01.2009).
32. Applications: Reciprocating Compressors. Metrix Instrument Co. Houston. Texas. Url: <http://www.metrix1.com/Applications/Reciprocating Compressors.aspx> (дата обращения 15.01.2009).
33. Impact Monitoring Application Note / «Metrix Instrument Co». – Houston, Texas // <http://www.metrix1.com/docs/Impact Monitoring App Note.pdf> (дата обращения 15.01.2009).
34. **Ingrid M., Saarem P.E.** OK Limits for Impact Events // USA: GE En-ergy, Orbit, Vol. 25. – № 2. – 2005. – Pp. 32–33.
35. Asset Performance Management for Reciprocating Compressors and Pumps // PROGNOST Systems GmbH, 2008. – 28 p.
36. **Hastings M., Schrijver J.** Метод эффективного мониторинга работы поршневых компрессоров в установках для производства сжиженного природного газа // LNGjournal. September. – 2007. – 5 с.
37. **Barnes M.** Using a Rod Drop Monitor to prevent cylinder and pis-ton/rod repair // USA: Bently Nevada Corporation. Orbit. 1999. 1st Quarter. – Pp. 11–12.
38. **Howard B.** How Piston Rod Vibration Signaled a Reciprocating Compressor Problem // USA: Bently Nevada Corporation. Orbit. – 2001. 3st Quarter. – Pp.11–17.
39. API Standard 618. Fifth Edition (2007). Reciprocating Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services. // American Petroleum Institute. Washington. D.C.
40. **Howard B.** Rod Load Calculations and Definitions for Reciprocating Compressor Monitoring. GE Energy. ORBIT. – 2008. – Vol. 28. – № 1. – P. 28–31.
41. Reciprocating Compressors. STI Field Application Note // <http://www.stiweb.com/appnotes/ recipapp.htm> – 14.01.2009.
42. Condition Monitoring Solutions for Reciprocating Compressors // GEA-14927 rev. NC (08/07). General Electric Company. – 2007. – 12 p.
43. On-Line Reciprocating Compressor Monitoring Instrumentation // Technical Application Note. DM3021-EN. SKF. – 2002. – 8 p.
44. HydroCOM: High energy savings and excellent controllability // Technical Application Note: AKT2CON001BE200802. Switzerland. HOERBIGER. – 2008. – 8 p.
45. RecipCOM – The new generation: Diagnostics, protection and therapy for your reciprocating compressor // Technical Application Note: AKT2MON002-BE200906. Switzerland. HOERBIGER. – 2009. – 8 p.
46. SafeCOM – Protection and safeguarding of reciprocating compressors // Technical Application Note: AKT2MON003BE200703. Switzerland. HOERBIGER. – 2007. – 2 p.
47. ValCOM: The energy-saving system for use with PET compressors // Technical Application Note: AKT2CON003BE200811. Switzerland. HOERBIGER. – 2008. – 4 p.
48. **Гриб В.В., Жуков Р.В.** Анализ виброакустических характеристик поршневых компрессоров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2001. – № 1. – С. 40–42.
49. **Гриб В.В., Жуков Р.В.** Особенности спектральной вибродиагностики поршневых компрессорных машин // Компрессорная техника и пневматика. – 2001. – № 8. – С. 30–32.
50. **Гриб В.В., Соколова А.Г., Еранов А.П., Давыдов В.М., Жуков Р.В.** Анализ современных методов диагностирования компрессорного оборудования нефтегазохимических производств // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2002. – № 10. – С. 57–65.

ISSN 2074-7489

Производственно-технический журнал

главный энергетик

№12/2010



А.В. Гаранин, Северо-Западное управление федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору

На промышленном производстве с монотонным и напряженным характером работы стабильные параметры микроклимата повышают утомляемость персонала и отрицательно сказываются на производительности труда. Одним из методов борьбы с данной проблемой является создание динамически меняющихся параметров микроклимата (температура, влажность) в производственном помещении.

Ключевые слова: динамический микроклимат, математическая модель, температура, влажность, изменение, метод итераций, промышленное здание, тепловой баланс.

Факторы, влияющие на продолжительность работы компрессоров	37
ДИАГНОСТИКА	40
УДК 534.647:621.432 (001.8)	
Современные средства мониторинга состояния и диагностики поршневых компрессоров	40
<i>В.Н. Костюков, А.П. Науменко, НПЦ «Динамика»</i>	

Рассмотрены состояние и перспективы развития современных методов и средств мониторинга положения и диагностики поршневых компрессоров опасных непрерывных производств. Проведен обзор принципов контроля технического состояния, которые реализованы практически во всех известных системах мониторинга. Рассмотрена схема, реализованная в системе мониторинга технического состояния поршневых компрессоров в реальном времени КОМПАКС®.

Ключевые слова: поршневые машины, поршневые компрессоры, мониторинг, диагностика, вибрация.

Виброакустическая диагностика технического состояния энергетического оборудования	52
АЛЬТЕРНАТИВНАЯ ЭНЕРГЕТИКА	55
УДК 550.361:621.4	
Перспективы развития геотермальной энергетики	55
<i>Г.Ф. Быстрицкий, В.С. Боков, МЭИ</i>	

Ученые полагают, что в последующие несколько десятков лет масштабы использования геотермальной энергетики возрастут. Существующие современные технологии – ГеоЭС, ГеоЭС с бинарным циклом, тепловые насосы – позволяют получить максимальный эффект от геотермального теплоносителя. Создание локальных систем тепло- и электроснабжения на основе геотермальных ресурсов позволяет в короткие сроки решить проблему энергообеспечения многих гражданских и промышленных объектов.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, геотермальная энергетика, петрогеотермальные ресурсы.

СОБЫТИЯ	61
Соревнования высокого напряжения	61
СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА «ГЛАВНЫЙ ЭНЕРГЕТИК» ЗА 2010 г.	65