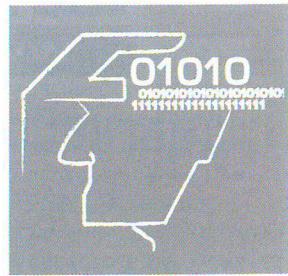


## The Analysis of Modern Methods and Tools for Condition Monitoring and Diagnostics of Reciprocating Compressors. Pt. 1. On-line Monitoring Systems

V. N. Kostyukov, A. P. Naumenko

A state and prospects of development of the modern methods and tools of condition monitoring and diagnostics of reciprocating compressors of dangerous process productions are viewed. The review of the inspection principles used practically in all known monitoring systems of a technical condition is carried out. Means of monitoring systems are considered.



# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ. ЧАСТЬ 1. СИСТЕМЫ ON-LINE МОНИТОРИНГА

## Введение

Безопасность эксплуатации установок с поршневыми компрессорами (ПК) на взрыво- и пожароопасных производствах нефтегазохимического комплекса определяется надежностью контроля их технического состояния (ТС), достоверностью и своевременностью выявления неисправностей и причин их вызывающих. Сегодня для мониторинга и диагностики ПК предлагаются многочисленные технические средства, разработанные и выпускаемые, в основном, зарубежными компаниями. Однако остается открытым вопрос об адекватности проводи-

мых измерений реальному техническому состоянию ПК и величине риска их безопасной эксплуатации. Хотя сегодня существует документ [1], определяющий основные требования к системам мониторинга опасных производственных объектов, тем не менее, даже специалистам в этой области весьма затруднительно ориентироваться в рекламируемых возможностях систем. В связи с этим возникает актуальная потребность в систематизации методов и средств диагностирования и мониторинга состояния ПК, тем более, что в последнее время появился ряд стандартов в области мониторинга [1–5].

Вначале определимся с некоторыми терминами [1, 2, 5].

**Мониторинг параметров:** наблюдение за какими-либо параметрами (вибраций, температурой и т. д.). Результат мониторинга параметров представляет собой совокупность измеренных значений параметров, получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых значения параметров существенно не изменяются.

**Мониторинг технического состояния объекта (мониторинг объекта):** наблюдение за техническим состоянием объекта (агрегата, конструкции, машины, узла, механизма, технического устройства) для определения и прогнозирования момента перехода в предельное состояние. Результат мониторинга объекта представляет собой совокупность диагнозов составляющих его субъектов, получаемых на неразрывно примыкающих друг к

другу интервалах времени, в течение которых состояние агрегата существенно не изменяется. Принципиальным отличием мониторинга состояния от мониторинга параметров является наличие интерпретатора измеренных параметров в терминах технического состояния (экспертной системы поддержки принятия решения о состоянии объекта и дальнейшем управлении). Мониторинг технического состояния представляет собой диагностику, развернутую во времени.

**Мониторинг технического состояния комплекса объектов (мониторинг производственного комплекса):** наблюдение за техническим состоянием комплекса, входящих в него объектов и их субъектов для определения и предсказания момента перехода в предельное состояние. Результат мониторинга производственного комплекса представляет собой совокупность диагнозов составляющих его объектов, получаемых на неразрывно примыкающих друг к другу интервалах времени, в течение которых состояние комплекса существенно не изменяется [1, 2, 5].

**Техническое диагностирование (диагностирование) объекта:** определение технического состояния объекта, включающее диагнозы наиболее важных субъектов его составляющих и определяющих полноту диагностирования объекта [1, 2, 5].

**Технический диагноз (диагноз):** результат диагностирования, привязанный к определенному моменту времени [1, 2, 5].



Сотрудники НПЦ «Динамика», г. Омск:

### Костюков Владимир Николаевич

Генеральный директор, д. т. н., профессор. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники.

### Науменко Александр Петрович

Начальник учебного центра и лаборатории НК, к. т. н., Эксперт пром. безопасности, III уровень по вибрационному виду НК.

Система комплексного мониторинга состояния оборудования: система (машина), продуктом которой является текущая информация о техническом состоянии оборудования и его опасности с необходимыми комментариями (прогноз остаточного ресурса, предписания на неотложные действия персонала и т. д.) и заданным риском [1, 2, 5].

Исследования в области диагностики ПК проводились в МГТУ им. Н. Э. Баумана (П. И. Пластинин), НПЦ «Динамика» (В. Н. Костюков), МАДИ (ТУ) (В. В. Гриб), ОАО «ЛенНИИХимМаш», ООО «ВНИИГаз», ИМАШ РАН (А. Г. Соколова, Ф. Я. Балицкий), ООО «Вибро-Центр», Ленинградском и Одесском институтах холодильной промышленности, Пензенском политехническом институте, НПП «Механик» (Р. В. Жуков), специалистами Bently Nevada, Dresser-Rand, Hoerbiger Ventilwerke GmbH, KÖTTER Consulting Engineers, Prognost Systems GmbH, Metrix Instrument Co, Brüel & Kjær Vibro, Tomassen Compression Systems и другими организациями.

Сотрудники НПЦ «Динамика» начали заниматься разработкой методов и приборов вибраакустической диагностики машин, механизмов и процессов в 1972 г., когда был создан и внедрен на испытательном стенде в серийном производстве прибор диагностики поршневых компрессоров «ПАРК-1». В этом приборе были реализованы методы диагностики дефектов компрессора по циклограмме его работы со стохастическим усреднением результатов в различных частотных полосах. Прибор позволял диагностировать такие производственные дефекты компрессоров, как повышенный вылет поршня, дефекты всасывающего и нагнетательного клапанов, эксцентрикситет ротора в статоре и др. Он использовался на станции обкатки и испытаний компрессоров DX2-1010 в серийном про-

изводстве, обеспечивающем выпуск до одного миллиона компрессоров в год. В качестве датчиков применялись пьезоэлектрические акселерометры ИС-318, а впоследствии – ИС-312, ИС-313 как имеющие более широкий частотный диапазон.

Результатом полученного опыта разработки и эксплуатации прибора «ПАРК-1» стало формирование методологии диагностирования поршневых машин [6–12], получившей свое развитие в 1990-х гг.

### Особенности реализации систем диагностики и мониторинга

С серединой 1990-х гг. до настоящего времени в системах диагностики и мониторинга ПК основное внимание уделяется мониторингу состояния и диагностированию следующих узлов [13–15]:

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

Для этого измеряют следующие параметры (рис. 1):

- вибрацию корпуса компрессора («Frame Vibration»);
- вибрацию крейцкопфного 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»).

Одним из эффективных методов контроля технического состояния и диагностики поршневых машин является измерение параметров и анализ индикаторной диаграммы [16, 17]. Однако этот метод оказывается эффективным при диагностике двигателей внутреннего сгорания и ПК, компримирующих технологически стабильные газы, изменение параметров индикаторной диаграммы которых может быть следствием изменения технического состояния. Опыт эксплуатации показывает, что ПК, применяемые в производстве водорода в стабильных процессах, которые производят чистый сухой водородсодержащий или другой газ, работают более надежно. В то же время ПК, работающие в производстве водорода с нестабильными процессами или процессами, которые производят посадку водородсодержащего газа «влажным» или «загрязненным» (или то и другое), имеют тенденцию к более частым возникновениям неисправностей [18].

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.

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 коалесцев [16] соответствующей производительности.

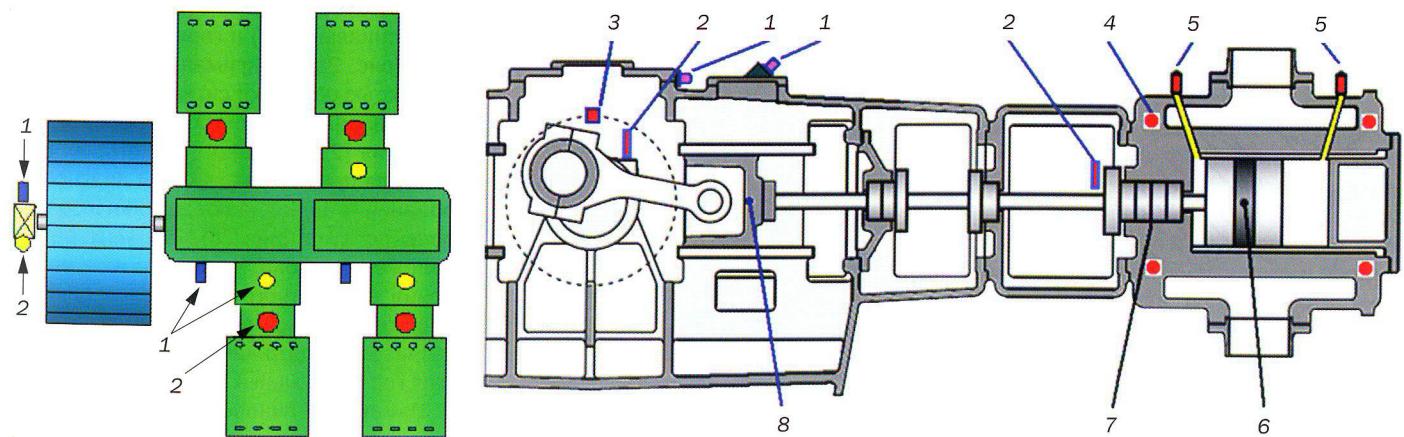


Рис. 1. Установка датчиков на корпусе ПК: 1 – акселерометры; 2 – вихревые датчики; 3 – датчик угла поворота вала; 4 – датчики температуры клапанов; 5 – датчики давления; 6 – опорное кольцо; 7 – сальники; 8 – крейцкопф

Большие объемы ремонтов клапанов ПК и определяющая стоимость их ремонта привели к разработке специальных систем контроля состояния только клапанов [20]. Однако использование подобных средств требует дополнительных затрат как на их приобретение и установку, так и на приобретение и установку дополнительных средств для контроля ТС и диагностики остальных, не менее важных, узлов и деталей ПК.

Попытки создания систем диагностики ТС узлов и деталей ПК [20–22] приводят к тому, что на практике такие системы оказываются либо избыточными [21] в связи с тем, что предназначены для проведения исследований и испытаний и разрабатывались для использования в лабораторных условиях, либо не обеспечивающими безопасную эксплуатацию ПК [13, 20, 22] в реальных условиях опасных производств, либо позволяющими диагностировать состояние только отдельных узлов и деталей ПК, например, только клапанов [22].

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 [13], хотя ИСО 10816-6 рекомендует измерять три вибропараметра: виброускорение, виброскорость, виброперемещение; при этом в известных системах практически не проводится анализ характеристик вибропараметров с целью выявления причин их изменения.

Измерение вибрации крейцкопфного узла осуществляют путем установки акселерометра над ползуном крейцкопфа вертикально или под углом 45° к оси дви-

жения ползуна. Основное назначение оценки параметров вибрации – оценка изменения зазора между скользящей поверхностью ползуна и зеркалом направляющей, изменение состояния и 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 амплитудных параметров вибрации, которые часто называют «*Impact Monitoring*» или «*Shock Monitoring*», т. е. мониторинг пиковых значений виброускорения («*Impact Factor*», «*Impact Events*») с помощью датчика ударных нагрузок [23, 24], позволила поставить в соответствие изменение этого параметра такому классу дефектов и неисправностей, как ослабление гайки штока, ослабление болтов, чрезмерный зазор ползуна, изнашивание пальцев и попадание жидкости в процесс сжатия [23].

#### Принцип измерения «*Impact Events*»:

- датчик регистрирует короткие ударные импульсы (пиковые значения виброускорения);
- подсчитывается количество импульсов, превышающих уровень срабатывания в течение заданного временного окна;
- временное окно настраивается в зависимости от скорости вращения коленчатого вала по формуле:  $960/(частота\ вращения,\ мин^{-1})$ ;
- 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 [14] используется сегментация временной реализации виброускорения крейцкопфа. Сигнал

представлен как функция угла поворота вала и разделен на 36 сегментов через  $10^\circ$  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 вибrosигнала, обусловленной высокой виброактивностью отдельных узлов, например, клапанов, энергия сигнала от работы которых в несколько раз превышает энергию от работы других узлов ПК [14]. Этот метод был впервые использован в приборе «ПАРК-1» и развит в [10].

Большинство ПК, используемых на производствах нефтегазохимического комплекса, являются горизонтальными. Значительный вес кривошипно-ползунного механизма и деталей приводит к существенным нагрузкам на трущиеся детали. Поэтому одной из основных задач диагностики ПК является оценка состояния опорных деталей и поверхностей. Важным узлом цилиндропоршневой группы 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 1990-х гг., назвав его измерением положения штока – «*Rod Drop*» (буквально – «падение штока») [13, 25, 26].

Используя датчик относительной вибрации (вихревой датчик), можно измерить отклонения положения штока в вертикальной (Y) и горизонтальной (X) осях (рис. 2а). Максимальной информативностью обладают сигналы с датчиков, установленных со стороны полости нагнетания [26]. Однако в некоторых случаях для повышения глубины диагностирования устанавливают датчики и со стороны ползуна (рис. 2б) [26]. Измерение положения штока – 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

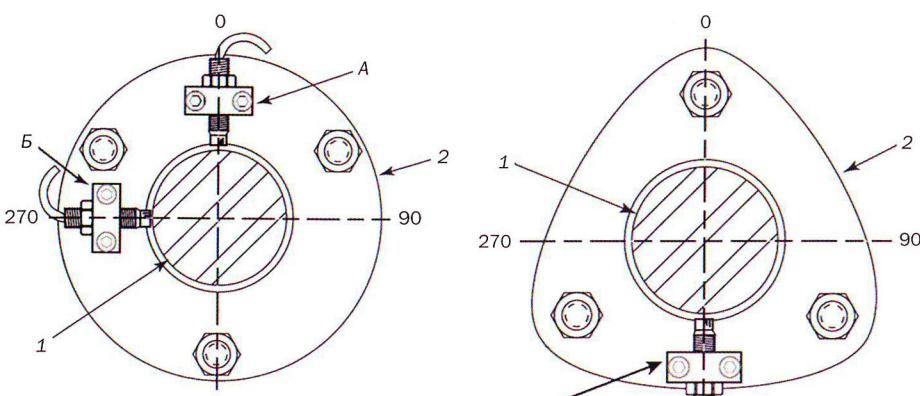


Рис. 2. Способы установки датчиков положения штока в вертикальном (A, C) и горизонтальном направлениях (B): 1 – шток, 2 – сальник

баббитового слоя крейцкопфа также будет отражаться на параметрах, в основном, сигнала с датчика, установленного со стороны ползуна (рис. 2б). 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°), что позволяет оценить изнашивание сопряженных поверхностей и увеличение зазора в деталях цилиндропоршневой группы. Переменную составляющую сигнала анализируют в 8 сегментах – через 45° угла поворота вала [14], что дает возможность оценить степень повреждения колец, состояние ползуна крейцкопфного 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) позволяет оценить соосность ползуна крейцкопфа и поршня. Этот тип измерений называют «Rod Run Out» или «Rod Deflection» [27, 28].

Вследствие особенностей сопряжения крейцкопфа 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 [27].

Вихревые датчики устанавливают и для мониторинга состояния подшипников скольжения как самого компрессора, так и двигателя (рис. 3) [13]. Что позволяет получить орбиту движения вала и по ней оценить состояние смазочного слоя, изнашивание вкладышей. Альтернативой вихревым датчикам является установка акселерометров, сигнал с которых имеет достаточно информации о состоянии смазки, изнашивании вкладышей, о

динамических нагрузках на кривошипно-шатунный механизм [13].

В ПК 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 к его нагреву. Различие температуры клапанов или газа в полостях сжатия и нагнетания (рис. 4) от 4 до 20 °C 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 [27] «Rod Reversal» (обратный ход штока) – это величина, измеренная в градусах оборота коленчатого вала между каждым изменением знака кривой суммарной силы, нагружающей шток. Этот же стандарт рекомендует, чтобы «продолжительность этого обратного хода была не меньше 15° угла поворота коленчатого вала, а величина суммарной обратной нагрузки – не менее 3 % фактической суммарной нагрузки в противоположном направлении». Некоторые изготовители ПК предъявляют еще более жесткие требования.

Необходимо заметить, что измерение данного параметра актуально только для

ПК простого действия. Для ПК двухстороннего действия данный параметр контролировать абсолютно нецелесообразно, т. к. продолжительность обратного хода составляет около 180° угла поворота коленчатого вала [29], и причины его существенного изменения должны быть зафиксированы путем контроля других параметров.

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

Давление в полостях нагнетания измеряют с учетом углового положения вала (рис. 1б), а силы инерции учитывают путем расчета по величине веса и скорости возвратно-поступательного и вращательного движения масс. Таким образом, в настоящее время в большинстве случаев датчики устанавливаются в местах, указанных на рис. 1б, при этом системы измеряют сигналы и параметры, приведенные в табл. 2 [14, 15].

### Эффективность реализации систем мониторинга и диагностики

Очевидно, что измерение прямых структурных и технологических параметров, величины которых указывает производитель ПК или другие нормативные документы [27], 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. 1) [14, 15] показывает, что по параметрам вибравакустических 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 номи-

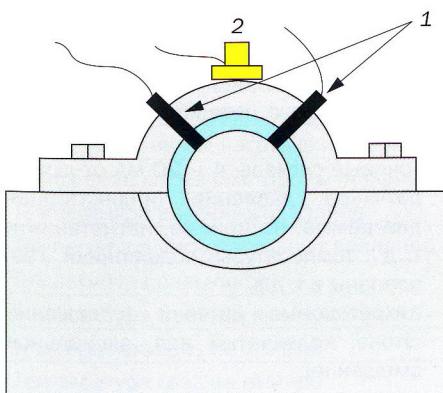


Рис. 3. Измерение вибрации подшипников: 1 – вихревые датчики; 2 – акселерометр

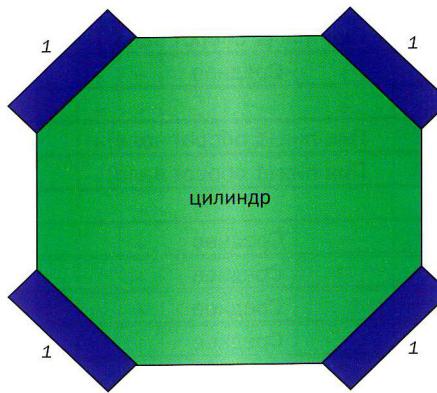


Рис. 4. Измерение температуры клапанов: 1 – датчики температуры

нальных значений и изменения технологического режима предполагается установка на один цилиндр не менее 12 датчиков различных физических величин (рис. 1, табл. 2). Таким образом, для определения технического состояния четырехцилиндрового ПК потребуется не менее 36 датчиков.

Целесообразно привести несколько примеров реализации систем мониторинга ПК, разработанных и предлагаемых наиболее известными компаниями.

Компании Brüel & Kjaer Vibro (Дания) и Tomassen Compression Systems (Нидерланды) разработали систему на основе известной системы COMPASS [46, 58].

COMPASS 3560 – система, которая применяется для контроля состояния промышленного оборудования, совершающего вращательные и возвратно-поступательные движения. Она 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).

По сути – это классическая параллельная система, которая представляет собой интегрированную модульную конструкцию. Ее основой является монитор механических колебаний 2520, включающий модули различного назначения для обеспечения измерений различных параметров вибрации, вращательных

движений и т. д. Монитор 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). В состав монитора входят:

- измерительные модули, которые позволяют измерять параметры вибрации (ускорение, скорость, перемещение, частоту вращения и т. д.) и осуществлять аналогово-цифровые преобразования сигналов первичных измерительных преобразователей (например, пьезоэлектрических акселерометров), установленных в различных частях контролируемого механизма;
- вспомогательные модули: генераторы напряжения различной формы, модули выборки, памяти, интерфейсные модули;
- вычислительные модули, осуществляющие обработку результатов измерения, вычисления спектральных характеристик контролируемых процессов, управление и контроль монитора механических колебаний 2520 в целом.

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 в рабочую станцию, где реализованы алгоритмы оцени-

вания состояния машин и оборудования 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 вихревокового датчика (модули 3500/72M), давление в полостях нагнетания (модули 3500/77M), температуру клапанов и других узлов (модули 3500/60 или 3500/61) [24–26, 28].

Компания Prognost Systems GmbH (Германия, США) (ранее называлась KOTTER PROGNOST Systems GmbH) разработала системы мониторинга ПК под названием Prognost-NT, Prognost-SILver [14], 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 AIx предназначены для приема и оцифровки аналоговых сигналов). Модули аналогового ввода доступны в модификациях для пяти типов датчиков:

- ICP акселерометры (крейцкопф, цилиндр, подшипники, корпус), велосиметры (корпус, подшипники, трубопровод);
- токовые сигналы 4 – 20 мА от любых датчиков давления (индикаторная диаграмма, на приеме, нагнетании и т. д.), температуры (подшипники, газ, клапаны и т. д.);
- вихревоковые датчики (положение штока, коленчатый вал, аксиальное смещение);
- датчики с выходом по напряжению ( $\pm 10$ ,  $\pm 5$ ,  $\pm 2$  и  $\pm 1$  В);
- фазовые отметчики (сигналы NAMUR).

Табл. 1. Физические величины и их параметры, измеряемые системами мониторинга ПК

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

Все аналоговые сигналы от измерительных модулей конвертируются в цифровой вид и поступают по внутренней шине на модуль MP (Machine Protection), который индицирует 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 ситуацийрабатываются тревожные сигналы, которые транслируются на релейный модуль, подключенный с помощью релейных выходов к системе управления производственным процессом или систему 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 взрывобезопасной

зоне непосредственно в машинном зале существует модификация системы во взрывонепроницаемой оболочке. Для обмена данными с системами верхнего уровня имеется модуль передачи данных с портом Ethernet.

Практически аналогичную систему предлагает и компания SKF (США) [30] 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) [20, 31] 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 Bently Nevada.

## Заключение

Анализ архитектур и принципов функционирования рассмотренных систем показывает, что:

1. В системах измеряется ряд термодинамических параметров, включая измерение параметров индикаторной диаграммы, и прямых структурных параметров, изменение которых не во всех случаях свидетельствует об изменении технического состояния компрессора, а может быть вызвано изменением технологического процесса, параметры которого контролируются другими системами. Это приводит к ошибкам диагностирования.

Табл. 2. Дефекты и неисправности, определяемые системами мониторинга ПК [45, 52, 58]

	Требования API-618 (4-я редакция)																
	+	+	+	Решение для предохранения	Решение для управления	Чрезмерная вибрация картера и цилиндра	Чрезмерная температура коренных подшипников (ухудшение смазки)	Проблемы с нагрузкой штока (включая обратный ход, чрезмерную нагрузку и т. д.)	Некорректное всасывание клапанов	Некорректность нагнетательных клапанов	Утечки газа через поршневые кольца	Износ опорных колец	Утечки сальников, заклинивание штока	Чрезмерный зазор втулки/гильзы крейцкопфа	Чрезмерный зазор в направляющем сальнике крейцкопфа	Заброс жидкости (конденсата)	Механическая разбалансированность (поршень, вкладыш, шток)
Вибрация корпуса	+	+	+													+	
Температура коренных подшипников	+	+	+		+												
Крейцкопф (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 крейцкопфа		+														+	
Температура газа на приеме			+							+							
Температура газа на выкиде	+	+	+							+	+					+	
Impact factor крейцкопфа			+													+	
Impact factor подшипники			+													+	

2. Параметры ВА сигнала используются для оценки общего ТС узлов ПК и свидетельствуют о возникновении достаточно обобщенных классов неисправностей и дефектов, при этом не используются возможности по увеличению глубины диагностирования путем анализа различных характеристик ВА сигналов. Это увеличивает ошибки диагностирования.

3. Рассмотренные системы имеют параллельную архитектуру, что приводит к существенному повышению стоимости систем вследствие больших затрат на кабель и датчики, высоким затратам на их монтаж и высокой стоимости владения ими.

4. Представленные стационарные системы **on-line** мониторинга параметров ПК осуществляют контроль этих параметров без определения причин их изменения, вызванных конкретными неисправностями и степени опасности этих неисправностей. Для оценки состояния, т.е. определения степени развития конкретных неисправностей в лучшем случае могут быть приглашены сторонние эксперты, которым для этой работы требуются дни, а чаще всего недели исследовательского труда. В течение этого времени ПК с высокой вероятностью может выйти из строя, в т.ч. с катастрофическими последствиями. Таким образом, рассмотренные системы обладают высокими значениями статической и динамической ошибок распознавания состояния, т.е. конкретных неисправностей, оборудования. Поэтому подобные системы неэффективны для ответственного оборудования опасных производств [32, 33].

5. Системы **real-time** мониторинга технического состояния оборудования, предложенные и развиваемые в России более 30 лет, свободны от этих недостатков. Принципиальным отличием систем **real-time** мониторинга от рассмотренных является наличие *встроенной автоматической экспертной системы постановки диагноза*, автоматически указывающей в реальном времени персоналу степень развития неисправностей и их опасность для ПК и технологической установки, путем «тонкого» автоматического анализа сигналов. Это позволяет объективно и своевременно подготовить и осуществить мероприятия, компенсирующие развитие неблагоприятных тенденций. Эти системы обладают низкой величиной статической и динамической ошибок распознавания неисправностей, поэтому их применяют для мониторинга состояния оборудования опасных производственных объектов (ОПО) всех категорий \*).

\* Продолжение статьи в следующем номере журнала

## Литература

- Системы мониторинга агрегатов опасных производственных объектов. Общие технические требования / Стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС «РИСКОМ» (СА 03-002-05). Сер. 03. – М.: Химическая техника, 2005. – 42 с.
- Центробежные насосные и компрессорные агрегаты опасных производств. Эксплуатационные нормы вибрации / Стандарт ассоциации «Ростехэкспертиза», ассоциации нефтехимиков и нефтепереработчиков и НПС «РИСКОМ» (СА 03-001-05). Сер. 03. – М.: Химическая техника, 2005. – 24 с.
- Мониторинг оборудования опасных производств. Порядок организации / Стандарт организации (СТО-03-002-08). Сер. 03. – В кн.: Мониторинг оборудования опасных производств. – М.: НПС «РИСКОМ», 2008, с. 25–63.
- Мониторинг оборудования опасных производств. Процедуры применения / Стандарт организации (СТО-03-004-08). Сер. 03. – Там же, с. 65–77.
- Мониторинг опасных производств. Термины и определения / Стандарт организации (СТО-03-002-08). Сер. 03. – Там же, с. 5–24.
- Костюков В. Н. Обобщенная диагностическая модель виброакустического сигнала объектов периодического действия. – Омский науч. вестн. 1999. Вып. 6. С. 37–41.
- Костюков В. Н. Способ виброакустической диагностики машин периодического действия и устройство для его осуществления / Патент РФ № 1280961. – Бюл. изобр. 1986. № 48.
- Костюков В. Н. Устройство для виброакустической диагностики механизмов периодического действия / А. с. СССР № 1343259. – Бюл. изобр. 1987. № 37.
- Костюков В. Н., Морозов С. А. Устройство для виброакустической диагностики механизмов периодического действия / А. с. СССР № 1107002. – Бюл. изобр. 1984. № 29.
- Костюков В. Н., Морозов С. А., Зименс Г. Я. Устройство для диагностики циклических механизмов / А. с. СССР № 783621. – Бюл. изобр. 1980. № 44.
- Костюков В. Н., Науменко А. П. Мониторинг состояния поршневых компрессоров. – В кн.: III Междунар. симп. «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования» / Труды симп. – СПб: Изд-во СПбТГУ, 1997, с. 254–256.
- Костюков В. Н., Науменко А. П. Система мониторинга технического состояния поршневых компрессоров нефтеперерабатывающих производств. – Нефтепереработка и нефтехимия. 2006. № 10. С. 38–48.
- Howard, F., Jr., Gallagher, D. Reciprocating Compressors. Field Application Note. <http://www.reliabilitydirect.com/appnotes/recipapp.html>.
- Asset Performance Management for Reciprocating Compressors and Pumps. – PROGNOST Systems GmbH, 2008. – 28 p. [http://www.nt-m.ru/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=36&Itemid=51](http://www.nt-m.ru/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=36&Itemid=51).
- Condition Monitoring Solutions for Reciprocating Compressors / GEA-14927 rev. NC (08/07). – GE Energy. 2007. – 12 p. Доступно в Интернет: [http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/oc/en/downloads/gea14927\\_recip\\_brochure.pdf](http://www.gepower.com/prod_serv/products/oc/en/downloads/gea14927_recip_brochure.pdf).
- Науменко А. П. О спектральном представлении индикаторной диаграммы. – В кн.: Науч.-техн. семинар стран СНГ «Диагностика, повышение эффективности, экономичности и долговечности двигателей» / Тез. докл. – СПб.: 1992, с. 9.
- Schirmer A. G. F., Fernandes N. F., De Caux J. E. Online Monitoring of Reciprocating Com-
- pressors. – In: NPRA Maintenance Conference. – San Antonio, 2004.
- Leonard S. M. Increasing the reliability of reciprocating compressors on hydrogen services. – In: National Petroleum Refiners Association Maintenance Conf. – New Orleans: 1997.
- Костюков В. Н., Науменко А. П. Проблемы и решения безопасной эксплуатации поршневых компрессоров. – Компрессорная техника и пневматика. 2008. № 3. С. 21–28.
- Франчик С. Система мониторинга и анализа работы клапанов поршневых компрессоров. – Там же. 2005. № 5. С. 4–6.
- Пластиин П. И., Дегтярева Т. С., Светлов В. А., Сячинов А. В. Автоматизированная система измерений, накопления и обработки данных при испытаниях поршневых компрессоров. – Там же. 1997. № 3–4 (16–17). С. 12–14.
- Рябцев А. Н. Решения фирмы «Хёргигер» для поршневых компрессоров при производстве сжатых газов. – Там же. 2002. № 7. С. 16–18.
- Impact Monitoring Application Note. – Houston: Metrix Instrument Co., [http://www.metrix1.com/docs/Impact\\_Monitoring\\_App\\_Note.pdf](http://www.metrix1.com/docs/Impact_Monitoring_App_Note.pdf).
- Saarem I. M. OK Limits for Impact Events. – Orbit. 2005. V. 25. No. 2. P. 32–33. Доступно в Интернет: [http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/oc/en/orbit/downloads/2q05\\_recipits\\_oklimits.pdf](http://www.gepower.com/prod_serv/products/oc/en/orbit/downloads/2q05_recipits_oklimits.pdf).
- Barnes M. Using a Rod Drop Monitor to prevent cylinder and piston/rod repair. – Orbit. 1999. 1<sup>st</sup> Quarter. P. 11–12. Доступно в Интернет: [http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/oc/en/orbit/downloads/499barnes.pdf](http://www.gepower.com/prod_serv/products/oc/en/orbit/downloads/499barnes.pdf).
- Howard B. How Piston Rod Vibration Signaled a Reciprocating Compressor Problem. – Orbit. 2001. 3<sup>rd</sup> Quarter. P. 11–17. Доступно в Интернет: [http://www.gepower.com/prod\\_serv/products/oc/en/orbit/downloads/3q01howard.pdf](http://www.gepower.com/prod_serv/products/oc/en/orbit/downloads/3q01howard.pdf).
- Reciprocating Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services / API Standard 618. Fifth Edition. – Washington: American Petroleum Inst., 2007.
- Howard B. Rod Load Calculations and Definitions for Reciprocating Compressor Monitoring. – ORBIT. 2008.V.28.No.1.P.28–31. Доступно в Интернет: [http://www.ge-energy.com/prod\\_serv/products/oc/en/orbit/downloads/1q08\\_reciptips.pdf](http://www.ge-energy.com/prod_serv/products/oc/en/orbit/downloads/1q08_reciptips.pdf).
- Пластиин П. И. Поршневые компрессоры. Т. 1. Теория и расчет / Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е. – М.: Колос, 2000. – 456 с.
- On-Line Reciprocating Compressor Monitoring Instrumentation / Technical Application Note. DM3021-EN. SKF, 2002. – 8 р. Доступно в Интернет: <http://www.skf.com/files/058464.pdf>.
- RecipCOM – The new generation: Diagnostics, protection and therapy for your reciprocating compressor / Technical Application Note. AKT2MON002BE200906. – Switzerland: HOERBIGER. 2009. – 8 р. Доступно в Интернет: [http://www.hoerbiger-compression.com/fileadmin/files/internet/KT/KT-Internet/Products\\_Services/Downloadcenter\\_brochures/English/KT\\_RecipCOM\\_E\\_Web.pdf](http://www.hoerbiger-compression.com/fileadmin/files/internet/KT/KT-Internet/Products_Services/Downloadcenter_brochures/English/KT_RecipCOM_E_Web.pdf).

Статья получена 13 февраля 2010 г.

**В МОМЕНТ ПОДПИСАНИЯ  
НОМЕРА В ПЕЧАТЬ  
В. Н. КОСТЮКОВУ,  
ОДНОМУ ИЗ АВТОРОВ СТАТЬИ,  
ИСПОЛНИЛОСЬ 60 ЛЕТ.  
РЕДАКЦИЯ ПОЗДРАВЛЯЕТ ЕГО  
С ЭТИМ СОБЫТИЕМ!**

ЕЖЕКАРТАЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ

В МИРЕ НК

ISSN 1609-3178

В МИРЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

№ 1(47) МАРТ 2010



Тема номера:

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УЗК



**Главный редактор:**

А. К. Гурвич

**Редакционный совет:**

В. А. Гапанович (ОАО «РЖД», г. Москва)  
 А. Ю. Детков (ЗАО «ДИГАЗ», г. Москва)  
 Н. П. Калинин  
 (ОАО «Пермский моторный завод»)  
 М. Б. Кель (ОАО «Сатурн», г. Рыбинск)  
 Н. Н. Коновалов (ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», г. Москва)  
 Н. Р. Кузелев (ВНИИТФА, г. Москва)  
 А. В. Новиков  
 (УЛИР «АвтоВАЗ», г. Тольятти)  
 С. А. Попоудина (БАНК и ТД, г. Минск)  
 Ю. Н. Посыпайко (УОНКТД, г. Киев)  
 Р. Л. Табакман  
 (ОАО «Ижорские заводы», г. Петербург)  
 С. Г. Хаютина (ММПП «Салют», г. Москва)  
 В. Г. Шевалдыкин (РОНКТД, г. Москва)  
 С. В. Шаблов (г. Москва)

**Редколлегия:**

М. Я. Грудской (технический редактор)  
 Г. Я. Дымкин, Е. Ф. Кретов.  
 А. А. Майоров, А. А. Марков,  
 И. Б. Московенко, И. В. Павлов,  
 М. В. Розина, В. А. Сясько,  
 О. А. Шерман

**Арт-директор:**

Д. В. Метальникова

**Верстка, препресс:**

В. О. Цветкова

«В мире неразрушающего контроля», 2010, № 1 (47).  
 Подписан к печати 05.04.2010.

Редакция не несет ответственности за достоверность информации, опубликованной в рекламных объявлениях.

Содержание публикуемых статей может не отражать мнение редакции.

Зарегистрирован в Государственном Комитете Российской Федерации по печати. Свидетельство № 019284 от 30 сентября 1999 г. Установочный тираж 2000 экз. Цена договорная. Оригинал-макет изготовлен ЗАО «Свен». Отпечатано в типографии ООО «Белл». Учредитель: ЗАО «Свен».

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно печатаются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Urich's Periodicals Directory».

**Индекс для подписки по каталогам:** «Роспечать» – 29976,  
 «Пресса России» – 42304.

© ЗАО «Свен», 2010

**Россия, 195220**

Санкт-Петербург, а/я 277

Тел. +7 (812) 534 0543

Факс +7 (812) 534 0194

**Editor-in-Chief**
**Anatoli K. Gourvitch**

Technical Editor

**Michael Ya. Grudsky**

Exterior relations manager

**Tamara Furmanskaya**
**NDT World Review**
**PO Box 277, St. Petersburg**
**195220, Russia**

Tel. +7(812) 534 0543

Fax +7(812) 534 0194

editor@ndtworld.com

www.ndtworld.com

**Automated UT Systems**

A. Kh. Vopilkin. Why Ultrasonic Automated Holography? .....	4
V. G. Badalyan, A. Kh. Vopilkin. The Object Condition Evaluation and Resource Prolongation with Automated Ultrasonic Inspection Usage .....	8
V. G. Badalyan, A. Kh. Vopilkin, D. S. Tikhonov. Selection Strategy of Automated Ultrasonic Testing Structure for a Specific Purpose .....	12
A. E. Bazulin, E. G. Bazulin, Yu. L. Gordeev, A. G. Kostylov, D. S. Tikhonov, A. M. Shtern. Mobile Measuring AUGUR Systems for Automated Ultrasonic Inspection .....	16
V. G. Badalyan, P. F. Samarin, D. S. Tikhonov. The Automated Ultrasonic Inspection of Welded Joints of Nuclear Power Plant Equipment with AUGUR 5.2 Systems Usage .....	24
S. V. Romashkin, D. S. Tikhonov. Experience of AUGUR-T System Application on Objects of Oil and Gas Industry .....	30
A. E. Bazulin, E. G. Bazulin, A. Kh. Vopilkin, D. S. Tikhonov. Automated System for Ultrasonic Transducer Verification .....	35
A. Kh. Vopilkin. Economic Efficiency of Holographic Automated Complex Application .....	42
A. S. Annenkov, S. I. Yudin. In-process Automatic Pipe Inspection .....	44

**NDT World News**

«Risk Monitoring and Management in Industry. Diagnostics and NDT Problems: Research-to-Practice Conference Results .....	50
M. Ya. Grudsky. Research-to-Practice Conference «Industrial Safety at Fire and Explosion Dangerous and Chemically Hazardous Installations» .....	52
D. Yu. Lezdin. Infrared Training Center Has Come to Russia .....	55

**Thermal Inspection**

V. P. Vavilov, D. A. Nesteruk, V. S. Khorev. Ultrasonic IR Thermographic Detection of Impact Damage and Fatigue Cracks in Metals and Composites .....	56
---	----

**Abstracts**

M. V. Rozina, T. Yu. Sharapova. Abstracts of the Articles Published in Other Sources .....	60
--	----

**Vibration Inspection**

V. N. Kostyukov, A. P. Naumenko. The Analysis of Modern Methods and Tools for Condition Monitoring and Diagnostics of Reciprocating Compressors. Pt. 1. On-line Monitoring Systems ..	64
---	----

**Optical Inspection**

P. R. Nechoporenko, M. A. Shubaev, A. L. Popov, V. M. Kozintsev, D. A. Chlyubeev, I. V. Arephhev. Experience of Residual Stress Study in Welded Joints and Repair Seams after Repairing with Arc Overlaying Welding .....	72
---	----

**NDT in the Railways**

A. Akhmetova, A. K. Gourvich. Rail Screening Inspection Based on Wide-Span Transducer .....	77
D. N. Barbashev. New Directions of Cooperation in the NDT Field on a Railway Transportation .....	78

Кропус .....	обл. 4, 28, 29	Константа .....	15
Helling .....	с. 1	Луч .....	76
Твема .....	обл. 3	Панатест NDT.....	63
Интерюнис .....	обл. 2	Пергам .....	59
AKC .....	47	Тестрон .....	40, 41
Амати-Акустика .....	58	Эхо+ .....	7
Априори Систем .....	71	Юнитет .....	76
ACK-Рентген .....	60	Magnetic Analysis Corp. .....	51
Вотум .....	60	Дефектоскопия 2010 .....	53
Интроскоп .....	75	10 <sup>th</sup> ECNDT .....	54