

УДК 620.171: 621.039.548.58

Черепанов Анатолий Петрович,

д.т.н., профессор, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: boning89@mail

Ляпустин Павел Константинович,

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: lpk62@mail.ru

Никанорова Людмила Викторовна,

ст. преподаватель, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: nikaludmila@mail.ru

Лосева Марина Викторовна,

ст. преподаватель, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: lmv2805@mail.ru

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА РЕСУРСНО-ПРОЧНОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Cherepanov A.P., Lyapustin P.K., Nikanorova L.V., Loseva M.V.

SECURITY OF TECHNICAL DEVICES WITH THE USE OF RESOURCE-STRENGTHENING RESEARCH COMPLEX

Аннотация. В статье рассматривается применение комплекса ресурсно-прочностных исследований сложных технических устройств для обработки результатов технического диагностирования.

Ключевые слова: безопасность, диагностирование, прочность, ресурс, техническое устройство, экспертиза.

Abstract. The article deals with the application of a complex of resource-strength studies of complex technical devices for processing the results of technical diagnostics.

Keywords: safety, diagnostics, strength, resource, technical device, expertise.

Согласно [1] техническое диагностирование предусматривает программу работ по продлению срока безопасной эксплуатации, анализ эксплуатационной, конструкторской и ремонтной документации, оформление результатов диагностирования и расчетно-аналитических процедур. Особое место при этом занимает оценка прочности, прогнозирование технического состояния и ресурса, которые включают расчет режимов работы, установление критериев прочности и предельного состояния, исследование напряженно-деформированного состояния и выбор критериев предельных состояний. Конечным этапом работы является определение остаточного срока эксплуатации (до прогнозируемого наступления предельного состояния) и разработка мероприятий по замене или усилению ослабленных элементов технических устройств (ТУ).

В настоящее время, как при проектировании ТУ, так и при проведении экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ) применяют в первую очередь технические регламенты Таможенного союза и Российской Федерации, которые носят обязательный характер. В то же время ГОСТ, ИСО, ТУ и другие стандарты имеют рекомендательный характер по установлению необходимых требова-

ний в области безопасности. Однако, например, в [2] отсутствуют конкретные рекомендации, по поводу того как должны обеспечиваться требования безопасности.

При разработке заключений экспертизы промышленной безопасности ТУ в соответствии с [1] результаты технического диагностирования (ТД) следует подтверждать расчетами прочности и выполнять оценку ресурса согласно [3, 4]. В то же время, нормативов по расчетам прочности и определению запасов прочности на последующий или на остаточный период эксплуатации не предусмотрено. Поэтому расчеты прочности проводятся по сборнику национальных стандартов [5–16], в котором изложены общие требования к расчету сосудов и аппаратов, методики расчета на прочность основных и корпусных элементов, укрепления отверстий, дана оценка прочности сосуда при воздействии опорных нагрузок и нагрузок от трубопроводов, приведены методы расчета фланцевых соединений. Группа стандартов из этого сборника посвящена комплексному расчету наиболее распространенных типов аппаратов: емкостей, кожухотрубчатых теплообменников, аппаратов колонного типа и аппаратов с рубашками. Там же приведен расчет на прочность при малоцикловой нагрузке и при воздействии на сосуд сероводородных сред.

Для использования в практической работе обработки результатов диагностирования предложено проведение комплекса ресурсно-прочностных исследований (РПИ) сложных ТУ, включая сосуды давления (емкости, теплообменники, скрубберы, реакторы, аппараты колонного типа и др.) и вертикальные цилиндрические резервуары. Комплекс РПИ включает обработку и анализ результатов технического диагностирования, выполнение прочностных расчетов по исходному, фактическому и прогнозируемому техническому состоянию, оценку фактического состояния не только по результатам диагностирования, но и по результатам прочностных расчетов. Это необходимо для соблюдения требований действующих нормативов в соответствии с [1]. Поскольку при проектировании и изготовлении ТУ, которые были введены в эксплуатацию 20 и более лет назад, применялись ранее действующие нормативы на проектирование, и на момент времени проведения ЭПБ они отменены. Кроме того, за период предшествующей эксплуатации могли измениться эксплуатационные параметры (давление, рабочая среда, интервал температур и др.), снизиться механические характеристики материалов, из которых они изготовлены, вследствие воздействия коррозии, накопления усталостных повреждений и т.п. Поэтому, для определения продляемого или остаточного ресурса и назначения срока безопасной эксплуатации ТУ необходимо учесть как можно больше и точнее влияние деградационных процессов, произошедших за период эксплуатации, что и позволяют сделать РПИ.

Схема проведения РПИ ТУ представлена на рисунке 1. Слева показаны типовые расчеты, проводимые по стандартам, нормам или методикам, а справа

– расчеты, касающиеся оценки запасов прочности, показателей скорости и степени износа.



Рисунок 1 - Схема комплекса ресурсно-прочностных исследований технического устройства

Рассмотрим возможность применения сборника национальных стандартов [5–16] в комплексе РПИ сложных ТУ, бывших в эксплуатации.

В стандарте [5] представлены основные требования к выполнению расчетов на прочность сосудов и аппаратов. Расчёт большинства элементов сосуда осуществляется по предельным нагрузкам с указанием ряда исключений. При расчёте на устойчивость определение допускаемых нагрузок рассчитывается по нижним критическим нагрузкам. В данном стандарте приведены правила назначения коэффициентов прочности сварных швов и значения прибавок к расчётным толщинам конструктивных элементов. С его применением учитывается подкрепляющее влияние плакирующего слоя при расчёте аппаратов, выполненных из двухслойных сталей. В нем перечислены условия статической прочности для тех ситуаций, когда оценка статической прочности выполняется по условным упругим напряжениям, а не по предельному состоянию.

Стандарт [6] распространяется на расчёт укрепленных кольцами жесткости гладких конических и цилиндрических обечаек, которые работают под действием наружного или внутреннего давления, изгибающих моментов, перерезывающих и осевых сил, позволяет рассчитать плоские, выпуклые и конические днища, в том числе присоединяемые болтами к фланцу. Нормы и методы расчёта на прочность могут быть применимы в случае, если отклонение от геометрической формы и погрешности изготовления рассчитываемых элементов сосудов не превосходят допускаемых значений, установленных [17].

Первая часть [7] посвящена укреплению отверстий в днищах и обечайках, находящихся под давлением, определяется максимальное предельное давление для узла врезки штуцера. Во второй части [7] рассматривается расчёт узлов врезки штуцеров при воздействии внешних статических нагрузок.

Стандарт [8] распространяет свое действие на расчёт арматурных и аппаратных фланцевых соединений, включая расчёт фланцев из меди, стали, алюминия, титана.

Расчёт опорных узлов в сосудах из меди, стали, алюминия, титана и их сплавов приводится в [9] и включает в себя расчёт обечаек и днищ в местах крепления таких элементов, как цилиндрические опорные стойки, седловые опоры, несущие ушки и опорные лапы и пластинчатые опорные стойки. Предусматривается расчёт по предельным нагрузкам днищ в местах крепления пластинчатых и цилиндрических опорных стоек и для обечаек на седловых опорах с кольцом жесткости в области опорного узла.

При осуществлении расчёта днищ и обечаек в местах крепления опорных лап, несущих ушек и седловых опор без колец жесткости в элементах конструкции определяют условные упругие напряжения. Далее их соотносят с предельными напряжениями изгиба, которые, в свою очередь, получены из условий предельного равновесия пластической балки – полоски. От места установки

опор зависят условия прочности, следовательно, и необходимая толщина стенки сосудов, установленных на опорах.

В стандарте [10] приведен расчёт на малоцикловую усталость за весь период эксплуатации. Распространяет свое действие на расчёт сосудов и аппаратов из меди, титана, алюминия и их сплавов. В него включены надлежащие характеристики материалов и кривые малоциклового усталости.

Стандарт [11] включает в себя расчёт на прочность кожухотрубчатых теплообменных аппаратов с плавающей головкой, U - образными трубами, неподвижными трубными решетками, расширителем или компенсатором на кожухе. В него входит методика расчёта на прочность плавающих головок. Обозначены общие критерии прочности крепления труб в решетке способом развальцовки. При расчёте аппаратов воздушного охлаждения учтен пространственный характер работы решеток для камер аппаратов воздушного охлаждения разъемного типа. Приведен расчёт трубных решеток аппаратов с U-образными трубами и оценка статической прочности трубных решеток на срез.

Стандарт [12] распространяет свое действие на сосуды с рубашкой, сопряженной анкерными трубами или отбортовкой, с цилиндрической или U-образной рубашкой, а также с рубашкой в виде регистровых или змеевиковых каналов для охлаждения или обогрева сосуда, нагруженные избыточным давлением в сосуде или (и) в рубашке, собственной массой и стесненностью температурных деформаций.

Стандарт [13] предусматривает расчёт напряжений в местах пересечения штуцеров с днищами и обечайками. В нем разрешено использовать иные методы расчёта, к примеру, численные методы исследований напряжений, базирующиеся на экспериментальных методах определения напряжений или на методе конечных элементов. Это связано со сложностью расчёта напряжений в местах пересечения штуцеров с корпусом сосуда.

Стандарт [14] регламентирует нормы и методы расчёта на прочность сосудов и аппаратов из низколегированных и углеродистых сталей, работающих при температуре не более 200 °С в коррозионно-активных сероводородсодержащих влажных средах. В зависимости от кислотности pH и парциального давления сероводорода сосуда, работающие под воздействием коррозионно-активных водородсодержащих сред, классифицируются на пять групп. В зависимости от присвоенной группы сосуда назначаются допускаемые напряжения и коэффициенты запаса. На внутренней поверхности оценка общих местных, изгибных мембранных и изгибных растягивающих напряжений оцениваются, учитывая взаимосвязь с оценкой условных упругих напряжений по п. 8.10 [5].

В стандарте [15] приведены формулы для оценки прочности сварных швов со смещением кромок, для оценки прочности и устойчивости ТУ, имеющих некруглость их корпусов. В него включены существенные дополнения и изменения, касающиеся методов оценки отклонений вмятин в конических обечайках

и в выпуклых днищах. Стандарт распространяет свое действие на расчёт сосудов и аппаратов из алюминия, титана, меди и их сплавов.

В стандарте [16] изложены основные требования к соответствию расчётных программ области и условий применения стандартов с предъявлением основных и промежуточных результатов расчёта в достаточном объеме, чтобы сделать заключение о прочности, долговечности, герметичности, устойчивости, необходимых толщинах элементов конструкции и других параметрах.

Аппараты колонного типа рассчитываются по нормам и методам расчёта на прочность [18, 19]. Для расчёта на прочность вертикальных резервуаров для хранения нефтепродуктов и нефти существует нормативная база [20].

Рассмотрим возможность применения приведенных нормативов в комплексе РПИ бывших в эксплуатации ТУ по результатам их технического диагностирования [21]. При этом необходимо учитывать классификацию параметров ресурса на различных этапах жизненного цикла [22], в которой условие снижения ресурса выражено зависимостью снижения запасов прочности:

$$T_{и} \geq T_{к} \geq T_{к+1} \geq T_{о} = f(n_{и} \geq n_{к} \geq n_{к+1} \geq n_{о} \geq n_{н}), \quad (1)$$

показано соотношение между проектным (исходным) $T_{п}$, расчётным (текущим) $T_{к}$ (или $T_{к+1}$), остаточным $T_{о}$ ресурсом и исходным $n_{и}$, расчётным $n_{к}$ (или $n_{к+1}$), остаточным $n_{о}$ и нормативным $n_{н}$ запасами прочности [23, 24]. Условие (1) показывает, что снижение запасов прочности вследствие износа определяется совокупностью преобладающих факторов износа в конкретный момент времени жизненного цикла ТУ. Когда запас прочности достигнет величины $n_{н}$, наступит предельное состояние, и эксплуатация должна быть прекращена до принятия решения о проведении ремонта, усиления, замены изношенных элементов, или вывода ТУ из эксплуатации. Условием (1) определяется последовательность снижения ресурса $T_{и}$ в зависимости от $n_{и}$, расчётного (текущего) ресурса $T_{к}$ в зависимости от фактического запаса при $n_{к}$, или последующего ресурса $T_{к+1}$ в зависимости от последующего запаса при $n_{к+1}$. Остаточный ресурс $T_{о}$ определяется на момент достижения остаточного запаса при $n_{н}$, который будет соответствовать наступлению предельного технического состояния. За основные показатели могут быть приняты как запасы толщины стенок, так и запасы прочности, которые определены для проектных и фактических толщин стенок элементов ТУ. Запасы прочности, которые имеют элементы на период ТД, определены для фактических толщин стенок элементов и параметров эксплуатации ТУ.

Таким образом, условие (1) показывает изменение запаса прочности в соответствии с ресурсом, определяемым в заданные промежутки времени на протяжении всего жизненного цикла ТУ. Таким образом, зная величину запасов прочности по исполнительным и фактическим толщинам стенок, эффективность ТД и вероятную степень риска в случае отказа или разрушения [25], возможно определить ресурс как отдельных элементов, так и ТУ в целом. Предло-

жены функции ресурса, в которых величины V , W , ξ и β определяются для каждой составляющей ресурса по результатам ТД:

– полного на момент изготовления

$$T_n = f(n_n; n_n; V_n; W; \xi; \beta), \quad (2)$$

– расчётного на момент текущего ТД (период времени k)

$$T_k = f(n_n; n_k; V_k; W_k; \xi_k; \beta_k), \quad (3)$$

– остаточного срока службы на период времени $(k+1)$

$$T_o = f(n_n; n_{(k+1)}; V_{(k+1)}; W_{(k+1)}; \xi_{(k+1)}; \beta_{(k+1)}), \quad (4)$$

где $n_{(k+1)}$ – запас (прочности, устойчивости и т.п.) на период после ТД;

$(k+1)$ – период проведения РПИ после первичного или последующего ТД;

V – скорость снижения запаса прочности;

W – эффективный объем диагностирования [25];

ξ – коэффициент опасности для окружающей среды при разрушении;

β – коэффициент дефектности, учитывающий наличие допустимых или недопустимых дефектов, обнаруженных при ТД и устраненных ремонтом при необходимости [24].

Ресурс ТУ, состоящего из общего количества элементов от 1 до m , включая узлы, детали, элементы и зоны сопряжения элементов, зависит от ресурса указанных компонентов, поэтому задача о прогнозировании распадается на ряд более частных задач. Элементы, детали и узлы могут разбиваться на группы в зависимости от их сложности, возможности замены и ремонта.

Прагматичный подход, применяемый в современных методиках и обеспечивающий наибольшую безопасность, состоит в определении ресурса по наиболее слабому из компонентов зависимостями:

$$T_n = \min(T_{n1}; T_{n2}; \dots; T_{nm}), \quad (5)$$

$$T_k = \min(T_{k1}; T_{k2}; \dots; T_{km}), \quad (6)$$

$$T_{(k+1)} = \min(T_{(k+1)1}; T_{(k+1)2}; \dots; T_{(k+1)m}), \quad (7)$$

$$T_o = \min(T_{o1}; T_{o2}; \dots; T_{om}). \quad (8)$$

В общем виде ресурс, определяемый на основе запасов прочности и времени эксплуатации, может быть выражен в виде производной $T=dn/dt$.

В свою очередь, запас прочности снижается по мере износа, нарастания напряжений, появления дефектов и деградации материала, соответственно, является величиной переменной, зависящей от ресурса на отдельных этапах времени жизненного цикла ТУ, составляющие ресурса [21, 22] выражены как:

- исходный (полный) ресурс, который является функцией исходного (полного) запаса прочности;
- текущий ресурс, который является функцией текущего запаса прочности;
- остаточный ресурс, который является функцией остаточного запаса прочности.

На каждом этапе параметры ТС оцениваются толщинами стенок, качеством сварных швов, наличием дефектов, поэтому ресурс ТУ, состоящего из m

элементов, включая зоны сопряжения их между собой, определен по наиболее слабому из них формулой

$$T = \min(T_1; T_2; \dots T_m) \quad (9)$$

Соответственно, при общем количестве рассчитываемых элементов от 1 до m , запас прочности сосудов и аппаратов в целом также задается минимальной величиной n_{min} наиболее слабого из них

$$n_{min} = \min(n_{1...m}) \geq 1,0 \quad (10)$$

Поскольку системы непрерывного мониторинга толщин стенок не всегда применимы и оправданы, для расчёта фиксированных значений величин, примененных в формулах (5÷9), в условии (10) предлагается функциональная зависимость ресурса от запасов прочности, которая имеет вид

$$(T_p, T_k, T_o) = f(n_p, n_k, n_o). \quad (11)$$

В дальнейшем условия (5 и 11) применимы для обеспечения равнопрочности не только отдельно взятых ТУ, но и другого оборудования технологической установки, например резервуаров и трубопроводов, которое связано с продолжительностью выпуска $T_{ПР}$ конкретного вида продукции равенством $T_{ПР} = T_H$. При ЭПБ ресурс может назначаться ниже, чем это определено условием на величину

$$T_H = \min((T_p, T_k, T_o) - T_{CH}), \quad (12)$$

где T_{CH} – снижение расчётного ресурса, определяемое проектировщиком или экспертной организацией по результатам дополнительных исследований, не имеющих расчётных параметров или по экспертной оценке.

В заключение можно сделать следующие выводы.

Одним из главных преимуществ, достигаемых применением РПИ, является повышение качества экспертизы промышленной безопасности.

Применение нормативов, носящих рекомендательный характер, как показала практика, вполне достаточно для расчётов прочности элементов ТУ, бывших в эксплуатации и подвергавшихся износу под воздействием агрессивных сред и циклических нагрузок.

Использование в расчётах запасов прочности по каждому элементу в целом не только упрощает задачу оценки ресурса эксплуатации, но и позволяет решить задачу своевременной замены изношенных элементов ТУ.

РПИ обеспечивают повышение точности оценки остаточного срока службы и безопасности эксплуатации сосудов давления (емкостей, аппаратов колонного типа, теплообменников, скрубберов, реакторов, других ТУ) и вертикальных цилиндрических резервуаров.

Введение в комплекс новых процедур расчёта позволит проводить РПИ, например, шаровых резервуаров, котлов, трубопроводов и других ТУ.

Эффективность использования РПИ пропорциональна количеству разнотипных элементов конструкции (обечаек корпусов, различной конструкции днищ

и установленных на них боковых вводов, укрепляющих элементов), включая сварные швы и т.п.

С применением РПИ решается задача оперативной выдачи рекомендаций по ремонту, усилению или замене изношенных частей. Продление срока дальнейшей эксплуатации технических устройств на основе повышения качества диагностирования и РПИ дает возможность экономить временные и финансовые ресурсы на замену оборудования вследствие износа.

Поэлементные прочностные расчёты с определением запасов прочности и оценки ресурса с применением РПИ обеспечивают сокращение трудоемкости экспертизы промышленной безопасности ТУ опасных производств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности». Серия 26. Выпуск 12. - М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 24 с.

2. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 032/2013 «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением».

3. РД 03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. Серия 03. Выпуск 17 / Колл.авт. - М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 136 с.

4. РД 10-249-98. «Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды».

5. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. – М.: Стандартинформ, 2008.

6. ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – М.: Стандартинформ, 2008.

7. ГОСТ Р 52857.3-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. – М.: Стандартинформ, 2008.

8. ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. – М.: Стандартинформ, 2008.

9. ГОСТ Р 52857.5-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. – М.: Стандартинформ, 2008.

10. ГОСТ Р 52857.6-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках. – М.: Стандартинформ, 2008.

11. ГОСТ Р 52857.7-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты. – М.: Стандартинформ, 2008.

12. ГОСТ Р 52857.8-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты с рубашками. – М.: Стандартинформ, 2008.
13. ГОСТ Р 52857.9-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение напряжений в местах пересечений штуцеров с обечайками и днищами при воздействии давления и внешних нагрузок на штуцер. – М.: Стандартинформ, 2008.
14. ГОСТ Р 52857.10-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты, работающие с сероводородными средами. – М.: Стандартинформ, 2008.
15. ГОСТ Р 52857.11-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек. – М.: Стандартинформ, 2008.
16. ГОСТ Р 52857.12-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Требования к форме представления расчетов на прочность, выполняемых на ЭВМ. – М.: Стандартинформ, 2008.
17. ГОСТ Р 52630-2012. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2012.
18. ГОСТ Р 51273–99. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Определение расчетных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий.
19. ГОСТ Р 51274–99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и методы расчета на прочность.
20. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – Сер. 03. – Вып. 3. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 174 с.
21. Безопасность России. Правовые, социально - экономические и научно - технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / Под общ. ред. Махутова Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2015. – 600 с.
22. Cherepanov Anatoly P., Lyapustin Pavel K. Forecasting Resource as a Method of Increasing the Security of Technical Devices IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 253 (2017) 012004 doi:10.1088/1757-899X/253/1/012004. International Scientific-Practical Conference: Innovations in Fuel and Energy Complex and Mechanical Engineering (FEC-2017) 18–21 April 2017, Kemerovo, Russian Federation. Электронный ресурс: <http://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/253/1> (Дата обращения 28.06.2017 г.)
23. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. - Новосибирск: Наука, 2005. - Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. - 494 с.; Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. - 610 с.
24. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник / А.М. Кузнецов, В.И. Лившиц и др. Изд. 2-е, дополненное. Иркутск: Издание ГП "Иркутская областная типография №1", 1999. 600 с.
25. Черепанов А.П., Порошин Ю.В. Компьютерная обработка результатов диагностирования сосудов, резервуаров и трубопроводов. Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике. Сборник тезисов 3-ей международной конференции. М.: РОНКТД. 2002. 270 с.