

Ю.В. Прус, В.В. Белозеров, С.И. Буйло, А.В. Марченко, А.В. Ветров
(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России,
e-mail: info@academygps.ru)

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА КАК ОСНОВА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Рассматриваются проблемы научного обоснования индивидуального прогноза технического состояния потенциально опасных объектов. Развивается диагностика на основе интеграции методов распознавания образов контролируемых объектов и процессов с методами и средствами измерения их параметров.

Ключевые слова: диагностика, мониторинг, объект, прогноз, процесс.

Yu.V. Prus, V.V. Belozеров, S.I. Builo, A.V. Marchenko, A.V. Vetrov
INTEGRAL DIAGNOSTICS AS BASE OF THE MONITORING
THE CONDITION TECHNICAL OBJECT

The problems of the scientific motivation of the individual forecast of the technical condition potentially dangerous object are considered. Develops the diagnostics on base of the integrations of the methods of the artificial perception controlled object and processes with methods and facility of the measurement their parameter.

Key words: diagnostics, monitoring, object, forecast, process.

Обеспечение безопасности техносферы на современном этапе требует смены приоритетов в направлении от задач экстренного реагирования и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) к задачам предупреждения, снижения рисков и смягчения последствий ЧС.

Растущая социальная потребность в снижении уровня рисков от различных потенциально опасных объектов (ПОО) приводит к несоответствию имеющегося научного обоснования в области разработки и проектирования автоматизированных интегрированных систем безопасности и жизнеобеспечения (АИСБЖО), обеспечивающих постоянный контроль состояния технических объектов, жилых зданий, сооружений, окружающей среды от роста масштабов и темпов развития проектно-конструкторской деятельности, строительства, эксплуатации. Создание эффективных систем мониторинга и прогнозирования ЧС, обеспечивающих постоянный контроль состояния ПОО и получение прогностической информации о возможном возникновении ЧС требует разработки единой концепции систем безопасности ПОО [1, 2].

Использование традиционных вероятностных методов прогноза надежности при развитии современных технологий становится все менее эффективным, зачастую приводит к необъективным оценкам степени риска при проектировании и эксплуатации ПОО и не позволяет обеспечить по-

лучение прогностической информации о возможном возникновении ЧС. Это проявляется в тех случаях, когда необходим индивидуальный прогноз технического состояния отдельных высоконадежных критически важных элементов, отказ или разрушение которых влияет на безопасность ПОО в целом.

1. Проблемы научного обоснования индивидуального прогноза технического состояния критически важных элементов ПОО

Для создания эффективных систем мониторинга и прогнозирования ЧС на основе современных автоматизированных систем диагностики необходим переход к методам индивидуального прогноза поведения отдельных критически важных высоконадежных элементов за длительный период их эксплуатации до отказа [1, 3, 4].

Методология мониторинга технического состояния критически важных узлов и элементов ПОО не соответствует современному развитию физико-технических неразрушающих методов диагностики и принципиально не позволяет обеспечить своевременное получение АИСБЖО прогностической информации о возможном возникновении ЧС на ПОО [3, 4]. Вместе с тем, современные системы мониторинга создают технологические возможности для значительного повышения эффективности применения неразрушающих методов диагностики и контроля, дающих возможность исследования технического состояния непосредственно в процессе эксплуатации ПОО. Достижение качественно нового уровня обеспечения безопасности связано с реализацией возможностей, обусловленных увеличением информационной производительности аппаратных, коммуникационных, технических средств и программного обеспечения, применяемых в АИСБЖО, а также высоким уровнем элементной базы и "интеллектуализацией" периферийных устройств, позволяющих увеличить количество регистрируемых информативных параметров состояния контролируемых узлов и элементов.

Наиболее перспективным направлением совершенствования АИСБЖО, на наш взгляд, является осуществление перехода от процедур независимой регистрации и параллельной обработки различных типов первичной информации от периферийных устройств к процедурам синхронной регистрации этих информационных потоков. Для обработки информационных потоков необходимо использовать алгоритмы, основанные на математических моделях, определяющих в качестве параметров и критериев текущего технического состояния узлов и элементов ПОО некоторые экспериментально и теоретически обоснованные значимые функцио-

нальные и корреляционные зависимости между различными типами первичных данных и их динамическими характеристиками [3, 4].

Научное обоснование методологии индивидуального прогноза отдельных критически важных узлов ПОО должно основываться на построении математических моделей, адекватно описывающих поведение их функциональных свойств в течение всего длительного периода эксплуатации до отказа или разрушения. Для решения такой задачи необходима большая исследовательская работа по изучению реальных физико-химических процессов, определяющих, в конечном счете, надежность исследуемых элементов. Наиболее перспективным направлением развития теоретических основ технической диагностики представляется системно-физический подход, в основе которого лежит термодинамическая интерпретация надежностных свойств [1]. Для интерпретации экспериментальных данных с точки зрения системно-физического подхода необходимо совместное использование как энергетических, так и энтропийных характеристик, установление значимых корреляционных связей между различными диагностическими параметрами. Такая методология позволила создать некоторые простые феноменологические модели надежности, сформировать систему интегральных диагностических параметров [5-12]. Вместе с тем, дальнейшее развитие подобных методов диагностики, построение моделей для осуществления индивидуального прогноза, сдерживается отсутствием целостного теоретического обоснования общей концепции интегральной диагностики.

2. Алгоритмы распознавания образов и решающие правила

Термин "диагностика" (diagnostikos) в переводе с греческого означает – способность распознавать что-то, т.е. образы объектов и процессов.

Распознавание образов – научное направление, связанное с разработкой принципов и построения систем, предназначенных для определения принадлежности данного объекта к одному или заранее выделенному классу объектов. При этом под объектами в распознавании образов понимают различные *предметы, явления, процессы, ситуации, сигналы*. Таким образом, основная задача распознавания образов – установить принадлежность объекта к одному или целому классу образцов [3, 4].

Методы распознавания образов используются в медицине, технике, экономике, лингвистике, психологии, криминалистике, геологии, океанологии, химии, ядерной и космической физике, в автоматизированных системах различного назначения и т.д.

Так диагностика в медицине — это процесс установления диагноза, т.е. заключения о сущности болезни и состоянии пациента, выраженные в принятой медицинской терминологии.

Диагностика в технике — изучение и установление признаков дефектов технических объектов, характеризующих состояние технических систем, для предсказания возможных отклонений (в т.ч. за допустимые пределы, вследствие чего возникают *отказы*), а также разработка методов и средств экспериментального определения состояния этих систем с целью своевременного предотвращения нарушений нормального режима работы.

Диагностика в экономике - анализ и оценка экономических показателей работы объектов на основе изучения отдельных результатов, с целью выявления возможных перспектив его развития и последствий текущих управленческих решений.

Диагностика в психологии и социологии - включает в себя пакет диагностических методик, позволяющих составить психологический, профессиональный или социальный портрет индивида (например, целостный психологический портрет личности, отдельные свойства и характеристики, профессионально важные качества, направленность и ценностные ориентации, темпераментологические особенности, психологическое состояние, формы межличностного поведения и т.д.).

Как следует из вышеприведенных примеров применения термина "диагностика", основное отличие диагностики от исследований, испытаний, анализов и прогнозирования состоит, во-первых, в интеграции указанных процессов в один методологически связанный комплекс, во-вторых, в экспресс-методах и средствах регистрации ограниченных данных и диапазонов воздействия на объект, в-третьих, в многокомпонентном и, как правило, междисциплинарном характере получаемых данных, что в итоге и позволяет говорить о создании "образа" объекта, который, в общем случае является многопараметрическим [3, 4].

В нашем случае, в качестве примера, подтверждающего вышеприведенную классификацию, можно привести расшифровку главного направления отечественного журнала "Диагностика материалов" - единственного в мировой практике издания, выходящего с 1932 г., информирующего читателя о *трех главных параметрах качества* любого вещества и материала – *химическом составе, строении и физико-механических свойствах* [13].

Таким образом, если понятие диагностики "образа изделия" соответствует термину "диагностика в технике", то при диагностике образца "образ материала" должен состоять [3, 4, 13]:

- из параметров, характеризующих его химический состав;
- из параметров, характеризующих его строение;

- из параметров, характеризующих его физико-механические свойства, в числе которых и собственно параметры качества (долговечность, безотказность и т.д.) и безопасности.

В общем случае, независимо от типа и количества параметров, описывающих "образ материала", распознавание осуществляется с помощью решающего правила [14], которое является алгоритмом, позволяющим по результатам измерений этих параметров (ситуаций), принять решение об идентификации состояний диагностируемого образца, непосредственно не наблюдаемых при измерениях (например, решение об отнесении к одному из классов, о предразрушающем состоянии и т.д.).

Алгоритм распознавания обычно строится в два этапа [15]:

первый – выбирается совокупность измеряемых параметров (признаков) объекта $x = (x_1, \dots, x_n)$;

второй – строится функция $\delta(x)$, отображающая множество X наборов x на множество Λ решений λ , принимаемых относительно искомых параметров γ объектов.

Например, алгоритм линейного разделения образов в n -мерном евклидовом пространстве X , где $\Lambda = (1, 2, \dots, N)$ превращается в конечное множество номеров классов (образов), в которых каждый класс характеризуется заданным опорным вектором (эталоном) $\alpha_\gamma = (\alpha_{1\gamma}, \dots, \alpha_{n\gamma})$. Алгоритм относит объект $x = (x_1, \dots, x_n)$ к тому из классов λ , для которого максимально скалярное произведение:

$$\sum_{i=1}^n x_i \alpha_{i\gamma}. \quad (1)$$

Когда множество значений признаков непрерывно, т.е. речь идет о пространстве изображений, алгоритм распознавания задают с помощью дискриминантных функций вида $f(x, \gamma)$, каждая из которых указывает количественно степень "близости" (сходства) наборов $\gamma \in X$ к признакам одного из классов γ . И алгоритм относит этот объект к классу λ , для которого сходство максимально: $f(x, \lambda) = \max f(x, \gamma)$ по всем $\gamma \in \Gamma$. При этом разделяющие поверхности $\varphi(x, \lambda) = 0$ расчлняют множество X на непересекающиеся подмножества $X = \{x | \varphi(x, \lambda) > 0\}$, соответствующие различаемым классам: $\varphi(x, \lambda) > 0$, если объект, описываемый набором признаков x , относится к классу λ , и $\varphi(x, \lambda) \leq 0$ в противном случае. Частный случай разделяющей поверхности – гиперплоскость:

$$(x) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_i, \quad (2)$$

где x_i – значение i -го признака изображения x , и a_0, a_1, \dots, a_N – коэффициенты.

Статистические алгоритмы строятся на основе критериев риска распознавания – математического ожидания потерь от ошибок распознавания (например, убытков или числа фактических ошибок распознавания по эталону и т.д.). Риск распознавания сводится к вероятности ошибок при распознавании и в общем виде задается формулой [14]:

$$r(\delta) = \int \sum_{j=1}^J L(j, k = \delta(x)) \cdot p(j) \cdot p(x | j) dx \quad (3)$$

где X - пространство распознаваемых признаков (сигналов) x ;
 $j = 1, \dots, J$ – номера истинных классов признаков (сигналов);
 $k = 1, \dots, K$ – номера ответов алгоритма распознавания $\delta(\cdot)$;
 $L(j, \dots, k)$ – потеря при отнесении сигнала класса j , к классу k ;
 $p(j)$ – априорные вероятности классов;
 $p(x|j)$ – априорные плотности вероятностей сигналов каждого класса.

Если вероятностные характеристики сигналов и классов не известны, может быть использован так называемый эмпирический риск распознавания, представляющий собой средние потери при распознаваемой выборке сигналов x_t , классы j_t которых заданы ($t = 1, \dots, N$):

$$r_{\text{ЭМП}}(\delta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N L(j_t, k_t = \delta(x_t)) \quad (4)$$

Частным случаем эмпирического риска распознавания является частота ошибок для такой выборки.

3. Специфика диагностики материалов: нано-, микро- и макро-деструкция материалов как процессы изменения их структуры и "старения" при эксплуатации

Бурное развитие нанотехнологий, производства и применения наноматериалов и изделий из них требуют решения задач по определению их долговечности, устойчивости и надежности на соответствующем уровне – уровне диагностики нано- и микроизменений в материалах, которые проявляются, как правило, в макроизменениях изделий из них. А это требует, во-первых, принципиально иного – вероятностно-физического подхода к решению указанных задач, вместо общепринятого подхода – статистического, а во-вторых, и это главное – новых методов и средств диагностики, способных регистрировать и нано-, и микро-, и макроизменения необходимых параметров.

Деструкция (лат. destructio) - нарушение, разрушение нормальной структуры чего-либо [16].

Деструкция (destruction) в переводе с английского – разрушение. В то же время в некоторых словосочетаниях "destruction" имеет смысл: уничтожение, крушение, разорение, в т.ч. разложение, если речь идет о материалах.

Термины "нанодеструкция", "микродеструкция" и "макродеструкция" введены [3, 4], для систематизации и адекватности описания объектов и процессов (по аналогии с наноматериалами и нанотехнологиями):

нанодеструкция – процессы изменения структуры/состава вещества или материала с размерностями в нанометрах (10^{-9} м);

микродеструкция – процессы изменения структуры/состава вещества или материала с размерностями в микрометрах (10^{-6} м);

макродеструкция – процессы изменения структуры/состава вещества или материала с размерностями в миллиметрах и более (10^{-3} м).

Для описания изменений в материалах многие авторы используют термин "деградация" (от лат. degradatio, буквально – снижение) – движение назад, постепенное ухудшение, упадок, снижение качества [16]. И производные от него соответственно: "нанодegradация", "микродegradация" и "макродegradация". Однако с точки зрения семантики, для представления процессов, идущих в веществах и материалах и в другом направлении также (упрочнение, повышение стойкости и т.д.), более правильно, на наш взгляд, употребление введенных нами, т.к. изменение структуры/состава материалов не всегда ухудшает их свойства.

В последние годы в физике твердого тела находят многочисленные применения идеи теории протекания [17], которые описывают процессы деградации свойств проводников, полупроводников и композитов, как возникновение дефектов (дислокаций, трещин и т.д.) или **нанодеструкции**, растущих под воздействием силовых, температурных и электромагнитных полей. При этом группы дефектов, соединяясь между собой, образуют систему каналов - "каналов протекания", возникновение которых характеризуется так называемым "порогом протекания", т.е. уже **микродеструкцией** [3, 4, 17].

В процессе деструкции полимерных материалов (в первую очередь термодеструкции) также возникают дефекты, представляющие собой полости случайной формы и расположения, заполненные низкомолекулярными продуктами распада. Эти продукты деструкции диффундируют через матрицу полимера и улетучиваются, возникшие дефекты растут, одновременно возникают новые, так что среда приобретает мелкочаеистую структуру. "Ячейки" структуры, соединяясь, друг с другом, могут образовывать систему сквозных каналов ("каналов протекания"), соединяющих внешнюю и внутреннюю границы изоляционного покрытия. Именно возникновение сети таких каналов характеризует "порог протекания в полимерах".

При этом "порог протекания" характеризуется микродеградацией исходных механических и физических свойств вещества [17, 18]. Деструкция полимера, как правило, является химической реакцией, а её скорость ограничивается скоростью подвода реагентов (обычно это кислород воздуха) и скоростью отвода продуктов распада, следовательно, здесь действуют диффузионные механизмы, описываемые в общем случае уравнениями вида [18, 19]:

$$J_i = \sum_k L_{ik} \text{grad } x_k \quad (1.14)$$

в случае термодиффузии

$$J_i = -n \text{grad } C_i - n \frac{D_T}{T} \text{grad } T \quad (1.15)$$

где J_i – скорости перекрестных процессов;
 L_{ik} – коэффициенты, подчиняющиеся соотношениям Онсагера;
 D, D_T – коэффициенты диффузии;
 n – число частиц в единице объема;
 C_i – концентрация компонента частиц.

По существу речь идет о новом состоянии вещества – фазовом переходе (ФП) третьего рода, гипотезу о существовании которого еще в 70-х годах высказал академик АН УССР Б.Н. Гнеденко [18]. При этом удачная классификация фазовых переходов достигается при использовании энергии Гиббса G , изменения которой при переходах всех типов $\Delta G = 0$, а производные – изменяются скачком [19, 20]:

Так для ФП первого рода скачкообразно меняются 1-е производные:

$$\Delta V = \Delta \left(\frac{\partial G}{\partial P} \right)_T \neq 0, \quad \Delta S = \Delta \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P \neq 0; \quad (1.16)$$

при постоянстве самой функции, а для переходов второго рода – 2-е производные:

$$\Delta \alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T \partial P} \right) \neq 0; \quad \Delta \beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial^2 G}{\partial V^2} \right) \neq 0; \quad \Delta C_P = -T \left(\frac{\partial^2 G}{\partial T^2} \right) \neq 0; \quad (1.17)$$

при

$$\Delta \left(\frac{\partial G}{\partial P} \right)_T = 0; \quad \Delta \left(\frac{\partial G}{\partial T} \right)_P = 0; \quad \Delta G_{\text{ФП}} = 0.$$

Естественным продолжением подобной классификации явилось бы открытие ФП третьего рода, для которых скачкообразные изменения должны претерпевать 3-и производные по температуре и объему от G при постоянстве α, β и C_P [19].

В 80-х годах, под руководством академика АН УССР А.А. Галкина, при исследовании Bi и Zn , был определен ФП третьего рода как переход из хрупкого в пластичное состояние и условия такого перехода. В частности, обозначив плотность подвижных дислокаций через n , было показано, что хрупкому состоянию соответствует состояние тела, когда $n = 0$, а пластичному – состояние с $n \neq 0$. То есть плотность подвижных дислокаций ведет себя при переходе хрупкость-пластичность аналогично параметру упорядочения при ФП второго рода. Существенным отличием при этом являлось то, что величина n принимает только положительные значения. Поэтому разложение термодинамического потенциала Φ в окрестности перехода имело вид [21]:

$$\Phi = \Phi_0 + 1/2 an^2 + 1/3 bn^3 + 1/4 cn^4, \quad (1.18)$$

где a, b, c – некоторые функции давления и температуры,
 Φ_0 – термодинамический потенциал хрупкой фазы.

Равновесные значения n определялись из уравнения

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = n(a + bn + cn^2) = 0. \quad (1.19)$$

Решение $n=0$ соответствовало хрупкому состоянию, а решение

$$n = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 + 4ac}}{2c} \quad (1.20)$$

- пластическому состоянию. При этом хрупкая фаза была устойчива, когда $a > 0$, пластическая – когда $a < 0$. Коэффициент $c > 0$, т.к. пластическому состоянию вблизи линии перехода соответствовали малые плотности подвижных дислокаций.

Тогда, если $b(P, T) > 0$, то переход из хрупкого в пластичное состояние происходил как фазовый переход третьего рода, причем в пластичной фазе плотность дислокаций была равна

$$n \approx -a/b, \quad (1.21)$$

а условием фазового перехода являлись

$$a(P, T) = 0 \text{ или } P = P_K(T). \quad (1.22)$$

Несмотря на то, что за исключением указанных выше работ до настоящего времени ФП третьего рода с достоверностью не установлены, обнаружение "каналов протекания" и описание нано-, микро- и макродефектуры, как процессов старения и деградации ЭРМ, являлась одной из задач при выполнении авторами НИР по гранту Минобразования и Минатома России, в результате которых была создана модель [19].

4. Концепция интегральной диагностики и феноменологический подход к моделированию технических объектов

Основное предположение системно-физического подхода, на основе которых строится концепция интегральной диагностики, заключается в возможности представления текущего состояния исследуемого объекта в некотором многомерном пространстве параметров, т.е. фазовом пространстве динамической системы. Известны методы построения моделей, предсказывающих состояние системы на основе известной динамики поведения объекта (анализа данных наблюдений, временных рядов событий и т.п.). Аппарат нелинейной динамики, обычно используемый при решении задач такого рода, эффективен лишь в случаях, когда размерность модели невелика, так как с повышением размерности фазового пространства объём необходимых вычислений и требуемое количество учитываемых данных растут экспоненциально. При решении ряда задач большой размерности можно использовать тот факт, что фазовое пространство динамических систем может быть неоднородно в определённых областях и состояние системы с приемлемой точностью может быть охарактеризовано небольшим количеством некоторых переменных, описывающих проекцию малой размерности. Прочие переменные могут быть подчинены переменным проекции (называемым параметрами порядка) или несущественны с точки зрения описания системы. Компромисс между динамическими и статистическими методами представляет собой предложенное авторами [22] описание системы с помощью русел и джокеров, которое сочетает, по возможности, точность первых и простоту вторых методов, включая своеобразное применение техники асимптотического анализа. Вместе с тем, необходимо отметить, что пока не решена основная проблема, заключающаяся в установлении однозначного соответствия между наблюдаемыми свойствами реального объекта и соответствующими координатами, описывающими подобную проекцию малой размерности при математическом моделировании фазового пространства системы.

При построении альтернативной модели, дающей возможность обоснованного перехода от абстрактного фазового пространства динамической системы к реальным физическим параметрам и характеристикам реального объекта (ее прообраза) нами предложено использовать методы статистической физики [23-26], в предположении, что состояние системы может быть определено с помощью равновесного G и неравновесного Φ термодинамических потенциалов, зависящими от обобщенных координат q_i , представляющих некоторые функции от параметров системы. При этом можно выделить такие обобщенные координаты q_i , отклонения которых от их равновесных значений q_{0i} определяют изменение Φ с точностью до ма-

лых второго порядка. В первом приближении поведение системы описывается несколькими обобщенными координатами q_i , которые удобно выражать через симметрические координаты η_i или компоненты параметра порядка (ПП). Далее рассматриваются свойства динамической системы, которые определяются их восприимчивостями к внешним воздействиям. Первая производная Φ по отклонению q_i от q_{0i} определяет величину возвращающей силы. Если внешние условия таковы, что динамическая система находится вблизи границы лабильности равновесной фазы – состояние близко к критическому. При этом часть компонент тензора обобщенной обратной восприимчивости $(\chi^{-1})_{ik} = \partial^2 \Phi / \partial \eta_i \partial \eta_k$ аномально мала, по сравнению с их значениями в обычных условиях. Соответствующие аномально малые $(\chi^{-1})_{ik}$ обобщенные координаты (η_i, η_j) и сопряженные им внешние воздействия называются критическими, и эти компоненты тензора обобщенной восприимчивости определяют характер активности системы.

Такой подход к математическому моделированию позволяет найти соответствие между наблюдаемыми свойствами объекта и обобщенными координатами η_i , определяющими проекции малой размерности исследуемой динамической системы. Необходимо учитывать, что точное соответствие между обобщенными координатами q_i , используемыми для теоретического описания состояния динамической системы, и характеристиками реального объекта в большинстве случаев не только неочевидно, но и недостижимо. Тем не менее, в рамках предлагаемого подхода, показано, что ПП, представляющие собой симметрические координаты η_i , определяющие поведение системы в критической области, являются достаточно сложными функциями, зависящими от некоторой совокупности параметров состояния объекта.

Предложенное обоснование концепции интегральной диагностики позволяет осуществить экспериментальную оценку параметров порядка η_i на основе изучения характера активности исследуемой системы и измерения ее восприимчивостей к критическим внешним воздействиям. Получение эмпирических параметров порядка η_i позволяет перейти к построению математических моделей, адекватно описывающих изменения функциональных свойств, и формированию алгоритмов осуществления индивидуального прогноза критически важных узлов и элементов ПОО при условии установления необходимых функциональных и корреляционных связей между различными типами первичных данных и их динамическими характеристиками.

Литература

1. Белозеров В.В., Загускин С.Л., Прус Ю.В., Самойлов Л.К., Топольский Н.Г., Труфанов В.Н. Классификация объектов повышенной опасности и вероятностно-физические модели оценки их устойчивости и безопасности. – Безопасность жизнедеятельности. – 2001. – № 8.
2. ГОСТ Р 22.1.12 – 2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. – М.: Издательство стандартов, 2005. – 24 с.
3. Белозеров В.В., Босый С.И., Буйло С.И., Прус Ю.В. Современные методы диагностики материалов и изделий из них. – Ростов н/Д: ЮФУ, 2007. – 224 с.
4. Белозеров В.В., Босый С.И., Буйло С.И., Прус Ю.В., Удовиченко Ю.И., Хаишбашева С.В. Современные методы и средства диагностики и испытаний материалов и изделий из них. Электронный учебник по ИНОП № 05/6-98. – Ростов н/Д: ЮФУ, 2008. – <http://uran.ip.rsu.ru> (электронное учебное пособие on-line).
5. Прус Ю.В. Акустико-эмиссионные параметры повреждаемости и динамика диссипативных процессов при неупругом деформировании квазихрупких материалов. – Дефектоскопия РАН. – 1999. – № 8.
6. Прус Ю.В. Исследование физических механизмов диссипации при деформировании квазихрупких материалов методом акустической эмиссии. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1999. – № 1.
7. Prus Yu.V. Dynamics of dissipation processes during nonelastic deformation of quasi-brittle materials. – Ferroelectrics. – 2000. – Vol. 247.
8. Белозеров В.В., Буйло С.И., Прус Ю.В. Совмещенная термогравиметрическая и акустико-эмиссионная диагностика стадий термодеструкции веществ и материалов. – Дефектоскопия РАН. – 2008. – № 3.
9. Белозеров В.В., Строкань Г.П., Прус Ю.В., Бушкова Е.С. Электротермоакустический комплекс // в сб. науч. тр. науч.-тех. конф. "Научно-инновационное сотрудничество" по межотрасл. программе Минатома и Минобразования России, ч. 2., ISBN 5-7262-0403-4. - М., МИФИ, 2002. – С.78-79.
10. Белозеров В.В., Буйло С.И., Прус Ю.В. Криотермогравиметрия и термодинамические параметры деструкции материалов при циклическом термоударе. – Технологии техносферной безопасности. – 2007. – № 6.
11. Белозеров В.В., Буйло С.И., Прус Ю.В. Метод и комплекс бароэлектротермоакустического анализа в диагностике нано-, микро- и макроматериалов. – Технологии техносферной безопасности. – 2008. – № 1.
12. Белозеров В.В., Босый С.И., Буйло С.И., Прус Ю.В., Удовиченко Ю.И. Диагностика опасности материалов методом баротермоэлектротермометрии, сопряженной с акустической эмиссией. – Фундаментальные исследования. – 2008. – №2.
13. "Диагностика материалов" – <http://www.imet-db.ru/zavlabor>.
14. Энциклопедия кибернетики // в двух томах под ред. акад. Глушкова В.М., т. 2., УСЭ, 1974. – 465 с.
15. Энциклопедия кибернетики // в двух томах под ред. акад. Глушкова В.М., т. 1., УСЭ, 1974. – 401 с.
16. Политехнический словарь // под ред. акад. Артоболевского И.И. – М.: "Сов. энциклопедия", 1976. - С. 138.
17. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
18. Брагинский Р.П., Гнеденко Б.В., Молчанов С.А. и др. Математические моде-

ли старения полимерных изоляционных материалов. - Известия АН (сер. Матем.), 1982, Т. 23, № 5. – С. 281-284.

19. Белозеров В.В., Панченко Е.М., Строкань Г.П., Буйло С.И., Бушкова Е.С. Модель фазовых переходов третьего рода // в сб. тр. Межд. шк.-семинара "Применение симметрии и косиметрии в теории бифуркаций и фазовых переходов", SCDS-II 18-23.09.2001, Сочи. – Ростов н/Д: РГУ, 2001. - С. 23-31.

20. Полтораки О.М. Термодинамика в физической химии. - М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.

21. Барьяхтар В.Г., Галкин А.А. О переходе твердых тел из хрупкого в пластическое состояние // Доклады АН СССР (физика), Том 227, № 5, 1976. – С. 1079-1081.

22. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. – М.: УРСС, 2002.

23. Белозеров В.В., Марченко А. В., Прус Ю.В. Обоснование концепции интегральной диагностики критически важных узлов потенциально опасных объектов // Матер. 15-й междунар. конф. "Системы безопасности" – СБ-2006. – М: Академия ГПС МЧС России, 2006.

24. Белозеров В.В., Марченко А. В., Прус Ю.В. Концепция интегральной диагностики и феноменологический подход к моделированию динамических систем. – Матер. Всероссийской научн.-практ. конф. "Математика, информатика, естествознание в экономике и обществе". – М: МФЮА, 2006.

25. Белозеров В.В., Буйло С.И., Марченко А. В., Прус Ю.В., Тетерин И.М. Концепция интегральной диагностики и мониторинга технических объектов: феноменологический подход // Матер. 14-й междунар. конф. "Проблемы управления безопасностью сложных систем". – М: ИПУ РАН, 2006.

26. Прус Ю.В., Тетерин И.М., Топольский Н.Г. Проектирование систем мониторинга инженерного состояния технических объектов на основе концепции интегральной диагностики // Сб. тр. науч.-практ. конф "Перспективы развития новых технологий и разработки пожарно-спасательной техники". – М.: Эксподизайн – Пожкнига, 2007.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 30 октября 2009 г.