

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЯЭУ. ЭКСКУРС В ИСТОРИЮ

**В.Н. Богомолов**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



В статье описана история появления в СССР и ФЭИ нового научного направления – техническая диагностика ЯЭУ. Роль в его становлении и развитии Б.Ф. Громова, который сразу придал этому направлению практические смысл и направленность. Приводится описание некоторых результатов применения алгоритмов диагностирования на ППУ с ЖМТ.

День рождения в СССР нового тогда направления в технике эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ), которое сейчас знакомо каждому специалисту-реакторщику, а именно, «Техническое диагностирование ЯЭУ» можно установить достаточно точно. Это произошло 18 сентября 1973 г. на турбазе с. Шови Грузинской ССР, где в тот день на заседании Всесоюзной школы по обмену опытом в области физики и техники ядерных реакторов представитель ФЭИ А.И. Могильнер прочитал свою лекцию. Она называлась: «Физика реакторов и перспективы создания системы раннего обнаружения аварийных и предаварийных состояний реакторных установок». Именно в этой лекции перед ведущими учеными и специалистами страны по физике и технике ядерных реакторов впервые были сформулированы задачи и основные требования к системам диагностирования ЯЭУ. Хотя термин «диагностирование» Александром Иосифовичем непосредственно к технике тогда не применялся, а использовался только в поясняющих примерах из медицинской практики, но содержание лекции было, по сути, посвящено актуальным для того времени задачам технического диагностирования ЯЭУ. Были перечислены первоочередные задачи диагностирования ЯЭУ и даны схематичные алгоритмы их решений, которые предполагали широкое применение уже серьезно заявившей о себе в то время мобильной вычислительной техники, без применения которой оперативное решение большинства задач диагностирования ЯЭУ, как известно, невозможно. Предполагалось использование бортовых ЭВМ, когда речь заходила об энергетических установках транспортного назначения.

В ФЭИ новое направление «Техническое диагностирования ЯЭУ» поддержали не все, но многие. В числе последних был и Борис Федорович Громов. Причем поддержку он оказал со свойственной ему практичностью и самым конкретным образом. Он предложил разработать и внедрить несколько алгоритмов диагностирования на паропроизводящих установках (ППУ) с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ), спроектированных и построенных под научным руководством ФЭИ для атомных подводных лодок (АПЛ), базировавшихся на Северном флоте. Основным аргументом Б.Ф. Громова было то, что это наши установки. За их техническое состояние с нас и спрос должен быть по полной программе. Кроме того, в

ФЗИ достаточно специалистов, которые досконально знают конструкцию всех узлов ППУ. И, наконец, работать с персоналом, занимающимся эксплуатацией ППУ в условиях воинского единоначалия, существенно проще, нежели с персоналом АЭС, где главные «начальники» – план и экономика. Плюс ко всему, экипаж АПЛ более чем кто-либо заинтересован в надежной работе энергетического комплекса корабля, поскольку от надежной работы последнего часто зависит жизнь экипажа.

Аргументы Б.Ф. Громова были более чем убедительны и через некоторое время в лаборатории 66 ФЗИ была сформирована группа специалистов, занимавшихся разработкой алгоритмов технической диагностики ППУ транспортного назначения. Вначале был составлен перечень задач диагностирования ЯЭУ. Он получился весьма объемным. Обсуждение этого перечня со специалистами по эксплуатации, в основном с персоналом Первой в мире АЭС, БР-10 и начальниками смен стандов – прототипов ППУ АПЛ показало, что многие из перечисленных задач не актуальны. И в то же время некоторые важные для практики эксплуатации ППУ вопросы в первый вариант перечня не попали. Стало понятно, что задачи диагностирования должны выдвигаться в первую очередь практическими потребностями эксплуатации ЯЭУ, конструкторами установок, которые априори лучше других знают слабые места проектируемой установки. Однако в жизни всегда есть место трудностям. Так, мнения о приоритетах задач диагностирования у разных специалистов по эксплуатации могут существенно различаться, а конструкторы, в основном, видят слабые места в тех узлах установок, которые проектировали их коллеги. Разделить в подобной ситуации технику от психологии бывает трудно.

В ходе предварительных обсуждений списка задач диагностирования появилось убеждение, что он для такого сложного устройства как ППУ может быть огромным, если ставить задачу оценки технического состояния каждого сварного шва и деталей крепления механизмов, например. Такой подход, по понятным причинам, не мог быть реализован. И тогда, с участием Б.Ф. Громова, был составлен сравнительно небольшой список приоритетных задач диагностирования для ППУ с ЖМТ. В него вошли задачи, нацеленные, прежде всего, на решение вопросов безопасности, надежности и экономии ресурсов паропроизводящих установок. Для каждой задачи были составлены предварительные алгоритмы и выбраны методы решения, которые в соответствии со своей инструментально-методической базой получили следующие общие наименования:

- **режимные**, когда задачи диагностирования решаются на основании показаний штатных приборов технологического контроля ППУ, а для выявления неисправностей используются так называемые эталонные математические модели (ЭММ), которые позволяют с заданной вероятностью выявить заявленную неисправность по набору контролируемых параметров, имеющих отклонения от статистически обоснованной нормы (это задачи контроля работоспособности измерительных каналов, теплогидравлического состояния активной зоны, ухудшения работы сепараторов и пр.);
- **аппаратурные**, когда задачи диагностирования (чаще всего для выявления неисправностей, связанных с механическими повреждениями) решались путем использования специальной аппаратуры (это задачи выявления заеданий стержней СУЗ при их перемещениях в чехлах, вибраций трубопроводов, дисбалансов вращающихся узлов, протечек запорной арматуры);
- **режимно-аппаратурные**, которые основаны на применении как штатных, так и специальных датчиков контроля и для выявления заявленных неисправностей, в которых используются математические модели, построенные по показаниям штатных и специальных датчиков (это задачи обнаружения вибраций выемной части активной зоны, отдельных ТВС, стержней СУЗ).

Несмотря на основательную проработку данного вопроса, некоторые задачи диагностирования неисправностей ППУ, сформулированные в то время, не решены до сих пор, не столько по причине их сложности, сколько из-за неостребованности практикой эксплуатации. В то же время некоторые новые задачи диагностирования отдельных неисправностей решались в срочном порядке. Последнее связано, прежде всего, с тем, что жизнь установок, спроектированных даже весьма грамотными и опытными специалистами, проходит не всегда так, как было задумано. Жизнь оказывается отважнее самых смелых предположений. Кроме того, сложные технические объекты, предназначенные для длительного использования, какими являются ППУ, в процессе эксплуатации приобретают ряд индивидуальных особенностей, которые трудно предвидеть в период их создания. Поэтому на практике с энергоустановками подобного типа иногда случается то, что никак не предусматривалось проектом. Особенно если в их работу вмешивается господин Случай в паре с так называемым человеческим фактором.

Работы по диагностированию ППУ с ЖМТ было решено начать с разработки алгоритмов режимного диагностирования. Эти методы, как было сказано, не требуют специальной аппаратуры, цели и задачи, решаемые этими методами на первом этапе работ по диагностике, были определены. Но применение подобных алгоритмов требует разработки математических моделей, которые используются для диагностирования технического состояния ППУ и прогнозирования их остаточного ресурса.

Различают два в общем взаимосвязанных пути построения математических моделей. Первый, традиционный, заключается в максимальном использовании априорных знаний о физической природе процессов, свойствах материалов, функциональной структуре и структуре связей в ЯЭУ. При втором подходе действующая установка рассматривается как «черный ящик». Для математического моделирования при таком подходе используется экспериментальная и эксплуатационная информация и аппарат прикладной математики.

Первый и второй пути определяют два типа моделей. Модели первого типа разрабатываются и используются в качестве основополагающих на этапе проектирования установок. Модели второго типа строятся на основе наблюдения за реальным объектом. При решении задач диагностирования эффективный результат дает совместное использование обоих подходов.

К началу разработки алгоритмов оценки технического состояния ППУ с ЖМТ сами эти установки были не только построены, но и отработали заметную часть своего ресурса. Поэтому можно было бы использовать модели первого типа с уточненными коэффициентами, входящими в уравнения, используемые для описания теплофизических процессов. Решая обратные задачи гидродинамики и теплопроводности, можно получать сведения об изменении внутренних, неконтролируемых характеристик ППУ. Однако использовать этот, казалось бы, простой прием практически очень сложно ввиду его чрезвычайной громоздкости и неоднозначности. Поскольку приходится задавать серии неисправностей и сличать затем результаты расчета со значениями наблюдаемых контролируемых параметров установки. При наложении неисправностей, что часто имеет место на практике, число требующих расчета вариантов экспоненциально возрастает. А уверенность в достоверности выводов, естественно, падает.

Поэтому основная часть алгоритмов режимного диагностирования для ППУ с ЖМТ разрабатывалась на основе моделей второго типа, а модели первого типа использовались для оценки влияния (чувствительности) предполагаемых неисправностей на контролируемые параметры ППУ. Реализация такого подхода дава-

ла, как показал опыт применения алгоритмов подобного типа, практически всегда хорошие результаты.

Для построения моделей второго типа необходимо иметь массивы экспериментальных данных в виде матриц наблюдений (обучающих выборок), в которых записаны значения контролируемых параметров ППУ в различных режимах ее эксплуатации. Обычно для этих целей используют результаты планированного эксперимента. В нашем же случае даже просто употребление слова «эксперимент» было нежелательным. Считалось, и были к тому основания, что проведение любых, даже самых безопасных экспериментов на ППУ действующей АПЛ никто не разрешит (хотя до Чернобыля было еще почти двадцать лет). Следовательно, нужно использовать данные так называемого пассивного эксперимента, полученные в ходе текущей эксплуатации реакторных установок. Эти данные можно было получить только путем выписок из вахтенных журналов ППУ, которые, к счастью, ведутся согласно установленному регламенту с воинской пунктуальностью. Заполучить же эти журналы в оригинале или их полные копии, как выяснилось, практически невозможно.

В ФЭИ к тому времени, о котором идет речь, уже длительное время работала группа специалистов, периодически ездившая на базу ВМФ Северного флота, где базировались АПЛ с ППУ, у которых в качестве теплоносителя использовался сплав свинца с висмутом. Специалисты ФЭИ занимались в основном регламентными проверками. Этими проверками, фактически, решались некоторые задачи диагностирования ППУ, но своими, традиционными для того времени, методами. В частности, эти работы были ориентированы на выявление и объяснение несоответствий расчетных и реальных характеристик установок. В основном же при проведении регламентов выполнялись измерения отдельных, важных для эксплуатации, характеристик установок, проверялась работоспособность контрольно-измерительных приборов, первичных преобразователей и т.д. Специалисты этой группы имели налаженные контакты с членами экипажей АПЛ, обслуживающих ППУ.

После подключения специалистов лаборатории бб к решению задач диагностирования, некоторые ее сотрудники также регулярно (не реже, чем раз в квартал) выезжали на эту базу для сбора информации, накапливаемой в вахтенных журналах ППУ. В них фиксировались с определенной периодичностью значения всех контролируемых параметров, а также некоторые специфические данные. Была выполнена большая организационно-техническая работа по разработке требований к интересующим специалистов по диагностике режимам работы ППУ, объемам, а также способам оформления и доставки этой информации, имевшей определенный гриф секретности, с базы в лаборатории ФЭИ.

Поскольку запись контролируемых параметров ППУ инженером управления выполнялась вручную в течение 5-ти и даже более минут, то переписывать из вахтенных журналов параметры установки при переходных режимах не имело смысла, т.к. они, получалось, не были согласованы по времени. Были и другие «тонкости», которые иногда требовалось выяснять на месте у специалистов по эксплуатации. Здесь уместно отметить, что контакт с этими специалистами, как и предполагал Борис Федорович, был налажен быстро. Он был прочным, всегда благожелательным со стороны экипажей кораблей и часто дружественным. Даже суровые по должности командиры экипажей относились к работникам ФЭИ довольно благожелательно и иногда шли на мелкие послабления к режимам их пребывания на АПЛ (не прерывалась работа с документами во время учебных тревог, перешвартовок бортов к причалам).

Сбор информации начали с ретроспективных данных, накопленных к тому времени в вахтенных журналах ППУ. Естественно, что АПЛ (между собой все их называли заказами, по номерам, присвоенных кораблям еще на судостроительных предприятиях) имели разные сроки службы, а ядерные реакторы ППУ разных АПЛ соответственно разные наработки. Спасали порядки, установленные в ВМФ, по которым все корабельные вахтенные журналы должны находиться на месте его базирования. Поэтому получить на базе документацию по режимам эксплуатации ППУ для выполнения выписок за годичный и более срок, особого труда не составляло.

Одной из первоочередных задач, которые были в списке, значилось определение остаточного энергозапаса (разности между энергоресурсом реактора, который нужно было определить с максимально возможной точностью, и его энерговыработкой, которая известна по записям в вахтенных журналах). Эта величина, особенно для конца кампании реактора, имеет важное значение для всех энергетических установок, а для установок транспортного назначения она приобретает особый смысл. Требовалось определять величину остаточного энергозапаса к концу кампании реактора с погрешностью, которая не превышала бы 3% от реального (не расчетного!) энергоресурса, т.е. нужно было вначале оценить реальное значение энергоресурса. Для решения задачи привлекались методы статистического прогнозирования. Доверительные интервалы прогноза для всех величин следовало вычислять с 2-процентным уровнем значимости (директивное требование).

Поскольку энергоресурс реактора, в принципе, зависит от мощности, на которой планируется работа реактора в конце кампании, а она не была определена, то эту задачу свели к построению кривой энерговыработки для реактора, находящегося на минимально контролируемом уровне мощности. Последняя характеризует изменение запаса реактивности в процессе эксплуатации реактора в зависимости от энерговыработки для выбранного режима. Кривая энерговыработки (для уменьшения разброса около моделирующей аппроксимации) строится по экспериментальным данным для некоторых заданных режимов эксплуатации. Таких характерных режимов, после анализа данных из вахтенных журналов ППУ, было выбрано три. Они определялись мощностью реактора и температурными и гидродинамическими режимами, которые наряду с положением органов регулирования, компенсации, отравлением шлаками и т.д. давали вклад в реактивность. Экстраполяция кривой энерговыработки до пересечения с линией, определяющей значение предельного запаса реактивности, которое задается директивно, дает прогнозную оценку фактического энергозапаса. Естественно, что для получения удовлетворительной по точности прогнозной оценки энергозапаса необходимо иметь очень надежную аппроксимацию кривой энерговыработки.

Уже на первых шагах работы над математической аппроксимацией кривой энерговыработки для реакторов с ЖМТ было обнаружено:

- а) каждая реакторная установка имеет свои индивидуальные коэффициенты реактивности мощностных и гидродинамических эффектов;
- б) кривые энерговыработки, после корректного индивидуального учета эффектов реактивности от разных составляющих, хорошо описываются полиномом второго порядка, т.е. они гладкие, с нарастающим темпом выгорания, поэтому прогнозные оценки энергоресурсов, полученные с помощью этих кривых, будут достаточно надежны.

Было выявлено, что единицы энерговыработки, записываемые в вахтенных журналах различных ППУ как МВтЧч, одинаковыми, как и следовало ожидать, являются только в буквенных обозначениях. В действительности же они заметно (по

нашим оценкам до 10%) разнятся между собой. Более того, они меняются в процессе эксплуатации и их значения периодически корректируются. Поэтому прогноз остаточного энергозапаса, полученный из экспериментальных данных в «персональных» для каждой ППУ единицах энерговыработки, имел понятное и более значимое, чем постулируемое расчетом содержание.

Точность прогноза остаточного энергозапаса, полученного по данной методике, к концу кампании превзошла заданное значение (3%). Для КМ-1, например, наземного стенда-прототипа ППУ с ЖМТ, который выработал энергоресурс полностью, относительная ошибка прогноза, вычисленная для 2-процентного уровня значимости, составляла 1.74% от его фактической величины. Для корабельных ППУ, отработавших 50 и более процентов расчетного энергозапаса, эти ошибки были на уровне 3, 5÷5%. Была вполне обоснованная уверенность, что к концу кампании ошибка прогноза остаточного энергозапаса будет не более 3% от полученных оценок энергоресурсов для каждой ППУ, находившейся в эксплуатации.

Кроме решения задачи прогнозирования остаточного энергозапаса, данная методика позволила оперативно выявлять ошибки в учете энерговыработки. Такие ошибки были совсем нередки и составляли иногда заметные доли процента номинального энергозапаса. Проявлялись они в виде скачков на кривой энерговыработки и были обусловлены чисто человеческим фактором – элементарными арифметическими ошибками при подсчете энерговыработки за смену (вахту). Приходилось настаивать на исправлении этих ошибок непосредственно в вахтенных журналах ППУ. Сначала морякам это очень не нравилось, но потом они нашли способ делать это с малым для своего престижа ущербом, да и ошибаться стали заметно меньше.

Наиболее ярко проявились возможности этой методики при выявлении последствий неисправности, появившейся на одной из АПЛ – поломке масляного уплотнения насоса первого контура. В результате этого в контур с ЖМТ систематически попадало машинное масло. Именно эта методика, использовавшаяся в качестве «метода медленного баланса реактивности» (в отличие от быстрого, работавшего в режиме реального времени), позволила проследить «судьбу» масла. Оказалось, что оно достаточно медленно (в течение недель) могло накапливаться в активной зоне реактора, находившейся при достаточно низкой (до 300°C) температуре. При этом запас реактивности, определяемый по кривой энерговыработки, увеличивался до 2 и даже несколько более  $\beta_{эфф}$ . При выходе реактора на энергетические уровни мощности, когда температура сплава повышалась до ~440°C, масло очень быстро, в течение секунд, разлагалось на легко испаряемую жидкую и газообразную фракции. Первая конденсировалась в аварийном конденсаторе (АК), а вторая поступала в газовый контур (ГК). До замены масляного уплотнения насоса приходилось периодически сливать продукты пиролиза масла из АК и продувать ГК. Процесс разложения масла сопровождался колебаниями сплава в буферной емкости и изменением положения органов регулирования реактора. Примечательно, что эти эффекты были «обнаружены» после предсказания их появления по диагностической модели. Дело в том, что разложение масла происходило в период выхода на энергетические уровни мощности. Поэтому обнаружить их без специального изучения динамики процесса было непросто.

В значительной мере для возможности оперативного решения этой «масляной» задачи было разработано дополнение к методике определения остаточного энергозапаса. Оно заключалось в выдаче прогнозных оценок положений органов регулирования и компенсации реактивности. Результаты прогнозов представлялись в виде специальных распечаток. По ним можно было достаточно быстро, за не-

сколько минут определить фактическое значение запаса реактивности для одного из характерных уровней мощности ППУ. Результаты прогноза запаса реактивности по кривой энерговыработки к тому времени были настолько надежны и точны, что при фиксации выхода фактического значения запаса реактивности за пределы доверительного интервала прогноза можно было уверенно утверждать о появлении аномалии. Далее нужно было искать причины ее появления (масло в активной зоне, ошибки в подсчете энерговыработки и т.д.). Такие распечатки готовились для всех ППУ с ЖМТ и выдавались персоналу, занятому их эксплуатацией.

Несколько другой подход использовался для диагностирования технического состояния теплообменных устройств, входящих в виде составных элементов в ППУ. Он предполагает использование системной связи параметров между собой. Внутренние параметры таких устройств (проходные сечения, коэффициенты теплопередачи) сохраняют или медленно меняют свои значения в процессе эксплуатации. Такое постепенное изменение параметров можно характеризовать как старение установки. И, если предельные значения параметров заданы, то имеется принципиальная возможность оценить остаточный ресурс.

Важным этапом решения задач диагностирования подобным образом является построение адекватной математической модели. При ее разработке необходимо оптимально сочетать априорные представления об объекте и данные непосредственного наблюдения за ним. Информация, полученная во время сдаточных испытаний, в начальный период эксплуатации, необходима для уточнения (в случае моделей 1-го типа) или определения (в моделях 2-го типа) структуры и параметров модели. Далее речь пойдет о моделях 2-го типа.

На основе статистической информации, получаемой на стадии построения модели по результатам наблюдения над объектом диагностирования, можно вычислить доверительные интервалы прогноза текущих значений выходных параметров ППУ с заданным уровнем значимости. Если в период эксплуатации, когда собиралась информация для построения модели, объект устойчиво выполнял свои функции, то эти его состояния можно принимать за норму, а построенную по этим данным модель считать эталонной. В процессе эксплуатации объекта диагностирования может наблюдаться постепенное расхождение между измеряемыми и восстановленными по ЭММ выходными параметрами. Если модель адекватна объекту, то эти расхождения можно считать обусловленными естественными процессами старения, т.е. процессами систематического накопления неисправности.

Для контроля технического состояния объекта диагностирования целесообразно проводить анализ остатков – разностей между наблюдаемыми и вычисленными по ЭММ значениями выходных параметров. В данном случае остатки играют роль свертки диагностических параметров, на основании поведения (тренда) которых оцениваются их прогнозные значения на заданном интервале упреждения и доверительные интервалы прогноза. Если величины остатков, вычисленные для очередного периода эксплуатации ППУ, не выходят за доверительные интервалы прогноза, то нет оснований для выводов о возникновении непредвиденных, отличных от процесса старения аномалий.

Если же значения остатков выходят за доверительные интервалы прогноза, то есть основания для фиксации аномалий. Идентификация вида аномалии проводится на основе совокупного анализа остатков всех выходных параметров. Однозначность идентификации зависит от контролепригодности объекта диагностирования и полноты его описания ЭММ.

Анализ временных рядов остатков позволяет использовать их не только для решения задач диагностирования, но и для прогнозирования остаточного ресурса

са ППУ. Так, если задано предельное значение выходного параметра, то экстраполируя выявленный тренд остатков, несложно оценить момент, когда данный параметр его достигнет.

В качестве иллюстрации эффективности такого подхода для решения задач диагностирования технического состояния теплотехнического оборудования приведем пример его использования для выявления развивающейся во времени неисправности, приведшей к изменению кратности циркуляции, и соответственно к снижению температуры котловой воды ( $T_{KB}$ ), в одной из парогенерирующих петель ППУ. ЭММ для  $T_{KB}$  была получена в виде множественной регрессии вида:

$$T_{KB} = a_0 + a_1 \cdot N + a_2 \cdot N^2 + a_3 \cdot P_{\text{Сеп.}} + a_4 \cdot T_{\text{ПВ}}, \quad (1)$$

где  $a_{0...4}$  – коэффициенты регрессии;  $N$  – мощность ядерного реактора;  $P_{\text{Сеп.}}$  – давление в сепараторе парогенерирующей петли ППУ;  $T_{\text{ПВ}}$  – температура питательной воды, идущей на подпитку сепаратора.

Отбор информативных параметров этой модели проводился на основании результатов расчета по теплофизической модели. Коэффициенты регрессии вычислены по экспериментальным данным, полученным во время заводских испытаний и в начальный период эксплуатации ППУ. Затем в процессе эксплуатации ППУ производились замеры входных параметров (в нашем примере это  $N$ ,  $P_{\text{Сеп.}}$  и  $T_{\text{ПВ}}$ ), по которым с помощью ЭММ вычислялись выходные параметры (в нашем примере это  $T_{KB}$ ), которые сравнивались с непосредственно измеренными на этот момент времени. Было отмечено, что в процессе эксплуатации ППУ остатки ( $\Delta T_{KB}$ ) для этой петли (расхождения между наблюдаемыми и восстановленными по ЭММ значениями  $T_{KB}$ ) постепенно увеличиваются. При этом они удовлетворительно описываются линейной регрессией относительно энерговыработки ( $Q$ ):

$$\Delta T_{KB}(Q) = T_{KB}(Q) - \bar{T}_{KB}(Q) = b_0 + b_1 \cdot Q, \quad (2)$$

где  $b_0$  и  $b_1$  – коэффициенты регрессии;  $T_{KB}(Q)$  и  $\bar{T}_{KB}(Q)$  – непосредственно измеренные и восстановленные по ЭММ значения  $T_{KB}$  для текущих значений энерговыработки  $Q$  соответственно.

По регрессии, правой части соотношения (2), оценивались прогнозные значения  $\Delta T_{KB}(Q)$  для заданного значения  $Q$ . Для этих значений энерговыработки по известным методикам [1, 2] вычислялись доверительные интервалы прогноза. Характер тренда остатков позволял сделать вывод, что он обусловлен снижением кратности циркуляции в этой петле парогенератора (ПГ). При выявленном темпе развития неисправности (наблюдаемом вплоть до наработки  $Q \approx 40$  усл. ед.) параметр  $T_{KB}$  не должен был достигать своих предельных значений до конца расчетного ресурса.

Однако вследствие появления и развития внезапной неисправности в этой петле ПГ картина изменилась. Она представлена на рис. 1, где показано поведение  $\Delta T_{KB}(Q)$  за период наблюдений до появления неисправности и в ходе ее развития. Точками на рисунке обозначены остатки  $T_{KB}$ , полученные по экспериментальным данным, сплошной линией представлена аппроксимация тренда остатков регрессией (2), пунктиром – двусторонние границы доверительных интервалов с 2-процентным уровнем значимости. Рис. 1 наглядно иллюстрирует, что после значения  $Q \geq 43$  усл. ед.  $\Delta T_{KB}(Q)$  устойчиво выходят за нижнюю границу доверительного интервала прогноза, достигая отклонения в  $\sim 5.5$  его значений при  $Q \approx 46$ . Это указывает на 100-процентную фиксацию аномалии в виде снижения кратности циркуляции в данной петле ПГ. При этом важно то, что данная неисправность по времени (первые ее признаки) были зафиксированы задолго (за неделю) до подхода



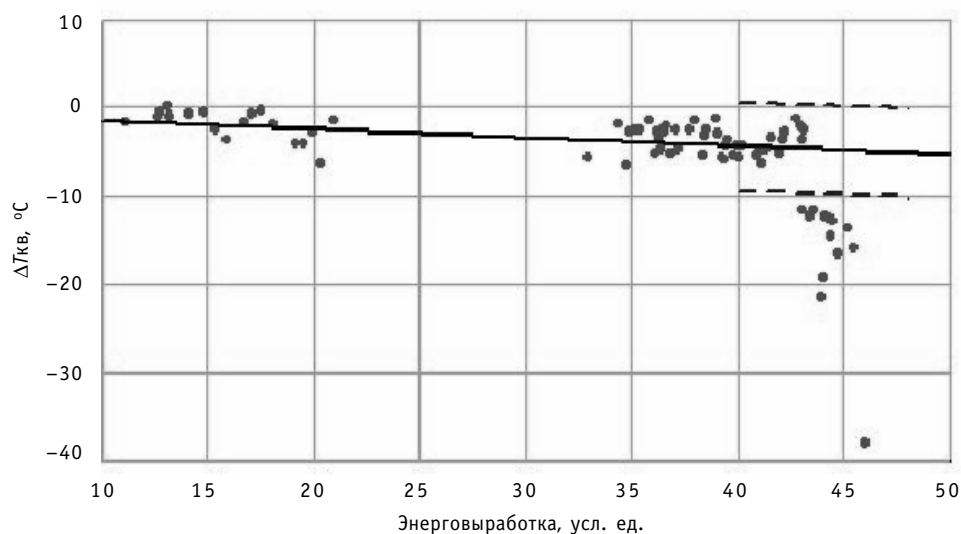


Рис. 1. Поведение остатков  $T_{KB}$  в зависимости от энерговыработки при появлении и развитии внезапной неисправности: — — матожидание прогноза; ● — экспериментальные данные; — — — границы доверительного интервала прогноза с 2-процентным уровнем значимости

контролируемого параметра ( $T_{KB}$ ) к критическому значению.

Аналогичные выводы можно было сделать и по другим остаткам контролируемых параметров ППУ, реагирующим на изменение кратности циркуляции в данной петле теплообмена. Анализируя величины и знаки остатков всей совокупности параметров ППУ, оказалось возможным идентифицировать с необходимой для практического применения надежностью эту, а также ряд других предполагаемых неисправностей.

Результаты подобных проверок, особенно если при этом обнаруживались признаки аномалий, немедленно докладывались Б.Ф. Громову. Причем доклады эти проводились в присутствии достаточно широкого круга специалистов и проходили в регламенте научного семинара, где каждый присутствующий мог высказать свою точку зрения на тот или иной факт, вывод и др. Иногда такие обсуждения результатов диагностирования проходили достаточно бурно, вызвали всплески эмоций, но усилиями Бориса Федоровича всегда были направлены на практический результат — повышение надежности и безопасности эксплуатации диагностируемых ППУ.

Сейчас, по прошествии почти двадцати лет, можно совершенно четко констатировать, что реализация предложений Б.Ф. Громова о внедрении методов диагностирования в практику эксплуатации ППУ с ЖМТ принесла ощутимую пользу не только технике, используемой в ВМФ, но и собственно самому этому научному направлению — технической диагностике ЯЭУ. Во многом благодаря именно этим работам в ФЭИ сформировалась, развилась и «вышла в свет» общепризнанная теперь в России школа технического диагностирования ЯЭУ.

### Литература

1. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. — М.: Статистика, 1977.
2. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика. — М.: Финансы и статистика, 1982.

Поступила в редакцию 1.09.2006

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039

*Boris Fedorovich Gromov. From a Student to Principal Scientific Leader\G.I. Toshinsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages. – References – 2 titles.*

The article describes some biographical features of B.F. Gromov's activity and initiation of a principally new nuclear power installation with lead-bismuth liquid metal coolant. The complicated problems which had to be solved by many organizations and, first of all, by IPPE under B.F. Gromov's scientific supervision are presented. The causes of failures of reactor installations, the methods of elimination of those causes during the process of mastering the nuclear power technology, which was and is remaining unique in the world, have been considered.

### УДК 621.039.52

*NPP Technical Diagnostics. Excursion to a History\V.N. Bogomolov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 9 pages, 1 illustration. – References – 2 titles.*

The history of occurrence of the NPP technical diagnostics as a new scientific branch is described. The B.F. Gromov's role is stated, who right away put a practical sense and orientation into the direction. The description of diagnostic algorithms of NPP with liquid metal are resulted.

### УДК 621.039.534.6

*Capsule Solid Electrolyte Gauges for the Control of Oxygen in Metal Melts and Combustible Gases in an Atmosphere\ P.N. Martynov, M.E. Chernov, V.M. Shelemetev, A.N. Storozhenko, R.P. Sadovnichiy; – Obninsk, 2007. – 6 pages, 4 illustrations. – References – 7 titles.*

Results of researches on development of gauges of thermodynamic activity of oxygen in lead containing metal melts, and also gauges for early detection and the control of oxygen, hydrogen and other combustible gases in an atmosphere are resulted. Developed solid electrolyte gauges of oxygen have passed metrological certification and are brought in the State registry of means of measurements. It is shown, that gauges for the control of the maintenance of oxygen over gas, including combustible impurity, possess an opportunity to make early detection of small concentration of such impurity.

### УДК 621.039.534

*Problem Polonium in Nuclear Power Plant with Lead-Bismuth as a Coolant\ D.V. Pankratov, V.N. Bolchovitinov, M.I. Bugreev, V.D. Kuranov, L.D. Ryabaya, G.I. Toshinsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages. – References – 6 titles.*

The paper presents experience of performing works at the nuclear submarines' nuclear power installations and at the ground facilities-prototypes with lead-bismuth cooled reactors in polonium contamination conditions. The certain results of fundamental researches realized in SSC RF - IPPE and abroad concerning investigations in polonium release out of lead-based polonium-containing media being heated in vacuum and gas atmosphere, studies of chemical forms of polonium, laws of forming the radiation conditions are described.

The regular medical and biological examinations of the personnel who took part in operating the installations, repair works and liquidation of the accidents' consequences have not revealed the casualties of polonium irradiation over the established sanitary standards.

The analysis of the information presented makes it possible to conclude: formation of polonium in lead-bismuth coolant is not an argument against its use in reactors of nuclear power installations.