

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПО ОБНАРУЖЕНИЮ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ С НЕГЕРМЕТИЧНЫМ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ

А.М. Загребаев, И.В. Ожегин

*Московский инженерно-физический институт (государственный университет),
г. Москва*



Рассматривается проблема поиска негерметичных тепловыделяющих элементов. Описываются принципы функционирования автоматизированной системы по обнаружению тепловыделяющей сборки (ТВС) с негерметичным твэлом.

Оперативное обнаружение ТВС с негерметичным тепловыделяющим элементом (твэлом) остается актуальной задачей на протяжении всего периода эксплуатации энергоблоков с одноконтурными реакторами типа РБМК-1000.

Правила ядерной безопасности накладывают определенные требования на количество негерметичных ТВС в активной зоне (АЗ) реактора и ставят задачу своевременного обнаружения даже слабонерметичных твэлов.

Система контроля герметичности оболочек (КГО) состоит из поканальной и пробоотборной частей. Пробоотборная часть предназначена для непрерывного контроля активности продуктов деления в паре барабан-сепаратора (БС) сцинтилляционным детектором. Система контролирует каждый из четырех БС независимо, что позволяет при появлении роста активности пара в одном из них локализовать каналы одной четвертой части активной зоны, где находится ТВС с негерметичным тепловыделяющим элементом.

Определение конкретной ТВС с негерметичным твэлом производится с помощью поканальной КГО. При этом активность детектируется последовательно в каждой ТВС в выбранных энергетических диапазонах («окнах») датчиком, перемещаемым специальной тележкой вдоль рядов пароводяных коммуникаций (ПВК) (рис.1).

В настоящее время решение задачи поиска негерметичных ТВС осуществляется за счет внедрения на АЭС с реакторами РБМК нового поколения аппаратуры контроля герметичности оболочек (АКГО) [2]. Данная аппаратура обладает большими возможностями регистрации, применения изоощренных алгоритмов математической обработки, хранения и обработки больших объемов эксплуатационной информации.

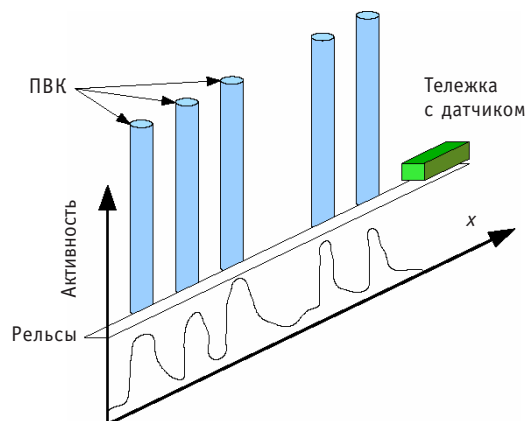


Рис. 1. Схема прокатки и получения активности теплоносителя поканальной КГО

Вместе с тем используемые и разрабатываемые методики обнаружения ТВС с негерметичным твэлом в конечном итоге оставляют решение за человеком, который при этом руководствуется не только данными обработки сигналов КГО, нормативными документами и инструкциями, но и собственным опытом, принимая во внимание множество неформализуемых факторов.

Причина сложности поиска негерметичных ТВС заключена в том, что водный теплоноситель в активной зоне активируется быстрыми нейтронами, что приводит к образованию радионуклида ^{16}N , рассеянное гамма-излучение которого в энергетическом диапазоне (0,3–1,0 МэВ) по своей интенсивности на два порядка превышает интенсивность излучения от продуктов деления [3] (рис. 2).

Используемая в настоящее время методика компенсации азотной составляющей основана на линейной модели: для герметичного канала количество отсчетов W в «сигнальном окне» (0,3–1,0 МэВ) пропорционально количеству отсчетов X в «азотном окне» (3,5–7,5 МэВ). Таким образом, вклад радионуклидов G , вышедших из под оболочки твэла, рассчитывается по следующей формуле:

$$G = W - K_A \cdot X, \quad (1)$$

где K_A – коэффициент компенсации, вычисленный на основе данных по всем каналам с ТВС в нитке [2].

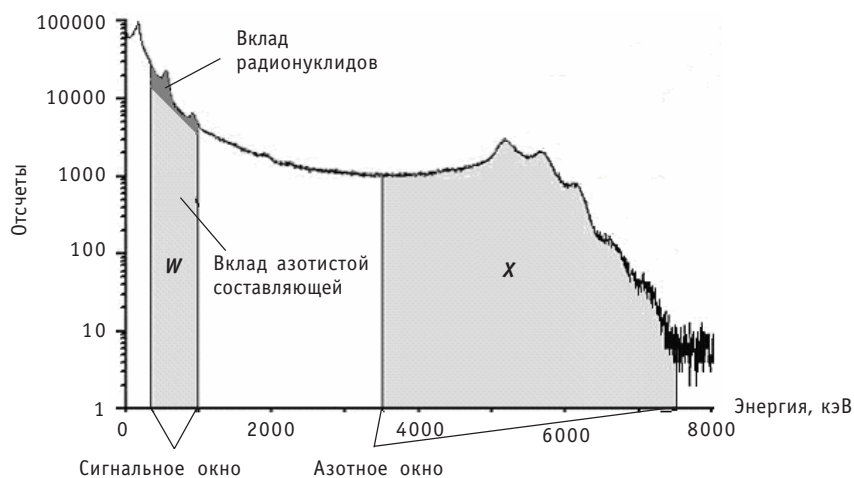


Рис. 2. Энергетический спектр тепловыделяющей сборки

Результатом обработки одиночного измерения являются относительные величины (так называемые «сигмы»), нормирующие вклады продуктов деления на показатели, нивелирующие статистические погрешности измерительных приборов и их настроек в данном конкретном измерении:

$$\Delta_k = \frac{G_k - G_0}{\sigma_G}, \quad (2)$$

где $G_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i$ – среднее значение счета по всем ТВС данной нитки;

$D_G = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (G_i - G_0)^2$ – дисперсия выборки; $\sigma_G = \sqrt{D_G}$ – стандартное отклонение.

По многим измерениям для каждой k -ой ячейки реактора строятся временные ряды Δ_i^k и по их поведению оценивается вероятность разгерметизации. На рис. 3 показан пример быстро развивающейся негерметичности [2].

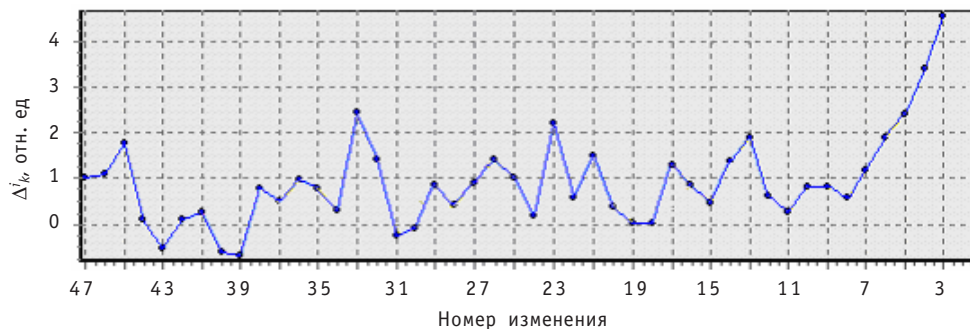


Рис. 3. Пример быстро развивающейся негерметичности

На этом этапе поиска необходим визуальный анализ временных рядов показателей негерметичности каналов, что является наиболее сложным и трудоемким. Инженер КГО при поиске нужной ТВС зачастую просматривает все сборки без исключения, поскольку штатная система не всегда может выявить слабую или развивающуюся негерметичность.

В связи с этим возникает задача по разработке автоматизированной системы (АС), позволяющей использовать как результаты математической обработки экспериментальных данных, так и эвристические соображения человека, принимающего решения, более оперативно и надежно обнаруживать ТВС с негерметичным твэлом.

В основе предлагаемого метода лежит расчет вероятностей появления негерметичности твэлов. Данными для расчета служат временные ряды показателей негерметичности («сигмы»). Те твэлы, у которых вероятность разгерметизации ниже некоторого уровня, отсортировываются как заведомо герметичные, а оставшиеся представляются инженеру КГО для дальнейшего анализа.

Стратегия принятия решения базируется на теореме Байеса. Априорные вероятности некоторых гипотез (например, гипотезой является предположение о том, что в данной ТВС один из твэлов является газонеплотным) изменяются в процессе получения информации, связанной с гипотезами [4], например, анализируется состояние i -ой ТВС. Возможны две гипотезы относительно ее состояния:

H_i : все твэлы герметичны;

\tilde{H}_i : хотя бы один из твэлов негерметичен.

Эти два события образуют полную группу несовместных событий. Поэтому, если $P(H_i)$ – априорная вероятность того, что в i -ой ТВС все твэлы герметичны, а $P(\tilde{H}_i)$ – априорная вероятность того, что в i -ой ТВС хотя бы один из твэлов негерметичен, то $P(\tilde{H}_i) = 1 - P(H_i)$.

Наряду с выдвинутыми гипотезами рассматриваются факты, которые могут быть с ними связаны и реализуются либо в процессе эксперимента, либо в результате расчета. Эти факты называются свидетельствами. Примеры свидетельств гипотезы о негерметичности:

- прирост счета пробоотборной СКГО определенного БС;
- прирост счета детекторов активности устройства сжигания гремучей смеси (УСГС);
- увеличение удельной активности галогенов (I-131) на входе системы водоочистки (СВО);
- увеличение удельной активности инертного радиоактивного газа (ИРГ) (Xe-135) в паре БС;
- прирост интенсивности излучения от ТВС в низкоэнергетической области (сигнальных окнах) с вычетом азотной составляющей;
- появление и прирост удельных активностей реперных радионуклидов в спектре пробоотборной СКГО;
- количество выходов мощности ТВС за определенные пределы в процессе эксплуатации;
- количество выходов расхода теплоносителя в ТВС за определенные пределы в процессе эксплуатации;
- количество выходов за уставки по линейной нагрузке;
- неоднократность перегрузки ТВС;
- дисперсия мощности в процессе эксплуатации более некоторого значения D_{W_i} ;
- дисперсия расхода в процессе эксплуатации более некоторого значения D_G .

Каждому из свидетельств E_i ставится в соответствие его условная вероятность $P(E_j / \tilde{H}_i)$ относительно гипотезы \tilde{H}_i , т.е. вероятность появления свидетельства E_i , если гипотеза \tilde{H}_i о негерметичности твэла в i -ой ТВС реализовалась.

Вероятность одновременного наступления событий (в i -ой ТВС есть негерметичный твэл и реализовалось свидетельство E_i) по теореме умножения вероятностей есть

$$P(\tilde{H}_i \cdot E_j) = P(\tilde{H}_i) \cdot P(E_j / \tilde{H}_i) = P(E_j) \cdot P(\tilde{H}_i / E_j). \quad (3)$$

С другой стороны, вероятность реализации свидетельства E_i есть

$$P(E_j) = P(\tilde{H}_i) \cdot P(E_j / \tilde{H}_i) + P(H_i) \cdot P(E_j / H_i) = P(\tilde{H}_i) \cdot P(E_j / \tilde{H}_i) + (1 - P(\tilde{H}_i)) P(E_j / H_i).$$

Отсюда следует, что если свидетельство E_i реализовалось, то по теореме Байеса получим апостериорную вероятность реализации гипотезы о негерметичности твэлов в ТВС:

$$P(\tilde{H}_i / E_j) = \frac{P(\tilde{H}_i) \cdot P(E_j / \tilde{H}_i)}{P(\tilde{H}_i) \cdot P(E_j / \tilde{H}_i) + (1 - P(\tilde{H}_i)) P(E_j / H_i)}. \quad (4)$$

Но может случиться так, что свидетельство E_i не реализовалось (не E_i), а твэл в ТВС все равно негерметичен, тогда вероятность этого события есть

$$P(\tilde{H}_i \cdot (\text{не } E_j)) = P(\tilde{H}_i) \cdot P(\text{не } E_j / \tilde{H}_i) = P(\text{не } E_j) P(\tilde{H}_i / \text{не } E_j). \quad (5)$$

$$P(\text{не } E_j) = 1 - P(\tilde{H}_i) \cdot P(E_j / \tilde{H}_i) - (1 - P(\tilde{H}_i)) P(E_j / H_i). \quad (6)$$

Из этих соотношений получим, что если свидетельство E_j не реализовалось, то апостериорная вероятность реализации гипотезы о негерметичности твэлов в составе ТВС

$$P(\tilde{H}_i / \text{не } E_j) = \frac{P(\tilde{H}_i) \cdot P(\text{не } E_j / \tilde{H}_i)}{P(\text{не } E_j)} = \frac{P(\tilde{H}_i) \cdot (1 - P(E_j / \tilde{H}_i))}{1 - P(\tilde{H}_i) \cdot P(E_j / \tilde{H}_i) - (1 - P(\tilde{H}_i))P(E_j / H_i)}. \quad (7)$$

Соотношения (4) и (7) позволяют оценить ценность свидетельства E_j как модуль разности $|P(\tilde{H}_i / E_j) - P(\tilde{H}_i / \text{не } E_j)|$.

Для последующего свидетельства рассчитанные по формулам апостериорные вероятности гипотез рассматриваются уже как текущие априорные. Для каждой гипотезы рассчитывается апостериорная вероятность после перебора всех свидетельств. Гипотеза с максимальной вероятностью определяет наиболее подозрительную ТВС.

Функционирование данной схемы происходит следующим образом. Во-первых, принимается, что свидетельства статистически независимы. Автоматизированная система задает вопрос пользователю, например, присутствует ли рост интенсивности счета в паре БС? В зависимости от его ответа (либо «да», либо «нет») происходит пересчет исходной априорной вероятности по формулам либо (4), либо (7).

Как видно из вышеизложенного, для функционирования системы необходимо знать априорную вероятность гипотезы $P(\tilde{H}_i)$, а также вероятности свидетельства E_j : для ТВС с гарантированно негерметичным твэлом $P(E_j / \tilde{H}_i)$, для ТВС с гарантированно герметичными твэлами $P(E_j / H_i)$. Эти данные могут быть получены из баз данных измерений активности АКГО, базы данных технологических параметров, базы данных по «Настоя», базы данных математических моделей активации и критериев обнаружения ТВС с негерметичным твэлом.

Поскольку эвристические знания в целом нельзя считать полностью выделенными и фиксированными, а кроме того исходные данные для логического вывода зачастую имеют нечеткие значения, ответ на вопрос о наличии каждого свидетельства существует не в двух вариантах (однозначно есть и однозначно нет), а пробегает весь диапазон возможных значений от четкого «Нет» до четкого «Да». Следовательно, апостериорная вероятность гипотезы будет функцией от ответа пользователя.

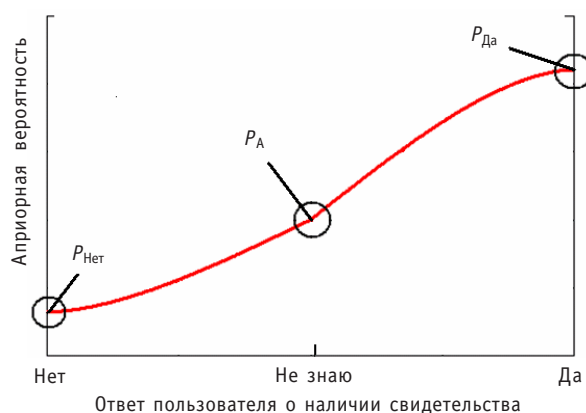


Рис. 4. Зависимость апостериорной вероятности от ответа пользователя

Для реализации такого подхода требуется способ вычисления ответа пользователя на основе данных, доступных инженеру КГО. Это возможно с использованием так называемой нечеткой логики.

Нечеткая логика была получена посредством распространения булевой логики на действительные числа [5]. В булевой алгебре 1 представляет истину, а 0 – ложь. То же имеет место и в нечеткой, но кроме того используются также все числа между 1 и 0, чтобы указать на частичную истину.

Степень наличия каждого свидетельства определяется соответствующей ему функцией принадлежности. Аргументами для этих функций служат экспериментальные величины.

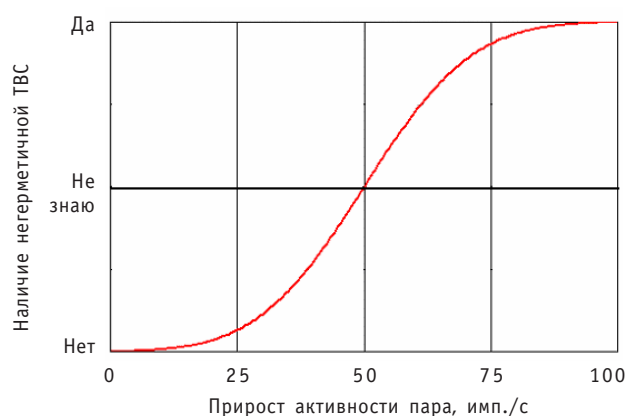


Рис. 5. Пример функции принадлежности

Для разработки алгоритма вычисления вероятности негерметичности твэла был привлечен опыт работы инженеров КГО. В результате были выработаны свидетельства негерметичности:

- большое абсолютное значение относительной негерметичности твэла в «сигмах»;
- прирост «сигмы» относительно предыдущего измерения;
- наличие общей тенденции к росту «сигм».

Первые два свидетельства вписываются в приведенную выше методику работы системы, последнее потребовало более детального анализа. Это связано с тем, что характерные черты поведения временного ряда, свидетельствующие о разгерметизации и ясно видные инженеру КГО, необходимо было математически формализовать.

Формализация признаков постоянного роста сигнала свелась к известной в радиотехнике задаче [6]. Рассматривается простейший модельный случай обнаружения радиосигнала. На входе приемника на интервале времени $(0, T)$ наблюдается некоторый процесс $y(t)$. Необходимо принять решение, является ли этот процесс аддитивной смесью сигнала и шума: $y(t)=s(t)+n(t)$ или наблюдается только шум, а сигнал отсутствует: $y(t)=n(t)$.

Решением является оптимальный приемник Котельникова, алгоритм работы которого состоит из двух шагов. На первом шаге приемник вычисляет корреляционный интеграл входной смеси $y(t)$ и опорной копии сигнала $s(t)$ на интервале

возможного существования сигнала:
$$R = \int_0^T y(t)s(t)dt .$$

Вторым шагом алгоритма является сравнение вычисленного интеграла R с порогом. Если интеграл R больше порога, то принимается решение, что сигнал есть, в противном случае принимается решение, что сигнала нет, а наблюдался только шум. Общий принцип работы оптимального приемника удачно вписывается в описанную выше концепцию системы.

В задаче поиска ТВС с негерметичным твэлом является более целесообразным исследовать на соответствие эталону производную от временного ряда «сигм» ТВС. Ряд «сигм» предварительно сглаживается медианным фильтром, устраняющим локальные выбросы.

Алгоритм работы автоматизированной системы может быть представлен следующим образом.

1. Для текущего свидетельства на основе соответствующей ему величины вычислить ответ пользователя.
2. Пользуясь теоремой Байеса вычислить апостериорную вероятность наличия негерметичного твэла в составе топливной сборки.
3. В качестве априорной вероятности гипотезы взять апостериорную, перейти к следующему свидетельству и затем к пункту 1. Если все свидетельства обработаны, перейти к пункту 4.
4. Перейти к следующему моменту времени t_i и затем к пункту 1, к первому свидетельству. Если все элементы временного ряда ячейки обработаны, завершить работу.

Результатом работы АС, исходной информацией для которой служит временной ряд показателей негерметичности («сигм») ТВС, является временной ряд вероятности негерметичности ТВС. Соответственно с ростом активности продуктов деления в некоторой ТВС (даже в пределах допустимых норм) будет расти вероятность ее негерметичности.

На рис. 6 приведен пример ступенчатой разгерметизации [2], не развивающейся далее.

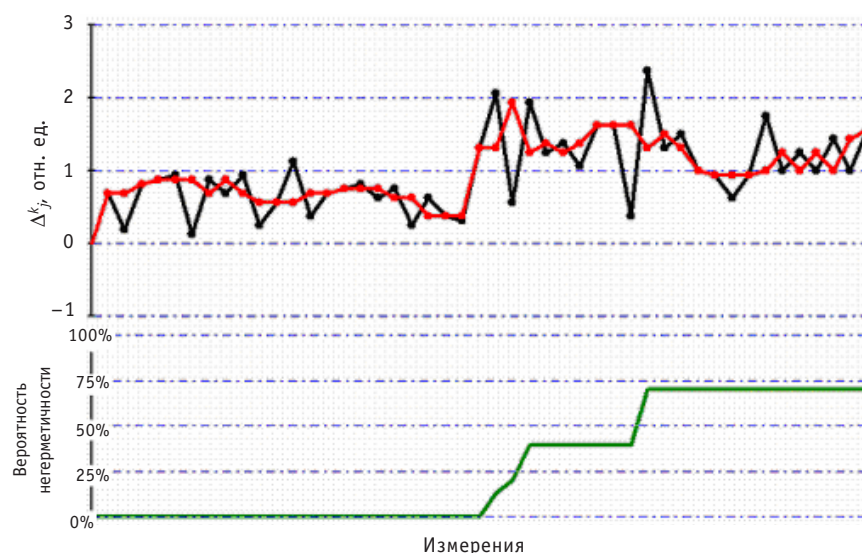


Рис. 6. Пример работы автоматизированной системы

Для настройки работы алгоритмов была взята информация о показателях негерметичности ТВС из БД КГО первого блока КУ АЭС с ноября 2007 г. по апрель 2008 г.

Испытание системы на реальных данных показало, что при поиске ТВС с негерметичным твэлом возможно без участия человека отсеять не менее 80% ТВС как однозначно герметичные, а оставшиеся проранжировать по вероятности негерметичности и представить инженеру КГО в соответствующем порядке для дальнейшего анализа.

Авторы выражают признательность А.Э. Речкиману и А.А. Яценко за внимание к работе и полезные замечания.

Литература

1. Доллежалъ Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. – М.: Атомиздат, 1980.
2. Жемчугов В.П. и др. Методическое обеспечение аппаратуры контроля герметичности оболочек (АКГО) твэлов РБМК/ВАНТ. Серия: Техническая физика и автоматизация. – 2005. – Вып. 59. – Ч. 2. – С.18-25.
3. Баранков А.В. и др. Модернизация системы контроля герметичности оболочек твэлов на Ленинградской АЭС/Сборник тезисов докладов VIII Международной молодежной научной конференции «Полярное сияние 2005. Ядерное будущее: безопасность, экономика и право».
4. Expert systems. Principles and case studies. Edited by Richard Forsyth. Polytechnic of North London. London New York. Chapman and Hall.
5. Прикладные нечеткие системы/Под ред. Т. Терано, К. Асаи, М. Сугэно. – М.: Мир, 1993.
6. Зюко А.Г., Коробов Ю.Ф. Теория передачи сигналов. – М.: Связь, 1972.

Поступила в редакцию 3.02.2009

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.58

The Microprocessor Unit Controlling the Complex Diagnostic Test Bench for Vibration Examination of Pipelines of Nuclear Power Plants \V.I. Velkin, D.S. Komoza, A.Y. Krutikov, V.V. Khnikina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 4 titles.

The examination results of passive swirlers for decreasing a level of vibration in the pipelines with two-phase flow were presented. Designs of the swirlers were shown. Metering characteristics providing formation of parameters of a two-phase mixture were described. The results characterizing a relative decreasing of vibration displacement of the pipelines used swirlers were exhibited. The view of the microprocessor unit controlling the experimental diagnostic test bench was exhibited. The scheme and the functioning algorithm were described.

УДК 621.039.548

Development of Automatic System by Expose Fuel Channel with Non-Hermetic Assemblies \A.M. Zagrebayev, I.V. Oghegin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 6 titles.

Scrutinize problem expose non-hermetic fuel assemblies. Description principles of function automatic system by expose fuel channel with non-hermetic assemblies.

УДК 621.039.534

Methods and Control Facilities the Resource of the Capital Equipment on the Nuclear Power Plant \A.V. Nekrasov, K.N. Proskurjakov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 10 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References, 12 titles.

Algorithms and software product for calculation of eigen frequencies of coolant pressure oscillations in the equipment of the first contour of the nuclear power plant with BB3P-1000, good quality factor of a contour of the coolant, a pass band of frequencies of fluctuations and factors of attenuations are developed. Results of calculations are resulted at presence and at absence in the coolant of products radiolysis in a gaseous status. The analysis of results allows to reveal the conditions resulting in raised vibrations, and also to develop managers of influences in ordinary system of management information system of the block for their prevention.

УДК 621.18.021

Designing of Electronic Passport for Forecast of Condition of the Pipe-Heater Steam Generator \V.K. Semenov, D.S. Rumyantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 3 illustrations. – References, 3 titles.

We designed a system of organizational and technical steps, which carry out in exploration time of heat-and power engineering equipment of NPP (nuclear power plant) with PWR (power water reactor). This system was designed for the new equipment and can be apply only when the all devices have identical starting condition. If starting conditions are difference, then said approach is not correct. Therefore we are creating methodology, which permit to made prognosis of tubing steam generator longevity and work out a guidelines, which will be helped to raise a safety of steam generator and prolong its resource.

We designed a semi empirical mathematical model and computer program which permit to make forecast of chemical washing terms in steam generator.

УДК 502/504:57.08

Ecological bases of Application the Allium-Test in Ecological Monitoring \S.Y. Sinovets, S.V. Pyatkova, G.V. Kozmin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika»