

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

К.Н. Маловик, В.В. Никишин

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности



Рассматривается аналитическое прогнозирование предельного состояния теплоносителя. Показаны экспериментальные данные физического моделирования измерения объёмного паросодержания с помощью усовершенствованной системы технического зрения. Предлагается применение теории динамических рядов для прогнозирования состояния теплоносителя ядерного реактора.

Ключевые слова: теплоноситель, паросодержание, ядерный реактор, система технического зрения, прогнозирование.

Key words: coolant, steam content, nuclear reactor, machine vision, dynamic trends.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальность оценивания и прогнозирования ресурса ядерных реакторов (ЯР) подтверждается окончанием сроков эксплуатации значительного числа оборудования атомных электростанций. Имеются сведения [1] о создании новых конструкций ядерных реакторов, срок службы которых планируется от 60-ти лет и выше. В статье предлагается подход для прогнозирования состояния теплоносителя ядерных реакторов, который может быть использован на этапах проектирования и разработки новых реакторов, а также исследования деградационных и ресурсных отказов.

Цель исследования — усовершенствование метода прогнозирования состояния теплоносителя ЯР.

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть физическое моделирование измерения параметров теплоносителя и исследовать полученные экспериментальные данные.

ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Объектом исследования является теплоноситель ЯР.

Метод измерения паросодержания — оптический, с помощью компьютерного зрения для последующей специальной обработки изображений.

Известно [1, 2], что в ЯР типа ВВЭР кипение не допускается, но не исключается полностью. Ведутся изыскания по созданию ЯР, срок эксплуатации которых может достигать 60 и более лет. Для повышения характеристик надёжности и безотказности АЭС необходимы исследования по определению коренных причин деградационных и ресурсных отказов оборудования трубопроводов. Для решения этих задач применяется оптический метод, положенный в основу работы усовершенствованной системы технического зрения (СТЗ) [3–5, 7–10], который позволяет оценивать объёмное паросодержание теплоносителя с высокой достоверностью.

© *К.Н. Маловик, В.В. Никишин, 2013*

Под объёмным паросодержанием рассматривается отношение объёма паровой фазы к сумме объёмов паровой и жидкой фаз [6]:

$$\psi = \frac{S_G}{S_L + S_G} \quad (1)$$

где S_G и S_L площади поперченного сечения газовой среды и жидкой фазы в канале соответственно.

Так как метод измерения оптический, то он основывается на анализе цифровых изображений (кадров), полученных видеокамерой [8–12]. Кадр представляет собой матрицу, состоящую из элементов или пикселей (рис. 1 а), каждый из которых характеризуется набором параметров. Основными параметрами являются координаты и яркость. Количество пикселей определяется разрешающей способностью чувствительного элемента видеокамеры прибора с зарядовой связью.

На получаемых кадрах изображение паровых пузырей состоит из ярких (относительно остального фона) пикселей (рис. 1 б). Логично предположить, что просуммировав количество ярких пикселей, можно измерить площадь, которую они занимают на кадре. Вся площадь кадра соответствует проекции той части экспериментального канала, которую захватывает видеокамера.

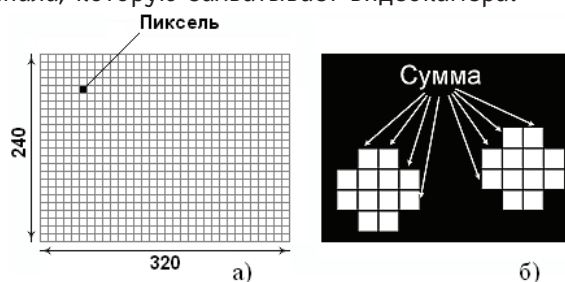


Рис. 1. Принцип измерения паросодержания с помощью СТЗ

Таким образом, измерение объёмного паросодержания рассчитывается косвенно по площади проекции паровых пузырей.

Если соотнести это значение ко всей площади кадра, то получается значение паросодержания в захватываемой видеокамерой части экспериментального канала (1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

На рисунке 2 представлены полученные результаты измерений по каналам температуры и вычисленное с помощью специализированного программного обеспечения, входящего в состав СТЗ [5], значение объёмного паросодержания.

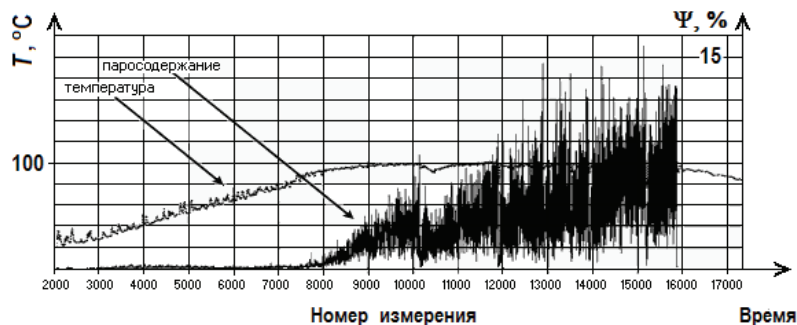


Рис. 2. Экспериментальные данные физического моделирования процесса измерения паросодержания с помощью СТЗ

Ось абсцисс соответствует номеру измерения, при котором опрос сенсоров температуры и видеокамеры СТЗ обеспечивает получение 30-ти изображений в секунду.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Как видно из рис. 2, оцениваемое объёмное паросодержание характеризуется скачками или пульсациями, поэтому необходима фильтрация полученных значений. Фильтрация значений медианным фильтром со скользящим окном размером 30 измерений позволяет эти пульсации сгладить.

На рисунке 3 представлены отфильтрованные значения объёмного паросодержания, показанные на рис 2.

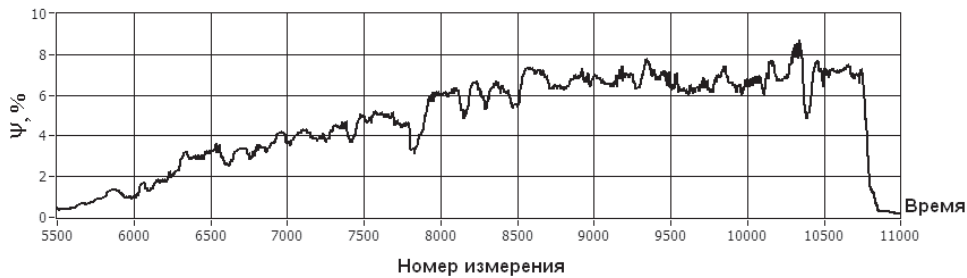


Рис. 3. Фильтрация медианным фильтром

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Для решения задачи прогнозирования состояния теплоносителя по уровню объёмного паросодержания, измеряемого оптическим методом, рассмотрим полученные экспериментальные данные как ряд динамики [13].

Ряд динамики это значения статистических показателей, которые представлены в определенной хронологической последовательности. Существуют два варианта динамических рядов: интервальный и моментный.

Изменение величины объёмного паросодержания является динамическим моментным рядом, отражающим значения показателей на определенный момент времени (дату времени).

Для количественного оценивания динамических рядов используют базисные и цепные показатели.

Базисные показатели характеризуют итоговый результат всех изменений в уровнях ряда от периода базисного уровня до данного (i -го) периода.

Цепные показатели характеризуют интенсивность изменения уровня от одного периода к другому в пределах того промежутка времени, который исследуется.

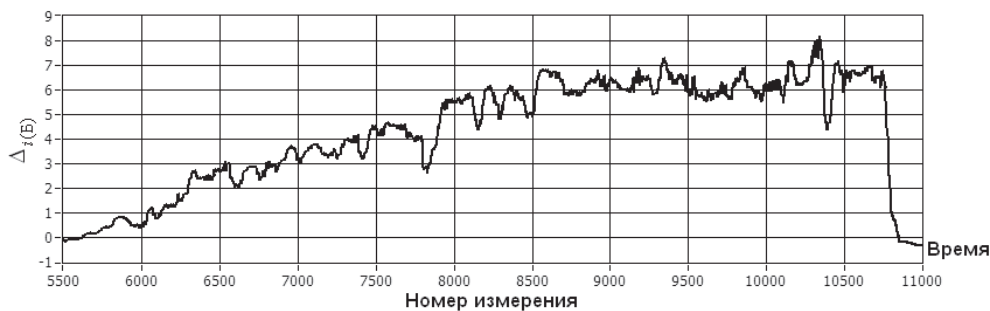


Рис. 4. График изменения абсолютного базисного прироста объёмного паросодержания

Абсолютный прирост выражает абсолютную скорость изменения ряда динамики и определяется как разность между данным уровнем и уровнем, принятым за базу сравнения:

$$\Delta_{i(б)} = \psi_i - \psi_0, \quad (2)$$

где ψ_i и ψ_0 уровни объёмного паросодержания сравниваемого и базисного периодов соответственно.

Как видно из рис. 4, график абсолютного базисного прироста практически полностью повторяет характер изменения объёмного паросодержания. Это связано с тем, что величина ψ_0 принимается равной нулю как базовая в формуле (2).

Рассмотрим характер изменения абсолютного цепного прироста.

Абсолютный прирост $\Delta_{i(ц)}$ с переменной базой (цепной), который называют скоростью роста, рассчитывается по соседним парам измеренных величин:

$$\Delta_{i(ц)} = \psi_i - \psi_{i-1}. \quad (3)$$

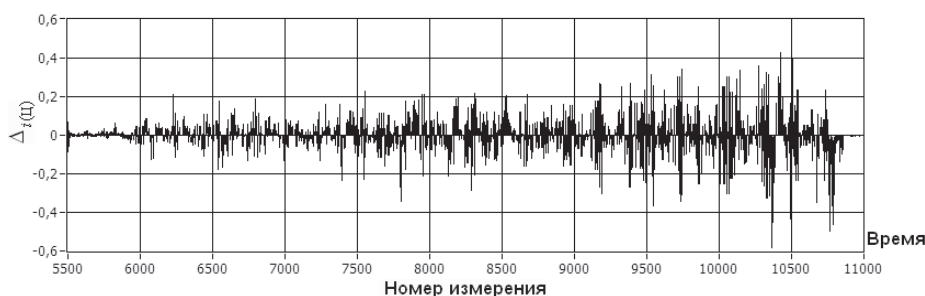


Рис. 5. График изменения абсолютного цепного прироста объёмного паросодержания

Физический смысл абсолютного цепного прироста — мгновенная скорость изменения объёмного паросодержания. Из рисунка 5 видно, что объёмное паросодержание изменяет свою величину не только количественно, но и качественно: скорость имеет как положительные, так и отрицательные значения, что говорит о скачкообразном процессе. Можно также видеть, что мгновенная скорость роста объёмного паросодержания на протяжении всего эксперимента не превышает 0,6%.

Таким образом, абсолютный цепной прирост удобно использовать для оценивания текущей нестабильности состояния теплоносителя.

Абсолютный базисный прирост можно использовать для прогнозирования предельного состояния теплоносителя, которое устанавливается экспертом.

На рисунке 6 показаны исходные данные измеренного объёмного паросодержания с помощью СТЗ. Для прогнозирования состояния теплоносителя используется способ, показанный в [14].

Для иллюстрации возможности применения предлагаемого подхода показан условный предел объёмного паросодержания $\psi_{пред} = 5\%$, т.е. ставится задача определения времени, необходимого теплоносителю для достижения уровня объёмного паросодержания в 5%. На этапе исследований и экспериментов уровень предельного состояния устанавливается экспертом исходя из основной задачи (недопущение кипения, состояние кипения с некоторым уровнем паросодержания и т.д.).

Покажем прямую, проведённую из начального момента времени. На рисунке 6 выбраны две точки, для которых находится абсолютный прирост. Угол наклона прямой можно рассчитать, используя величину абсолютного базисного прироста.

$$tg\alpha = \frac{\Delta_{I(B)}}{\Delta t}, \quad (4)$$

где Δt – интервал, соответствующий разности между временем, в котором берётся абсолютный базисный прирост, и временем, в котором зафиксировано базисное значение.

Как видно из рисунка, процесс роста объёмного паросодержания хорошо интерполируется прямой, поэтому для двух разных точек угол наклона может быть принят одинаковым. В связи с этим практически неважно, в какой точке определяется абсолютный прирост.

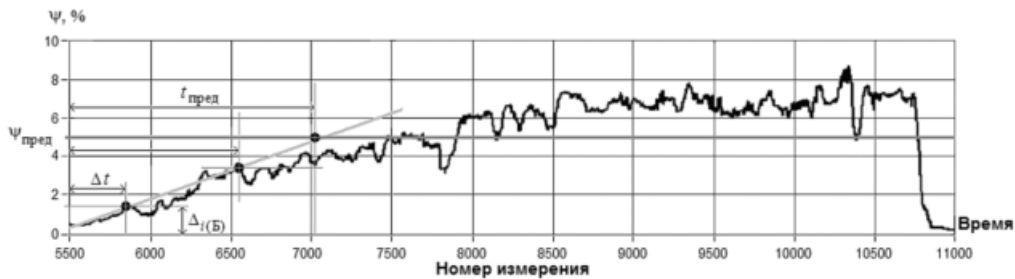


Рис. 6. Прогнозирование состояние теплоносителя

Если продлить прямую до пересечения с установленным ранее предельным уровнем объёмного паросодержания, то можно получить ориентировочное время, которое необходимо теплоносителю для перехода в это состояния с момента начала роста паросодержания [14].

Используя такой подход, можно получить несколько прямых, имеющих некоторый диапазон углов наклона, а соответственно, и некоторый диапазон прогнозируемых моментов времени. Тогда могут быть два предельных случая – так называемые *пессимистический* и *оптимистический* прогнозы [15], показанные на рис. 7.

Пессимистический прогноз соответствует быстрому переходу теплоносителя в предельное состояния, оптимистический – медленному.

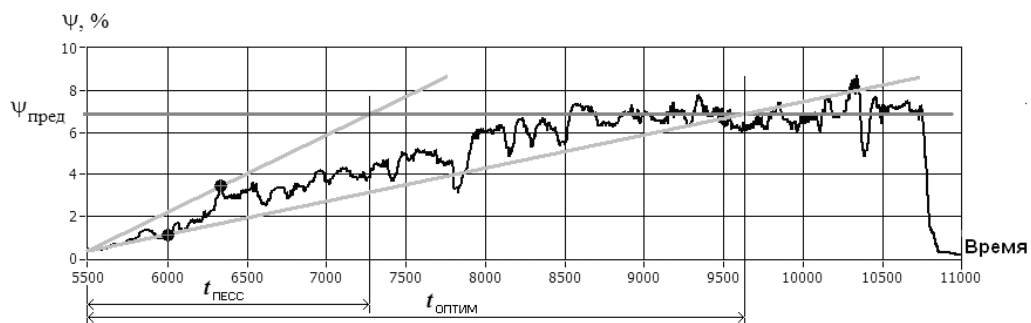


Рис. 7. Оптимистический и пессимистический прогнозы

ВЫВОД

Предлагается усовершенствованный на базе теории динамических рядов подход для прогнозирования состояния теплоносителя при проектировании ядерных реакторов новых поколений. Этот подход также может быть использован для исследования деградационных и ресурсных отказов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций / В.А. Острейковский. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
2. АЭС с ВВЭР: Режимы, характеристики, эффективность / Р.З. Аминов, В.А. Хрусталёв, А.С. Духовенский, А.И. Осадчий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 264 с.
3. Розвиток систем технічного зору для дослідження параметрів теплоносія ядерних реакторів / К.Н. Маловік, В.В. Нікішин // Научно-производственный журнал Украины «Метрологія та прилади». – Харьков: – № 2, 2010. – С. 25 – 27.
4. Усовершенствование программного обеспечения для системы технического зрения экспериментального теплофизического стенда / К.Н. Маловик, В.В. Никишин // Сборник научных трудов СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. Вып. 3(35). – С. 204–208.
5. Моделирование процессов измерения паросодержания теплоносителя ядерных реакторов / В.В. Никишин // Сборник научных трудов СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2012. Вып. 2(42). – С. 205 – 210.
6. Баттерворс Д., Хьюит Г. Теплопередача в двухфазном потоке. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
7. Попов И.А. Оптическая измерительно-информационная система для исследования кипения и конденсации пузырей в пароводяном потоке / И.А. Попов и др. // Труды Международной конференции «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР». – Обнинск: ФЭИ. – 1995. – Т. 1. – С. 98 – 106.
8. Попов И.А. Новые методы измерения теплогидравлических параметров в ядерной энергетике / И.А. Попов, Е.Н. Сычёв // Сб. науч. тр. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2003. Вып. 8. – С. 77 – 85.
9. Оптическая измерительная система технического зрения для измерения истинных характеристик двухфазного потока / И.А. Попов, В.А. Ловягин, Д.М. Сайда, К.Б. Матузаев // Труды II Российской конференции по тепломассообмену. – Обнинск, 1998. – С. 78 – 81.
10. Попов И.А. Основные направления и результаты разработки оптических методов для исследования теплофизических процессов в энергонапряжённых моделях ТВС / И.А. Попов, Ю.М. Быковский, Д.М. Сайда // Тр. Междунар. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР» – Т.1. – Обнинск: ФЭИ, 1995. – С. 32 – 46.
11. Матузаев К.Б. Оценка точности определения истинных характеристик фазовых структур потока теплоносителя с помощью оптического измерительного канала / К.Б. Матузаев Сборник научных трудов СИЯЭиП. – Севастополь: СИЯЭиП, 2001. Вып. 5. – С. 35 – 40.
12. Герлига В.А. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС / В.А. Герлига, В.И. Скалозубов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 432 с.
13. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 415 с.
14. Маловик К.Н., Никишин В.В. Патент Украины № 51036 «Способ идентификации примесей в водной системе охлаждения», Бюллетень №12. 2010.
15. Антонов А.В. Статистические модели в теории надёжности: Учеб. пособие / А.В. Антонов, М.С. Никулин. – М.: АБРИС, 2012. – 319 с.

Поступила в редакцию 17.12.2012

fresnoite and perovskite, chemical durability of produced glasses was very high level, since equilibrium leach rate of Eu was $3 \cdot 10^{-6}$ g/m²·day and of U was $4 \cdot 10^{-6}$ g/m²·day.

УДК 546.212:541.12.012.3+534-14

Use of Generation of Acoustic Vibrations in Chemical Reaction and Properties of the Bubble Medium in Liquid to Reveal through Defects in Claddings of Slugs with Sodium \ Titarenko N.N., Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Polionov V.P.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 illustrations. – References, 23 titles.

An opportunity to use the acoustic emission method to control micro-defects in the equipment is considered. In particular, for the first time it is shown experimentally that while sodium is interacting with water, the acoustic emission parameters are determined by the size of the interacting area for reacting components of the reaction. It is assumed that the major source of acoustic emission in the reaction of sodium interacting with water is generation of acoustic vibrations caused by phase transitions of sodium hydroxide. The obtained data make it possible to design a high-efficient system to control through defects in claddings of slugs with sodium.

УДК 621.039.534

The Investigation of the Acoustic Level Limit Switch of Coolant in the Integrated Stand of the KV-2 \ V.I. Melnikov, V.V Ivanov, Yu.A. Kiselev, A.A. Kiselev, K.M. Miriasov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 5 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

The results of the level switch based on 24 point acoustic probes which monitored process into the testing integrated unit KV-2 three-year operation was generalized. It has been estimated that the developed level switch worked satisfactorily. They make possible monitoring the thermohydraulic processes associated with vapor phase formation died to the increase of liquid level and steam condensation into reactor.

УДК 004.42.001.5

Coolant Forecasting of Nuclear Reactors \ Malovik K.N., Nikishin V.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 6 pages, 7 illustrations. – References, 15 titles.

The article considers analytic forecasting of coolant and its limit condition. Shown experimental data of physical modeling of volumetric steam content via improvement of machine vision system. Proposed using theory of dynamic trends for coolant forecasting of nuclear reactor.

УДК 621.039.517

Technique and Software to Calculate Temperature Field in the System of Layered Cylindrical Fuel Elements \ Starkov V.A., Marikhin N.Yu.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 5 titles.

A technique has been proposed and thermal conductivity problem has been solved analytically for the system of layered cylindrical fuel elements. Based on the results, an algorithm and FORTRAN software for the thermo-hydraulic calculation of a channel (THCC) have been developed to calculate the temperature field and thermal flux density in a fuel assembly with layered cylindrical fuel elements. The software also provides the calculation of the surface boiling onset temperatures on the fuel elements, critical fluxes and corresponding thermotechnical margins. Two coolant circulation schemes are provided for a fuel assembly: straight flow and Field tube. The results of the THCC calculations were compared with the analogous ones. A correlation between the calculation results is shown as well as the advantages of the THCC software performance.

УДК 519.6:621.039.5

The Overimplicit Scheme of Incomplete Factorization Method for Solving the Three-dimensional Diference Equations of Elliptic Type \ N.M. Troyanova, V.P. Ginkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 1 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

The over-implicit scheme of the incomplete factorization method (IFM) is proposed for solving the systems of linear algebraic equations that approximate the equations for neutron transport in the multigroup diffusion approximation, and the variant of combined IFM schemes is proposed, in which the peripheral