

# АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛОВ В РАЙОНЕ ПЕРЕХОДНИКОВ СТАЛЬ – ЦИРКОНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА РБМК

**А.И. Трофимов, С.И. Минин, М.А. Трофимов, А.А. Зильпер**

*Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*



В статье представлены результаты разработки системы, позволяющей фиксировать изменения напряженного состояния элементов металлоконструкций, с целью ее дальнейшего использования для контроля напряженного состояния переходников технологических каналов реакторов типа РБМК. Изменения напряженного состояния определяются по изменению скоростей ультразвуковых волн, генерируемых в испытываемом объеме.

Контроль состояния технологических каналов (ТК) является одной из основных задач диагностики оборудования ядерных реакторов типа РБМК. ТК состоит из циркониевой части, которая находится в активной зоне ядерного реактора, и стальной, расположенной вне активной зоны (рис.1). Между ТК и графитовой кладкой расположены упругие графитовые кольца. Величина зазора между ТК с графитовыми кольцами и графитовой кладкой составляет 3 мм. В результате процессов термодинамической ползучести и радиационного роста диаметры канальных труб увеличиваются, а диаметры отверстий в графитовых блоках уменьшаются [1]. Это приводит к выбору «зазора» и заклиниванию ТК. При этом в металле ТК создаются механические напряжения, которые могут привести к разрушению ТК. Особую важность приобретает оперативный контроль напряженного состояния металла технологического канала и переходников сталь – цирконий.

Рассмотрим метод ультразвукового контроля напряженного состояния металла технологических каналов, основанный на нелинейном акустическом эффекте акустоупругости. Впервые эффект акустоупругости был обнаружен Бенсоном и Раельсоном [4]. Открытие этого эффекта позволило создать новый метод неразрушающего контроля напряженного состояния металла в различных конструкциях. Исследованию этого метода посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные работы зарубежных и отечественных исследователей. Наиболее полная информация дана в фундаментальных работах [5-8]. Однако исследования

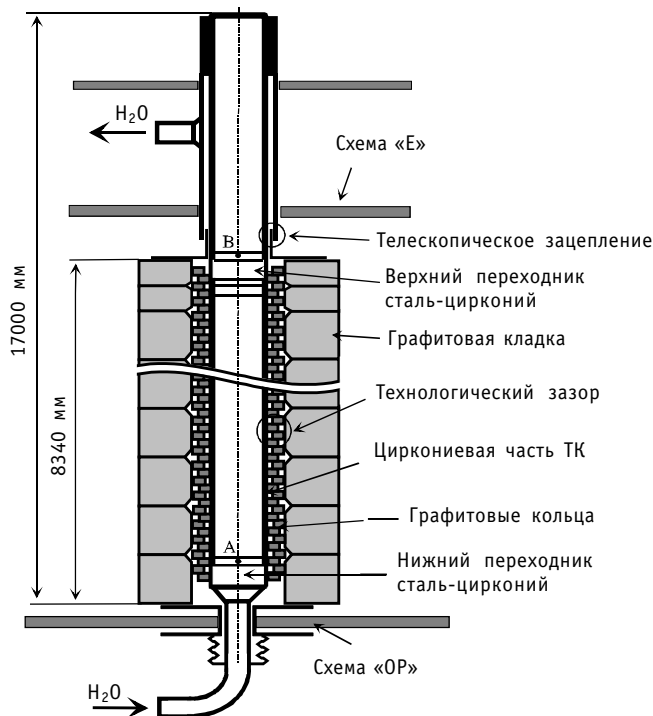


Рис.1. Схема конструкции тракта ТК

упругости вызван нелинейными упругими свойствами твердого тела. Различают геометрическую и физическую нелинейности.

Для реализации данного способа измерения относительного состояния в материале ТК необходимо знать значения скоростей продольной и сдвиговых волн в ненапряженном состоянии.

Рассмотрим блок ультразвуковых преобразователей (УЗП), предназначенный для контроля напряженного состояния сварных швов верхнего и нижнего переходных соединений технологического канала (рис.2).

На рис.3 показан разрез блока преобразователей со схемой прохождения ультразвуковых волн в металле стенки технологического канала (ТК). Работает блок УЗП в тракте ТК, заполненном водой, и состоит из 4 пьезопреобразователей (ПЭП): одного прямого - для возбуждения продольных волн и трех наклонных - для возбуждения поперечных волн.

Прямой преобразователь И-ПЗ (излучатель-приемник) служит для возбуждения продольных волн и для определения толщины стенки ТК; наклонный преобразователь И4 (излучатель) - для возбуждения ультразвуковой волны в металле стенки ТК, а П1 и П2 (приемные) преобразователи - для приема прошедшей в металле поперечной волны, возбужденной ИЗ. По времени прихода продольной и поперечной волн определяется их скорость.

Ультразвуковая продольная волна, возбужденная прямым преобразователем И-

уже вышли из научно-исследовательских лабораторий. Разрабатывается промышленный вариант системы контроля напряженного состояния.

Эффект акустоупругости заключается в том, что скорость поляризованных сдвиговых волн, распространяющихся в напряженном твердом теле, зависит от величины напряжения, направления колебания частиц (поляризации) и направления распространения волн. На практике под термином «акустоупругость» понимают зависимость скорости ультразвука от механических напряжений для любого типа волн. Эффект акусто-

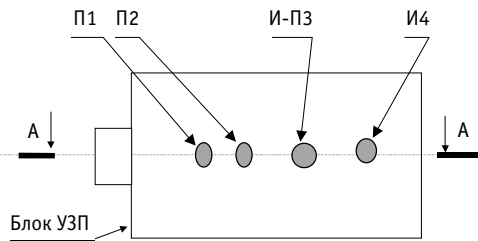


Рис. 2. Общий вид блока ультразвуковых преобразователей для определения напряженного состояния: И-ПЗ - прямой ПЭП; П1, П2, И4 - наклонные ПЭП

ПЗ (резонансная частота 5 МГц, диаметр пьезоэлемента 12 мм), распространяется в воде, дойдя до стенки ТК, отражается от нее, а часть энергии волны проникает в металл и, отразившись от наружной стенки канала, распространяется до внутренней, а затем опять устремляется к наружной. Такой цикл повторяется до полного ее затухания. Зная скорость распространения продольной ультразвуковой волны в воде и металле ТК можно рассчитать расстояние от блока преобразователей до стенки ТК и толщину стенки ТК.

В качестве элемента, преобразующего электрические колебания, поступающие от генератора импульсов, в механические и обратно, выбрана пьезокерамика ЦТС-19. Она наиболее стойкая к радиационному излучению и может использоваться при температуре теплоносителя до 100°C. Температура ее располяризации равна 283°C. Для погашения избыточных колебаний пьезокерамики применен демпфирующий состав на основе окисла вольфрамового порошка. Для улучшения прохождения ультразвуковых волн из пьезоэлемента в водную среду применен протектор, толщина которого кратна четверти длины ультразвуковой волны. Все составные элементы преобразователя помещены в капсулу, а электрические выводы подключены к генератору импульсов. Такие преобразователи, размещенные соответствующим образом в металлической заготовке, и составляют блок преобразователей.

Главным фактором, влияющим на изменение характеристик распространения ультразвуковых волн, является сопровождаемое напряжениями изменение межatomных расстояний и упругих модулей. Вследствие этого происходит изменение скоростей продольных и поперечных волн, их амплитуды. Измеряя скорости волн в напряженном и ненапряженном состояниях металла, сравнивая их, можно достаточно точно вычислить напряжения.

Таким образом, напряженное состояние твердого тела определяется тензором напряжений, образованным девятью компонентами нормальных (растяжения или сжатия) и касательных напряжений. В неограниченной твердой среде можно возбуждать ультразвуковые волны двух типов - продольную и поперечную.

Отношение скоростей продольной и поперечной волн зависит от коэффициента Пуассона среды. Изменения скоростей могут коррелировать с напряжениями растяжения или сжатия, а также внутренними напряжениями и текстурой материала. Можно показать, что скорости продольных и поперечных волн полностью определяются упругими характеристиками среды. Так скорость продольных волн определяется выражением

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad E = \frac{\rho c_t^2(4c_l^2 - 3c_t^2)}{c_t^2 - c_l^2},$$

где  $E$  - модуль нормальной упругости или модуль Юнга;  $\rho$  - плотность среды;  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

Модуль Юнга  $E=P/\epsilon$  определяет напряжение, которое необходимо приложить к упругому объему, чтобы последний испытал деформацию. Коэффициент Пуас-

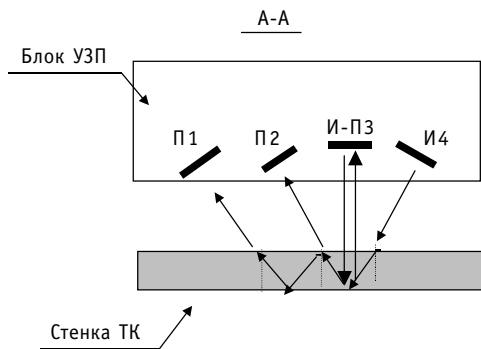


Рис. 3. Разрез блока ультразвуковых преобразователей со схемой прохождения ультразвуковых волн: П1, П2 – наклонные приемные преобразователи; И-ПЗ – прямой излучающий и приемный преобразователь; И4 – наклонный излучающий преобразователь

сона представляет собой отношение деформации в поперечном сечении  $\varepsilon_2$ , которая возникает при наличии деформации  $\varepsilon_1$  в продольном сечении, т. е.  $\mu = -\varepsilon_2/\varepsilon_1$ .

Поперечная волна возникает только в твердых телах и ее скорость определяется выражением

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1-\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}},$$

где  $G$  - модуль сдвига (первый коэффициент Ламе), представляющий собой тангенциальное напряжение, которое необходимо приложить к упругому объему, чтобы последний испытал единицу угловой деформации  $G = P_\tau / \theta$ ,  $\theta$  - угол сдвига.

Между модулем Юнга и модулем сдвига существует соотношение

$$G = E/2(1+\mu).$$

В общем виде линеаризованное уравнение, показывающее зависимость относительного изменения скорости распространения УЗ-волн от одноосных напряжений, можно записать следующим образом:

$$\Delta C / C = \beta \sigma,$$

где  $\beta$  - акустоупругий коэффициент одноосных напряжений, зависящий от упругих постоянных второго и третьего порядков. Общая схема стенда, на котором были проведены испытания, представлена на рис.4.

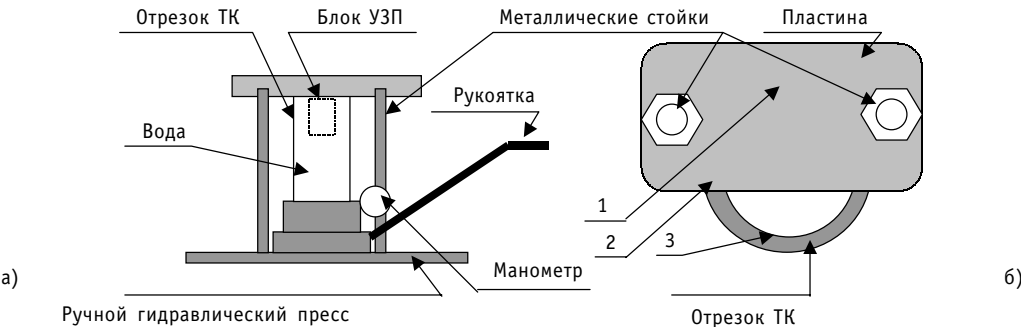


Рис. 4. Общая схема стенда, используемого для проведения экспериментов: а) - общий вид стенда; б) - вид сверху на отрезок ТК, удерживаемый металлической пластиной

В ручной гидравлический пресс, создающий давление до 10 МПа, устанавливался отрезок бездефектного ТК. Во внутреннюю полость отрезка ТК, залитого водой, помещался блок УЗП. Расположение отрезка ТК при прикладывании нагрузки хорошо видно на рис. 4б. Такое расположение позволяло распределить нагрузку на отрезок ТК таким образом, что максимум нагрузки приходился на область 1 (см. рис.4б), уменьшение нагрузки наблюдалось в области 2 и еще большее уменьшение - в области 3.

Упрощенная принципиальная электрическая схема устройства определения напряженного состояния показана на рис.5.

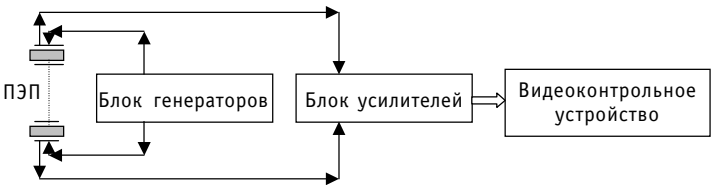


Рис. 5. Упрощенная принципиальная электрическая схема устройства

В результате проведенных экспериментов на фрагменте технологического канала в лабораторных условиях получены диаграммы, приведенные ниже. Видны линейные изменения времени прихода ультразвуковой волны в зависимости от давления на циркониевый, нержавеющий и переходной отрезки канала.

Из приведенных выше зависимостей видно, что изменение фиксируемо. Из проведенной серии измерений, а также, принимая во внимание погрешность измерений, можно сделать вывод о линейной зависимости изменения времени распространения ультразвуковых волн. Это существенно упрощает методику измерения напряженного состояния.

Внешний вид блока ультразвуковых преобразователей показан на рис. 7.

Ультразвуковая система контроля напряженного состояния переходников технологического канала построена по двухуровневому принципу, что позволяет распределить функции системы между ее составными частями. Верхний уровень иерархии представляет ЭВМ, которая задает режим работы блокам, находящимся на нижнем уровне, в соответствии с основным алгоритмом контроля. Кроме того, ЭВМ осуществляет обработку данных контроля, визуализацию процесса контроля в виде условной развертки трубы, накопление и долговременное хранение данных контроля, восстановление результатов контроля по архивным данным, а также тестирование отдельных узлов системы. ЭВМ имеет быстроедействие, позволяющее в реальном времени выполнять возложенные на нее функции, не снижая производительности контроля. Программное обеспечение представляет собой пакет стандартных и прикладных программ, обеспечивающих выполнение функций, возложенных на систему. Процедура съема и предварительной обработки данных УЗД заключается в перезаписи оцифрованных значений амплитуды УЗ-сигнала из модуля сбора данных в оперативное запоминающее устройство ЭВМ и формировании массива первичных данных, который переписывается в выходной файл. Ввод данных идет в диалоге с оператором через монитор и клавиатуру. Результат ввода - файлы системных данных (файл механизма и файл объекта контроля), которые являются входной информацией для программ чтения и корректировки данных. Процедура формирования протокола контроля заключается в анализе массива



Рис. 7. Блок ультразвуковых преобразователей

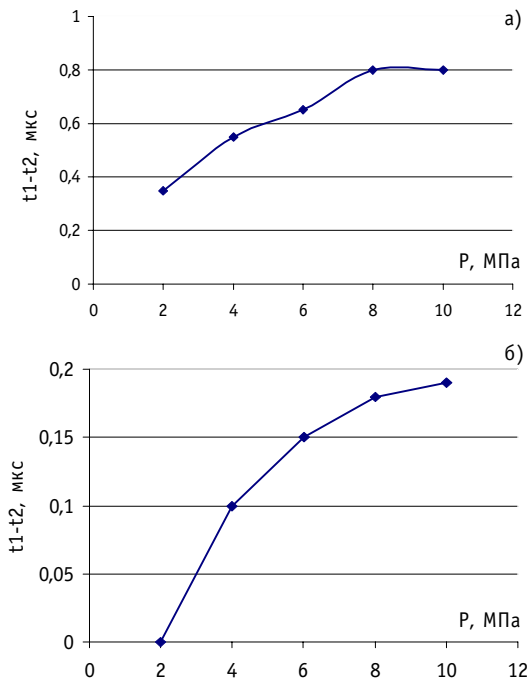


Рис. 6. Изменение времени распространения поперечной ультразвуковой волны в цирконии (а) и продольной ультразвуковой волны (отражение от стенки) (б)

данных и представлении результатов контроля на экране дисплея и в виде бумажной копии. Таким образом, применение эффекта акустоупругости позволяет эффективно контролировать напряженное состояние технологических каналов и предсказывать появление трещин, что значительно увеличивает безопасность эксплуатации реакторов РБМК.

### **Литература**

1. Безопасность АЭС с канальными реакторами. Конструкция активной зоны /Л.А. Белянин, В.И. Лебедев, Ю.В. Гарусов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1997.
2. Трофимов А.И. Ультразвуковые системы контроля искривлений технологических каналов ядерных реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Трофимов А.И., Виноградов С.А., Балдин В.Д. и др. Техника многофункциональной диагностики технологических каналов ядерных реакторов с использованием автоматизированного позиционного электропривода // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. - №6. – С.3-8.
4. Benson R. W., Raelson V. G. Aconstoelastiking. – 1959.
5. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. - М.: Наука, 1966.
6. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. - Киев: Наукова думка, 1977.
7. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин. - Кишинев: Штиинца, 1981.
8. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустическая тензометрия. - Кишинев: Штиинца, 1991.
9. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Гик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела /Под ред. И.Г. Михайлова. Пер. с англ. - М.: Мир, 1972.

Поступила в редакцию 03.10.2000

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.564:53.082.4

*Automatic Control System of Stressed State of a Metal for Technological Channels at Steel-zirconium Adapter of RBMK-type Nuclear Reactors* \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, A.A. Zilper; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 7 illustrations, 9 tables.-References, 9 titles.

The results of development system for measuring of changes of stressed metal construction states have been shown in this article. The system can be used for control of the stressed state of adapters of RBMK-type reactor fuel channels. The changes of stressed state are determined by means of ultrasonic wave velocity changes which are generated in the suffered materials.

### УДК 51-72:531.15

*Analysis of a Rotor Working Equations with Electromagnetic Bearings* \E.V. Gaivoronskaya, S.V. Lebedeva; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 5 pages, 2 illustrations.-References, 3 titles.

The problem of the creation of vertical turbine machine with electromagnetic bearings is considered with reference to high-temperature gas reactor. Simple formulas of the precession frequency and nutation frequency of the shaft are derived on the basis of solutions of the shaft working equations for the special cases depending on a sistem parameters.

### УДК 621.039.584

*The Calculational Study of the Possibility of Corium Confinement in the Catcher with the Walls Cooled by Impinging Jets* \M.V. Kachtcheev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 6 pages, 4 illustrations.-References, 5 titles.

A catcher with the walls cooled by impinging jets has been considered as a device for corium cooling and confinement outside the reactor vessel. The proposed catcher design enables the basic problems of corium confinement and cooling after its release from the reactor vessel to be solved. The calculational study for corium-to-catcher shell interaction using the PPRKRS code has been performed. It can be applied for the analysis of the possibility of corium confinement in the catcher of any design.

### УДК621.039.526

*On Selection of Optimal Composition of the Na-K-Cs-alloy for LMFR Core Cooling* \V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 7 pages, 1 illustration.-References, 5 titles.

The Na-K-Cs-alloy may be considered as a potential coolant for the LMFR. In this paper are discussed the selection of the optimal composition of this alloy. This composition may be obtained as the solution of multicriteria optimization problem.

### УДК 681.3:621.039.548

*The Calculation Analysis of Experiments on Destruction of Electroheated Fuel Element Simulators* \G.N. Vlasichev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk,2000.- 10 pages, 6 illustrations.-References, 18 titles.

The technique and computer program for account of emergency process of cylindrical fuel elements heating and melting are developed. Calculating analysis of experiments on electrical