

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ УСТРОЙСТВО СНЯТИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЭС

А.И. Трофимов, С.И. Минин, В.Н. Дементьев, А.И. Романцов

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Проведено теоретическое и экспериментальное обоснование метода снятия остаточных напряжений путем воздействия ультразвука на сварное соединение в процессе сварки. Приведено описание автоматизированного ультразвукового устройства снятия остаточных напряжений, перемещающегося синхронно со сварочным автоматом.

Остаточные напряжения в сварных соединениях трубопроводов АЭС влияют на безопасность ее эксплуатации и представляют собой растягивающие напряжения при сварке, которые в шве компенсируются сжимающими напряжениями в основном металле (рис.1). Сварной шов сжимается в процессе охлаждения. В процессе сварки кромки движутся относительно друг друга в основном перпендикулярно направлению сварки. Остаточные напряжения искажают форму конструкции.

Причиной остаточных напряжений являются неодинаковые линейные или объемные деформации соседних объемов металла, для которых характерно, что они существуют внутри конструкции (изделия) без приложения внешних усилий. Различия остаточных напряжений, возникающих при разных технологических процессах, проявляются в характере их распространения по макро- и микрообъемам изделия, а также в конкретных факторах, приводящих к неоднородным деформациям.

Остаточные сварочные напряжения существенно снижают долговечность сварных элементов конструкций в результате проявления трех основных факторов: увеличение коэффициента асимметрии рабочего цикла напряжений; увеличение амплитуды рабочих напряжений в определенных местах сварного соединения; снижение предела выносливости при многоосном напряженном состоянии (этот фактор является следствием первых двух факторов). Величина остаточных сварочных напряжений может достигать и даже превосходить предел текучести металла. Вышеуказанные факторы приводят к ускорению процесса зарождения и развития усталостных трещин [1, 2, 3]. В 111 шве парогенератора ПГВ-1000 и 23 шве парогенератора ПГВ-440 были обнаружены трещины, образовавшиеся в результате наличия в сварных швах остаточных напряжений.

В проблемной лаборатории «Контроль и диагностика АЭС» ИАТЭ разработан метод снятия остаточных напряжений воздействием ультразвуковых волн на сварные соединения в процессе сварки.

© А.И. Трофимов, С.И. Минин, В.Н. Дементьев, А.И. Романцов, 2008

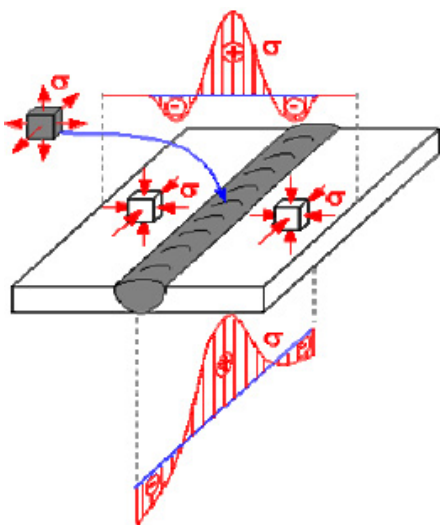


Рис. 1. Распределение остаточных напряжений в сварном шве

При воздействии интенсивного ультразвука на рабочую технологическую среду имеют место следующие факторы.

1. Генерирование и передача тепла.

При распространении ультразвука в любой среде неизбежны потери энергии, связанные с ее преобразованием в тепло. Дополнительное тепловыделение оказывает влияние на различные процессы, происходящие в веществе.

2. Кавитация. Большая часть процессов в жидкостях сопровождается явлением ультразвуковой кавитации и возникновением акустических течений. Кавитация приводит к эрозии металлов, а в сочетании с другими эффектами обуславливает реализацию процессов диспергирования, гомогенизации, эмульгирования, интенсифицирует диффузию.

3. Акустические течения. Под акустическими течениями понимают стационарные вихревые микро- и макротоки жидкости, возникающие в ультразвуковом поле. При колебании воздушного пузырька вблизи поверхности твердого тела создаются характерные микротоки, воздействующие на технологические процессы в жидкостях.

4. Химические эффекты. Ультразвуковая энергия влияет на химические реакции, ускоряя их (прежде всего окислирование, полимеризацию, деполимеризацию, электрохимические и другие процессы).

5. Диффузионные эффекты. Ультразвуковая энергия интенсифицирует и ускоряет процессы диффузии через стенки клеток, пористые мембраны и фильтры. Интенсивное перемешивание жидкости под действием кавитации и акустических течений приводит к тому, что эффективная толщина пограничного слоя на поверхности раздела жидкость – твердое тело уменьшается, а скорость диффузии возрастает.

На рис. 2 показана схема устройства снятия остаточных напряжений. На расстоянии 50–150 мм от электрода (горелки) 2 на держателе 3 при помощи специального кронштейна 4 закреплен ультразвуковой излучатель 5 под углом 10–20° к плоскости сварного соединения 1, который в процессе сварки перемещается вместе с электродом (горелкой). Ультразвуковой излучатель подключен к ультразвуковому генератору 6, режимы работы которого устанавливаются ЭВМ 7.

Ультразвуковые колебания оказывают воздействие на процесс кристаллизации металла сварного шва, измельчая и упорядочивая его структуру. Кроме того, ультразвуковые колебания оказывают влияние на температуру металла, устанавливая тепловое равновесие в решетке, а также производят дегазацию расплава [4]. Эти явления приводят практически к полному снятию остаточных напряжений в сварных соединениях.

Было установлено, что при воздействии ультразвука в процессе автоматической сварки образцов из сталей 08X18H10T и Ст3 структура металла в сварном шве и околошовной зоне становится мелкозернистой и однородной (рис. 3, 4). Воздействие ультразвука в процессе сварки повышает пластичность металла, исключает образование концентраторов напряжений и существенно уменьшает вероят-

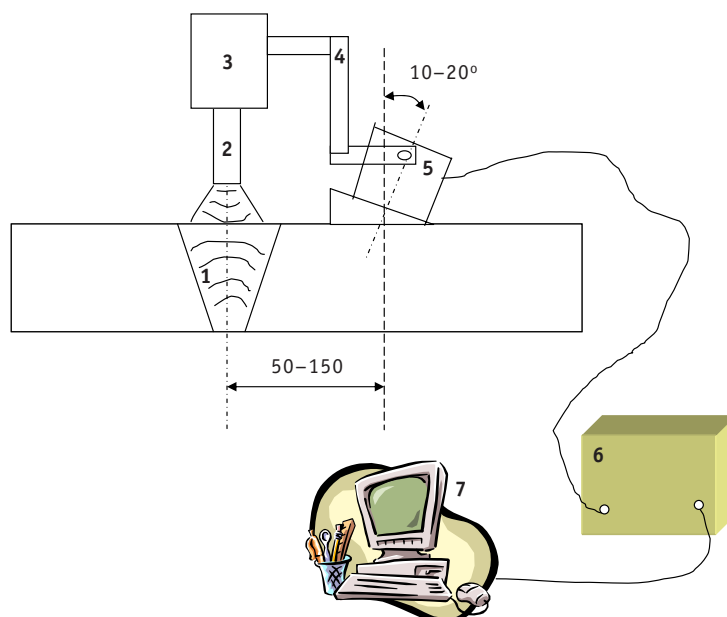
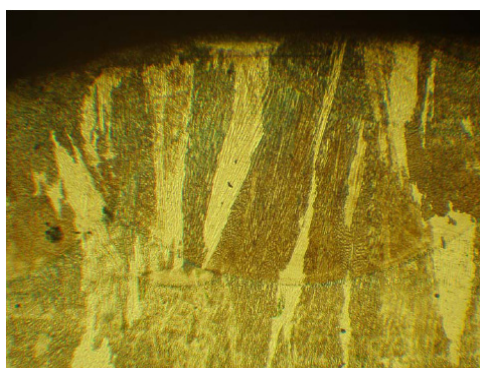


Рис. 2. Устройство снятия остаточных напряжений: 1 – сварное соединение, 2 – электрод (горелка), 3 – держатель, 4 – кронштейн, 5 – ультразвуковой излучатель, 6 – ультразвуковой генератор, 7 – ЭВМ



а



б

Рис. 3. Шлифы сварного шва аустенитной стали 08X18H10T сваренного: а – без воздействия ультразвука, б – с воздействием ультразвука (увеличение 100 \times)

ность появления несплошностей в сварных соединениях. Создание мелкозернистой однородной структуры устраняет также известные трудности ультразвукового контроля сварных соединений аустенитных сталей. Кроме того, исследования показали, что воздействие ультразвука в процессе сварки увеличивает прочностные характеристики сварных соединений.

На основе результатов исследований было разработано и изготовлено автоматизированное ультразвуковое устройство снятия остаточных напряжений в сварных соединениях трубопровода Ду 300 мм контура КМПЦ реактора РБМК, перемещающееся синхронно со сварочным автоматом. Структурная схема автоматизированного ультразвукового устройства показана на рис. 5, внешний вид механизма перемещения ультразвуковых преобразователей – на рис. 6.

Для управления механизмом синхронизации перемещения ультразвуковых магнитострикционных преобразователей используются девять пневмоцилиндров

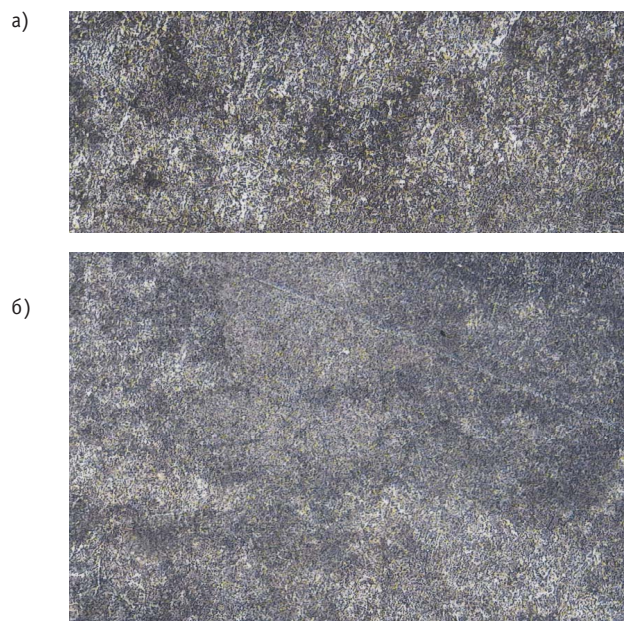


Рис. 4. Шлифы сварного шва из стали Ст 3 сваренного: а – без воздействия ультразвука, б – с воздействием ультразвука (увеличение 100^х)

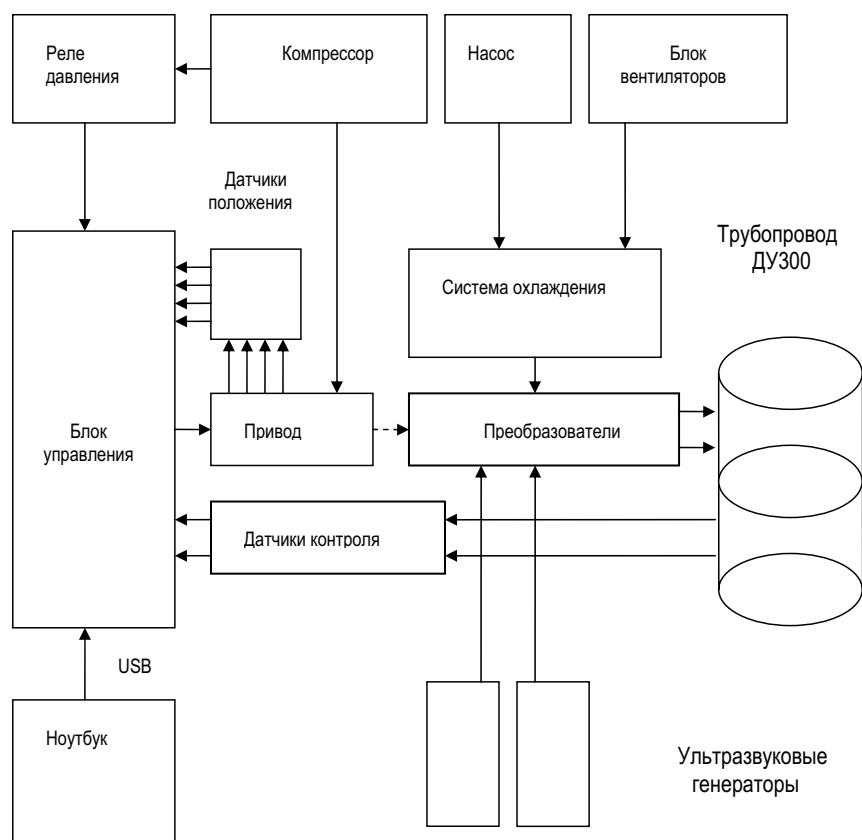


Рис. 5. Структурная схема автоматизированного ультразвукового устройства

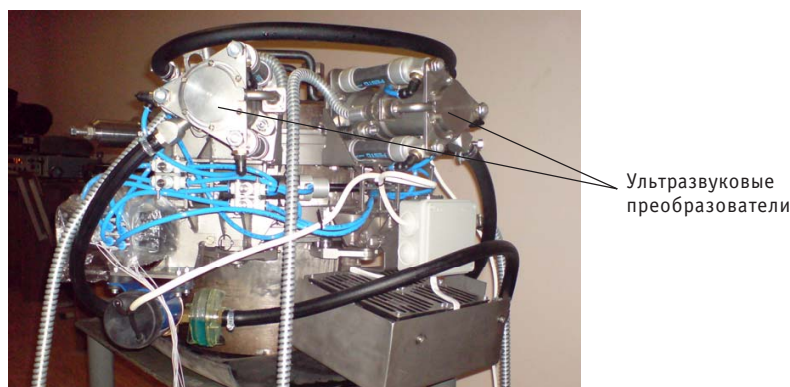


Рис. 6. Механизм перемещения ультразвуковых преобразователей

ЗМЕН-5/2-1/8-Р-В с электромагнитными катушками MSN1 24В и светодиодными прокладками ME-LD-12-24DC. Один пневмоцилиндр обеспечивает перемещение механизма синхронизации вдоль сварного шва, два – торможение механизма синхронизации, шесть других – прижатие магнитострикционных преобразователей к поверхности трубы.

В качестве датчиков положения применялись датчики SME-8-K-LED.

Блок управления механизмом перемещения построен по магистрально-модульному принципу. В состав блока входят:

- 1) модуль микропроцессора;
- 2) модуль ввода-вывода дискретных сигналов;
- 3) модуль ввода-вывода импульсных сигналов;
- 4) модуль сопряжения с датчиками положения;
- 5) модуль сопряжения с каналами связи;
- 6) модули питания ИСН-24, ИПМ-6, ПНС-27/12 и сетевой фильтр.

Модуль микропроцессора является основным модулем в блоке управления и предназначен для реализации алгоритма управления механизмом устройства по заданной программе, а также для управления функциональными модулями. Основу модуля составляет микропроцессор, имеющий внутренний тактовый генератор, тактовая частота которого вдвое меньше частоты кварцевого резонатора G1. Микропроцессор имеет совмещенную восьмиразрядную шину младших адресов и данных, пять уровней прерывания, последовательные вход и выход ввода и вывода информации. Особенностью модуля микропроцессора является наличие схемы выработки сигнала ожидания, который вырабатывается при обращении к устройствам ввода-вывода как внутри модуля микропроцессора, так и к соединенным с магистралью, при этом в первом случае длительность сигнала определяется тактовой частотой микропроцессора, а во втором – может быть произвольной. Программируемый таймер содержит три независимых канала, два из которых предназначены для синхронизации интерфейсов последовательного ввода-вывода, а третий – для выработки временного интервала, подаваемого на вход прерывания микропроцессора. Триггеры Шмитта формируют сигналы запроса внешних прерываний и подают их на микропроцессор. Три из пяти входов прерывания могут быть с помощью переключателей подключены к выходам таймера и выходам запроса приемника и передатчика интерфейсов, при этом входы прерываний отключаются от линий запроса внешних прерываний. К особенностям модуля микропроцессора следует также отнести наличие энергонезависимого оперативного запоминающего устройства, которое питается в случае отключения основного питания

от внутреннего источника. Переключение питания на резервное происходит автоматически с помощью схемы включения резервного питания. Схема блокировки выборки и записи оперативного запоминающего устройства при переходе на резервное питание обеспечивает переход микросхем в режим хранения информации, что снижает их ток потребления и исключает запись ложной информации. Схема повторного запуска обеспечивает повторный начальный запуск программы в случае, если программа за определенное время не сможет перезапустить эту схему, обращаясь к ней как к внешнему устройству, т.е. при зависании программы.

Модуль ввода-вывода дискретных данных работает под управлением модуля микропроцессора и предназначен для выдачи сигналов на внешние устройства и команд управления в модули управления пневмоприводами, а также для ввода в модуль микропроцессора информации о состоянии дискретных датчиков модуля управления приводами механизма.

Обращение к портам ввода-вывода осуществляется по адресам, которые определяются коммутацией переключателей. Каналы дискретного ввода-вывода производят инвертирование сигналов. Модуль ввода-вывода импульсного сигнала предназначен для ввода в цифровую систему сигналов с частотно-импульсных датчиков положения со смещенной синусно-косинусной последовательностью и вывода управляющих частотно-импульсных сигналов.

Данное автоматизированное устройство было испытано в промышленных условиях на Курской АЭС. Получены образцы сварных соединений трубопровода Ду 300 мм, с ультразвуковым воздействием и без него, которые были переданы в ЦНИИТМАШ для проведения исследований.

Для оценки уровня остаточных напряжений в образцах трубопровода Ду 300 мм контура КМПЦ реактора РБМК в ЦНИИТМАШ был применен метод сверления отверстий. В соответствии с данным методом на поверхности трубы были наклеены розетки из трех тензодатчиков. Показания датчиков регистрировались до и после сверления с использованием цифрового тензометрического модуля Field Point (производство фирмы National Instruments, США) и программы LabVIEW. Калибровка тензодатчиков проводилась при консольном изгибе на балке равного сопротивления. Значения осевых и окружных напряжений $\sigma_{ос}$ и $\sigma_{окр}$ рассчитывались по приведенным в монографии И.А. Биргера «Остаточные напряжения» зависимостям [5]. Измерения проводились на наружной и внутренней поверхностях трубы, а также на основном металле на наружной поверхности трубы в зоне, удаленной от центра шва на 40 мм (с двух сторон от шва). Измерения показали практически полное снятие остаточных напряжений. Кроме того, испытания механических характеристик сварных соединений показали, что относительное удлинение образцов, сваренных с применением ультразвука примерно в 4.5 раза, а сужение в 1.5 раза выше, чем образцов из трубы без ультразвуковой обработки. Образцы после испытаний показаны на рис. 7.

Разрушение образцов, вырезанных из трубы с применением ультразвуковой обработки происходило по основному металлу, а образцов из трубы, сваренной по штатной технологии, без ультразвуковой обработки, по металлу шва.

ВЫВОДЫ

1. Ультразвуковая обработка в процессе сварки оказывает существенное влияние на формирование поля остаточных напряжений в зоне шва. Изменение напряжений (снижение растягивающих напряжений, вплоть до изменения знака) выявлено и на внешней, и на внутренней поверхностях трубы. Эффективность этого процесса зависит от мощности источника ультразвука [6–9].



Рис. 7. Внешний вид образцов после испытаний: верхний образец вырезан из трубы с применением ультразвуковой обработки, нижний – из трубы, сваренной по штатной технологии, без ультразвуковой обработки

2. Под действием ультразвука улучшаются механические свойства сварного соединения. Относительное удлинение образцов, сваренных с применением УЗ, примерно в 4.5 раза, а сужение в 1.5 раза выше, чем образцов из трубы без УЗ обработки.

3. Микроструктура сварного соединения, обработанного ультразвуком, становится мелкозернистой, что позволяет в дальнейшем проводить его ультразвуковой контроль на наличие несплошностей.

Литература

1. Кудрявцев П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. – М.: Машиностроение, 1964.
2. Пухтер О.С. Влияние собственных напряжений, возбуждаемых в материале, на пределе упругости // Чехословацкая тяжелая промышленность. – 1961. – № 1.
3. Вологдин В.П. Деформации и напряжения при сварке судовых конструкций. – М.: Оборонгиз, 1955.
4. Абрамов О.В., Хорбенко И.Г. Ультразвуковая обработка металлов. – М: Машиностроение, 1984.
5. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
6. Трофимов А.И., Минин С.И. Способ снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов/Патент №2281192 С2 В23К 28/02 (10 августа 2006 г.).
7. Трофимов А.И., Минин С.И. Способ снятия остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов АЭС и ТЭС/Патент №2268312 С2 В23К 28/02 (20 января 2006 г.).
8. Трофимов А.И., Минин С.И. Способ повышения однородности структуры металла сварных соединений аустенитных сталей/Патент №2270441 С1 G01N 29/04 (20 февраля 2006 г.).
9. Трофимов А.И., Минин С.И. Способ снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов/Патент №2280547 С2 В23К 28/00, С21D 9/50 (27 июля 2006 г.).

Поступила в редакцию 5.12.2007

УДК 621.039.58

The Automated Ultrasonic Device of Removal of Residual Pressure in Welded connections of the atomic power station \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.G. Kalenishin, A.I. Romantsov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 7 illustrations. – References – 9 titles.

The method of removal residual pressure is submitted by influence of ultrasound a wave on welded connection during welding. Advantage of the submitted method before traditional methods is shown. The description of the automated ultrasonic device of removal of the residual pressure moving synchronously with the welding automatic device is given.

УДК 539:551.508

Correction of Data on Radionuclide Contents in the Atmospheric Boundary Layer as Inferred from the Measurements of Natural Radionuclide Contents \M.V. Propisnova, V.M. Kim; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 4 pages, 2 illustrations. – References – 18 titles.

Presented is a method used for correction of radio nuclide volumetric activities in the atmospheric boundary layer based on the measurements of ^7Be volumetric activity made at the neighboring observation sites.

УДК 621.039.51:004

Verification of SCALE 5 code package: Nuclear Safety \A.V. Egorov, S.N. Filimonov, V.V. Artisyuk, A.N. Shmelev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 7 illustrations. – References – 13 titles.

The purpose of present paper is verification of licensed computer code package SCALE 5, used in INPE for criticality safety and burnup calculations. This verification oriented on fundamental problems of nuclear safety, constrained with criticality analysis. Criticality calculations of classical uranium and plutonium experiments (GODIVA, JEZEBEL) and heterogeneous spherical assembly for accurate definition of critical mass of transuranics (^{244}Cm , ^{237}Np , ^{238}Pu) has been done. Also sensitivity analysis of obtained results for nuclear data was presented. On the basis of sensitivity and uncertainly analysis suggested model for experiment with ^{234}U for specification its critical mass.

УДК 621.039.548

Creation of Neutron-Physical Conditions in the MIR Reactor Suitable for Testing VVER Fuel Rods under Local Accidental Conditions \V.V. Kalygin, I.V. Kiseleva, A.P. Malkov, V.N. Shulimov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations. – References – 13 titles.

Considered are issues of creation of conditions for safe testing of VVER fuel rods in the MIR reactor core under conditions characteristic of the LOCA accidents. The design of experimental devices was defined, core configuration and position of control rods were chosen so that the required parameters can be reached at a minimum reactor power and safety of the experiments can be provided. Data on the reactor testing results are presented.

УДК 621.039.548

Testing of VVER Fuel Rods in the MIR Reactor under Power Ramping Conditions \A.V. Burukin, A.F. Grachev, V.V. Kalygin, A.B. Ovchinnikov, V.P. Smirnov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References – 9 titles.

The testing methodology of standard and refabricated VVER fuel rods in the loop facility of research reactor MIR is considered at different fuel burnups under power ramping conditions. Taking account of the analysis of main requirements to such tests, methodical approaches to the tests were presented including peculiar features of the reactor core configuration and provision of a fast power increase. Summarized data on the performed in-pile experiments, where the above methodology was used, and results of post-irradiation material science experiments are presented.