

## ИННОВАЦИОННЫЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ АЭС ПРИ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИИ

**А.И. Трофимов\*, С.И. Минин\*, М.А. Трофимов\*, Ю.А. Кириллов\*\***

*\*НИЯУ МИФИ ООО «Ультразвуковые технологии», г. Обнинск*

*\*\*ЗАО «Петрозаводскмаш», г. Петрозаводск.*



Приведено теоретическое и экспериментальное обоснование воздействия ультразвука на сварные соединения в процессе сварки оборудования атомных станций. В результате воздействия ультразвука структура металла сварного шва становится мелкозернистой и однородной, исключаются внутренние напряжения в металле, происходит снятие остаточных напряжений в околошовной зоне. Это приводит к существенному повышению прочностных характеристик и ресурса оборудования атомных станций. Приведены технологии воздействия ультразвука на процессы сварки и наплавки.

**Ключевые слова:** ресурс, сварные соединения, остаточные напряжения, ультразвук.  
**Key words:** resource, welded connections, the residual voltage, ultrasound.

Повышение ресурса оборудования атомных станций с реакторами ВВЭР является особенно актуальным при заявленных сроках службы до 60-ти лет и более (до 100 лет). Для реакторных установок на быстрых нейтронах необходимость повышения ресурса оборудования дополнительно связана с тем, что реактор, теплообменник и другое оборудование первого контура находятся в корпусе, заполненном жидким металлом, что затрудняет проведение ремонтных работ.

Мировой опыт показывает, что ресурс оборудования атомных станций определяется, главным образом, ресурсом сварных соединений. Несущая способность сварных соединений значительно ниже, чем основного металла. Это связано с возникновением в процессе сварки внутренних и остаточных напряжений, которые складываются с эксплуатационными напряжениями, что приводит к разрушению металла сварных соединений.

Образование остаточных напряжений происходит вследствие

- термомодеформационных процессов, создающих остаточные напряжения в околошовной зоне сварного соединения;
- физико-химических процессов – при кристаллизации в металле образуются физические и химические неоднородности, которые являются источниками внутренних напряжений»;

© А.И. Трофимов, С.И. Минин, М.А. Трофимов, Ю.А. Кириллов, 2012

- образования столбчатых кристаллов, на границах которых могут возникать микротрещины

- снижения стойкости к межкристаллитной коррозии.

В настоящее время для снижения остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов и оборудования атомных станций применяются метод термического отпуска и деформационные методы.

Термическая обработка включает в себя следующие стадии: нагрев, выдержка при заданной температуре и остывание. При отклонении от рассчитанного режима возникают дополнительные остаточные напряжения. При локальном нагреве дополнительные напряжения возникают на границе нагрева.

Деформационные методы основаны на создании в сварном шве и околошовной зоне пластической деформации, противоположной по знаку остаточной сварочной деформации. При деформации локальных участков на границах возникают дополнительные остаточные напряжения.

Термические и деформационные методы позволяют снизить остаточные напряжения в околошовной зоне, но не устраняют структурную нестабильность и физико-химические неоднородности, в результате которых образуются внутренние напряжения в металле сварного шва и микротрещины.

В ИАТЭ НИЯУ МИФИ разработана технология дуговой сварки с воздействием ультразвука в процессе сварки, в результате которой структура металла становится мелкозернистой и однородной, исключаются внутренние напряжения, происходит снятие остаточных напряжений в околошовной зоне [1, 2]. Схема воздействия ультразвука на сварное соединение в процессе сварки приведена на рис. 1.

Схема механизма воздействия ультразвука на процесс кристаллизации металла сварного соединения приведена на рис. 2.

Роль отдельных факторов ультразвукового поля в создании тех или иных структурных изменений в металле зависит от условий кристаллизации. В различных зонах кристаллизующегося расплава может преобладать влияние какого-либо из факторов ультразвукового поля. Так, например, диспергирование кристаллов может происходить в двухфазной зоне, а акустические потоки и перемешивание могут быть только в жидкой фазе. Если уменьшение величины зерна и устранение столбчатой структуры происходят за счет ультразвукового диспергирования, то изменение характера распределения фаз определяется, главным образом, изменением градиента температур в расплаве и перемешиванием. При этом причинами диспергирования являются кавитация, силы вязкого трения, колебательные и радиационные давления. С

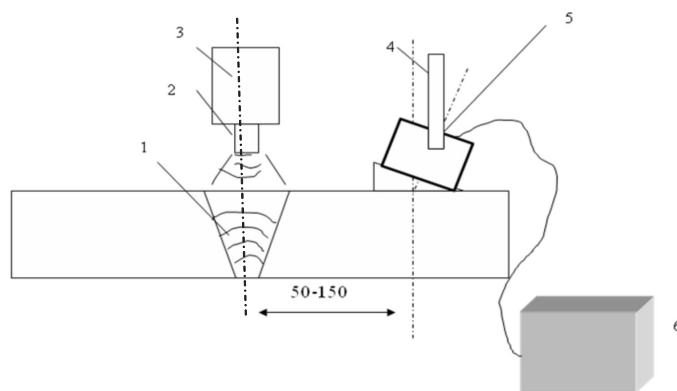


Рис. 1. Схема воздействия ультразвука на сварное соединение в процессе сварки: 1 – сварное соединение; 2 – электрод; 3 – держатель; 4 – кронштейн; 5 – ультразвуковой преобразователь; 6 – ультразвуковой генератор



Рис. 2. Схема механизма воздействия ультразвука на процесс кристаллизации и дегазации металла

этим же параметрами связано увеличение скорости зарождения центров кристаллизации.

Кавитационные явления в расплаве могут возникнуть если колебательное давление в нем превышает определенную, характерную для данного вещества, величину. В расплавленном металле условия для возникновения и развития кавитационных процессов благоприятны. Одной из причин этого является значительная насыщенность расплавов растворенными газами, способствующая образованию кавитационных пузырьков. Кроме того, вследствие различной растворимости газов в твердой и жидкой фазах на фронте кристаллизации образуется избыток свободного газа, что должно создавать в этой области дополнительный источник кавитационных зародышей и снижать порог кавитации.

При дегазации расплавов в ультразвуковом поле в режиме развитой кавитации в нем протекают следующие процессы: зарождение кавитационных пузырьков; рост пузырьков в результате направленной диффузии из расплава в полость и вынос пузырьков на поверхность расплава.

Механизм воздействия ультразвука на околошовную зону заключается в следующем. Введение ультразвуковых колебаний в металл необходимо рассматривать как изменение состояния металла при повышении температуры. Воздействие ультразвука приводит к повышению внутренней энергии металла за счет повышения степени возбуждения колебаний решетки, точечных дефектов, дислокаций.

Эксперименты, проведенные на образцах из алюминия показали, что предел текучести металла образцов из алюминия наступает при интенсивности ультразвуковых колебаний  $50 \text{ Вт/см}^2$ . Аналогичное состояние наступает при нагреве до  $600^\circ\text{C}$ . При этом плотность акустической энергии –  $10^{15} \text{ эВ/см}^3$ , плотность тепловой энергии –  $10^{22} \text{ эВ/см}^3$ . Этот физический эффект объясняется тем, что тепловая энергия поглощается всем объемом металла, ультразвуковая, главным образом, – дислокациями и границами зерен, определяющими процесс пластичности.

Ниже приведены результаты исследований воздействия ультразвука на процесс сварки оборудования действующих АЭС.

В настоящее время на действующих АЭС с реакторами РБМК-1000 наиболее проблемными являются сварные соединения циркуляционных трубопроводов Ду 300 мм, на АЭС с реакторами ВВЭР – сварные соединения парогенераторов ПГВ-1000 и ПГВ-440.

Анализ результатов исследования причин образования трещиновидных дефектов в сварных соединениях трубопроводов Ду 300 мм, выполненных из стали аустенит-

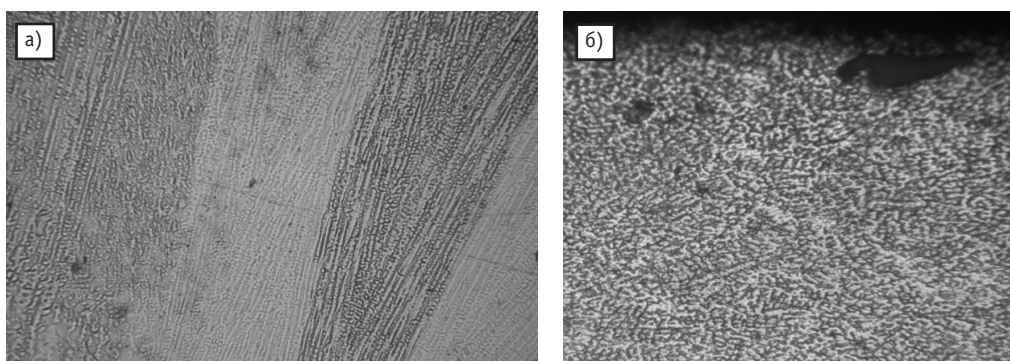


Рис. 3. Микроструктура аустенитного металла сварного шва трубопровода Ду 300 мм (сталь 08X18H10T), полученного а) – без воздействия ультразвука, б) – с воздействием ультразвука (увеличение 125\*)

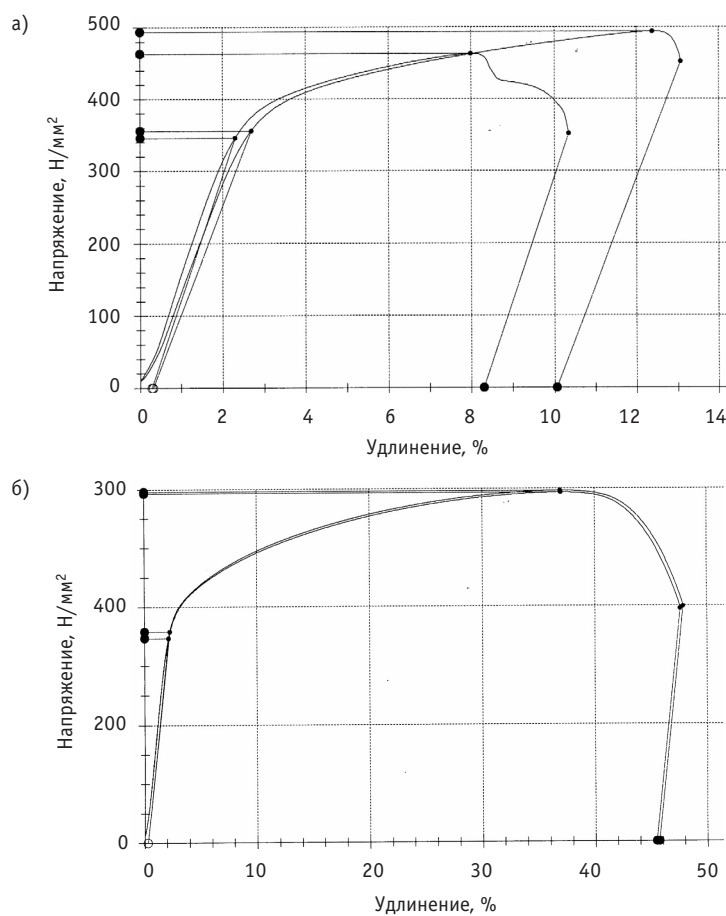


Рис. 4. Характеристики деформирования образцов, вырезанных из металла шва, сваренного а) без применения УЗ-обработки; б) с применением УЗ-обработки

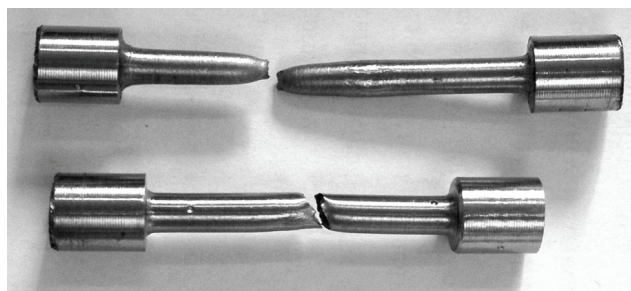


Рис. 5. Внешний вид образцов после испытаний: верхний образец вырезан из трубы с применением ультразвуковой обработки, нижний – из трубы, сваренной по штатной технологии без ультразвуковой обработки

ного класса 08X18H10T, показал, что образование и развитие трещиновидных дефектов происходит по механизму межкристаллитного растрескивания вследствие наличия значительных остаточных напряжений и структурных неоднородностей металла сварных соединений.

Результаты исследований сварных соединений образцов трубопроводов Ду 300 мм, выполненных с воздействием ультразвука, показали, что структура металла сварного соединения становится мелкозернистой и однородной (рис. 3). Происходит существенное уменьшение остаточных напряжений и повышение пластических свойств. Относительное удлинение образцов из металла сварного соединения, выполненного с воздействием ультразвука, повысилось в 4,5 раза (рис. 4, 5).

Исследования моделей сварных соединений №111 ПГВ-1000 и №23 ПГВ-440, выполненных с воздействием ультразвука, показали аналогичные результаты. Структура металла сварного соединения после ультразвуковой обработки изменилась и стала мелкозернистой и однородной (рис. 6, 7), уменьшились остаточные напряжения в 2,5–3 раза.

Проведены исследования образцов сварных соединений труб большого диаметра, изготовленных из сталей 13Г1С-У, выполненных с воздействием ультразвука в ОАО «Челябинский трубопрокатный завод». Результаты исследований показали, что воздействие ультразвука приводит к изменению структуры металла сварного соединения (рис. 8) и существенному повышению его механических свойств. Ударный изгиб образцов, сваренных с воздействием ультразвука, происходит при напряжениях в 5,3 раза выше, чем образцов, сваренных без воздействия ультразвука.

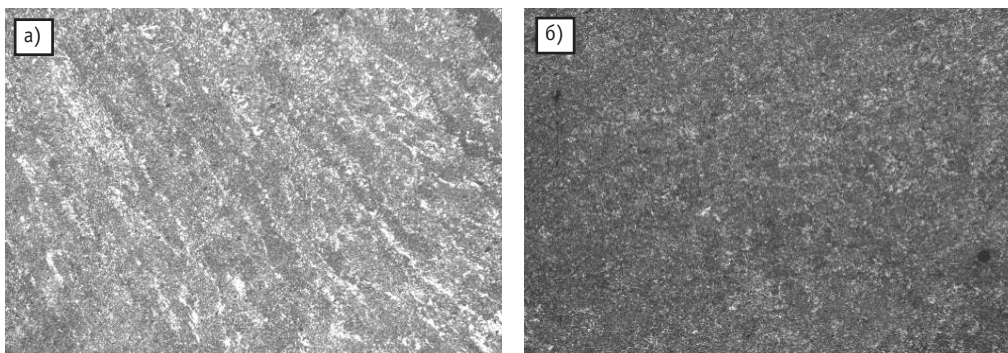


Рис. 6. Микроструктура шва №111 ПГВ-1000М, сформированная а) без воздействия ультразвука; б) с воздействием ультразвука

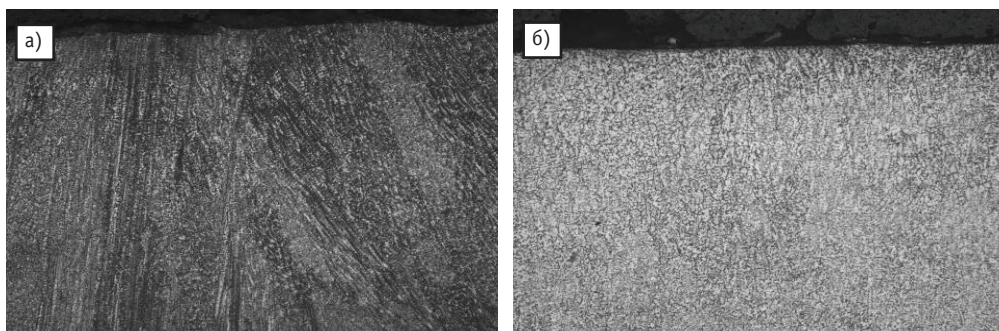


Рис. 7. Микроструктура шва №23, сформированная а) без воздействия ультразвука; б) с воздействием ультразвука

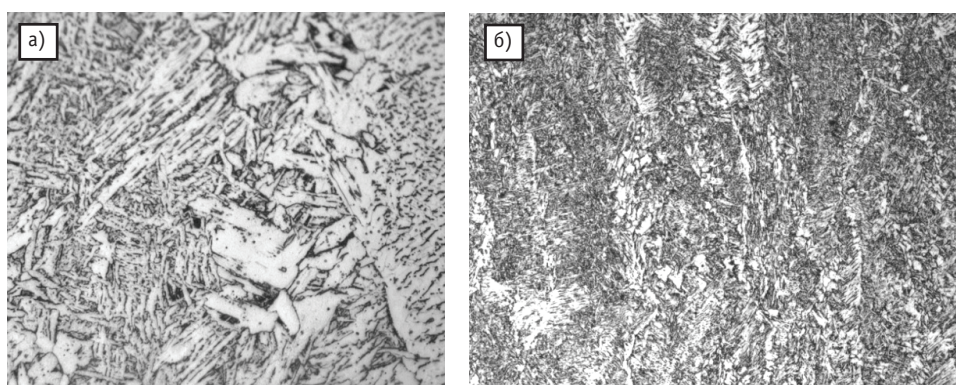


Рис. 8. Микроструктура шва трубы 13Г1С-У, сформированная а) без воздействия ультразвука; б) с воздействием ультразвука

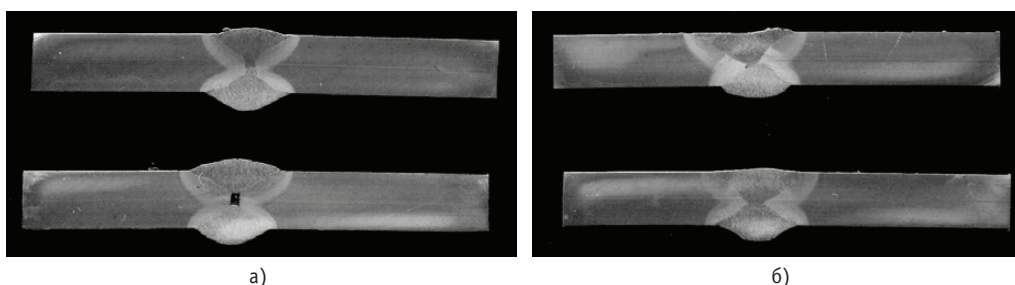


Рис. 9. Микрошлифы сварных соединений стали 12Г1С-У, полученных а) без воздействия ультразвука; б) с воздействием ультразвука

Кроме того, при воздействии ультразвука в процессе сварки исключаются непровары (рис. 9).

Разработаны также технологии ультразвуковой обработки металла в процессе наплавки трубопроводов (рис. 10) и трубопроводной арматуры (рис. 11), в результате которых существенно повышаются качество наплавки и, соответственно, ресурс плакированных трубопроводов и трубопроводной арматуры.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Ультразвуковая обработка сварных соединений в процессе сварки оказывает существенное влияние на прочностные характеристики и, собственно, на ресурс оборудования атомных станций. Микроструктура металла в зоне сварного соединения

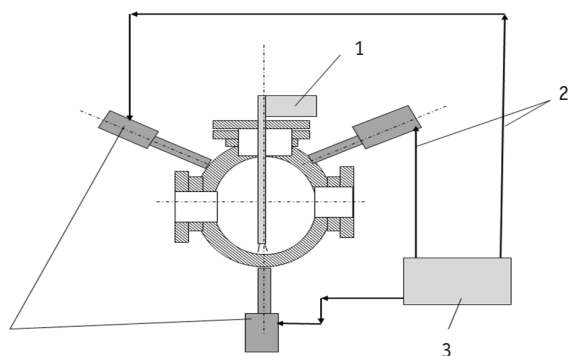


Рис. 10. Схема устройства ультразвуковой обработки наплавки трубопроводной арматуры: 1 – сварочный автомат; 2 – линии связи; 3 – блок ультразвуковых генераторов

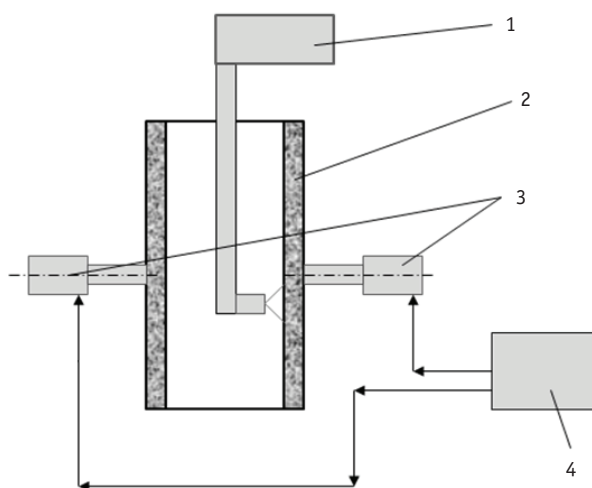


Рис. 11. Схема устройства ультразвуковой обработки наплавки трубопровода: 1 – сварочный автомат; 2 – труба; 3 – ультразвуковые преобразователи; 4 – блок ультразвуковых генераторов

становится мелкозернистой и однородной. Существенно уменьшаются остаточные напряжения. Повышаются механические прочностные свойства металла.

### **Литература**

1. Трофимов А.И., Трофимов М.А., Минин С.И. Закономерность изменения величины остаточных напряжений в металлах и сплавах при воздействии ультразвука. Научное открытие. Диплом №375, 2009 г.
2. Трофимов А.И. Физические основы ультразвукового метода снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов и сплавов. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 239 с.

Поступила в редакцию 10.04.2012

**УДК 621.039.586**

*Innovative Ultrasonic Technology to Improve the Life of NPP Equipment at its Manufacturing* \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, Y.A. Kirillov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 11 illustrations. – References, 2 titles.

Provides a theoretical and experimental justification for the effects of ultrasound on the welds during welding equipment of nuclear power plants. As a result of exposure to ultrasound metal structure welding seam is fine-grained and homogeneous, excludes internal voltage in metal, is removal of residual stresses in in parajoint zone. This leads to a significant increase in strength characteristics and resource equipment of nuclear power stations. Impact of ultrasound technology are in the process of welding and surfacing.

**УДК 621.039.586: 531.78.781**

*To Definition of the Tension of Metal Elements of the Power Equipment of the Nuclear Power Plants Acoustic Method* \V.V. Hudasko, A.I. Trofimov, S.A. Kurkin, V.G. Malynkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 18 titles.

In work the new acoustic method of definition of a tension of metal of elements of the equipment of the nuclear power plant is presented: based on effect акустоупругости; I consider-shchy deformation of microplatforms and micropieces; using more exact, than sushchest-vuet a method of definition of modules of the third order. This method allows to raise accuracy of measurement of a tension of metal of elements of the equipment of the atomic power.

**УДК 621.039.58: 519.23/25**

*A Method for Detecting Failure Data Flow Heterogeneity of Nuclear Power Plant Equipment in Failure Flow* \V.A. Chepurko, S.V. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 tables, 2 illustrations. – References, 14 titles.

Describes the methodology that allows to evaluate the non-homogeneity parameter flow of failures of NPP equipment. Along with the point estimate of the reliability index, an algorithm of constructing its interval estimate allows you to check the statistical significance of hypotheses about the parameter. Algorithm is described in detail the decision criterion with a prescribed level of significance. Analyzed a number of test cases. To detect heterogeneity, processed real data on failures of recharge and boron control NPP VVER-1000 5 unit Novovoronezh.

**УДК 532.526.4: 621.039.534**

*Validation of the Volume Flow Rate Measurements of RBMK Technological Channels Obtained with the «Shadr-32M» Flowmeter* \E.F. Avdeev, V.I. Belozarov, A.Ya. Ustyuzhanin, V.V. Maximovsky, N.D. Rasenkov, N.E. Yushenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 6 titles.

The experimental data are processed for a set of «Shadr-32M» flowmeters used at Kursk NPP. The data are obtained for different coolant temperatures. The work is done to obtain a correlation between the measured flow rate and the actual one.

**УДК 621.039.53**

*Optimization of the Welding Process Equipment and Piping Plant by Modeling of Welded Joints* \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, D.A. Egorov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 6 illustrations. – References, 1 title.

Presented by the simulation of the thermal cycle of welding process on the example program SYSWELD. Modelling to optimize the welding process, including taking into account the effects of ultrasound, which will increase the strength properties of welded joints of NPP equipment.

**УДК 621.039.534**

*Experimental Study of the Origin and Characteristics of Gas Flow in Cavitation Lead Coolant Innovative Nuclear Fast Reactor* \A.V. Beznosov, P.A. Bokov, A.V. Lvov, O.O. Novozhilova, E.G. Novinsky, V.V. Lemekhov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 1 title.