

## ВЕРИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ РАСХОДОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛАХ РЕАКТОРОВ РБМК РАСХОДОМЕРАМИ «ШАДР-32М»

**Е.Ф. Авдеев, В.И. Белозеров, А.Я. Устюжанин, В.В. Максимовский,  
Н.Д. Разенков, Н.Е. Ющенко**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск*



Экспериментальным путем получены поправки к показаниям расходомеров «Шадр-32М», которые могут быть использованы для определения действительных расходов воды в технологических каналах реакторов РБМК. Эти поправки учитывают зависимость показаний расходомеров от температуры прокачиваемой воды.

**Ключевые слова:** расходомер, Шадр-32М, реактор РБМК, технологический канал, действительный расход, температура, вязкость, гидростенд.

**Key words:** «Shadr-32M» flowmeter, RBMK-type reactor, technological channel, actual flow rate, temperature, viscosity, hydraulic test facility.

Проблема верификации измерения расходов расходомерами типа «Шадр-32М», устанавливаемых в технологических каналах (ТК) реакторов РБМК, возникает в связи с разверкой баланса расходов воды, поступающей в реактор через групповые коллекторы, и суммой расходов, измеренных в ТК расходомерами «Шадр-32М». Причинами завышенных показаний расходомеров могут являться следующие. Частота вращения шарика, фиксируемая магнитоиндукционным преобразователем (МИП-1), зависит от плотности, скорости (расхода) и вязкости теплоносителя. Уменьшение вязкости воды с ростом температуры на порядки превышает уменьшение плотности, поэтому практически для того же объемного расхода при повышении температуры частота вращения шарика увеличивается. Неправильные показания расходомера могут быть связаны также с погрешностями изготовления рабочей части расходомера (шарика и кольцевой камеры для него) или с изменениями шероховатости поверхности шарика, что неоднократно замечено в эксплуатационной практике. Последнее вызывает изменение режима обтекания шарика (как плохо обтекаемого тела), кризис сопротивления и соответственно отклонения частоты его вращения от номинальной, что может быть установлено только поверочными проливками.

Техническими паспортами расходомеров «Шадр-32М» определена погрешность измерения ими расхода в диапазоне температур 50–280°C ~12,5%, в том числе за

---

© **Е.Ф. Авдеев, В.И. Белозеров, А.Я. Устюжанин, В.В. Максимовский, Н.Д. Разенков, Н.Е. Ющенко, 2012**

счет температурного фактора – 8,3%. Чтобы снизить погрешность, необходимо найти поправки к показаниям расходомеров, которые учитывают влияние температуры воды на проводимые измерения. Это и является основной целью представленной работы.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Поверочными проливками испытано 94 первичных преобразователя «Шадр-32М» для энергоблоков №1–4 Курской АЭС [1]. Диагностика расходомеров и верификация измерения ими расходов проводились на гидростенде кафедры теплофизики ИАТЭ НИЯУ МИФИ с включенной в контур стенда моделью реактора при двухпетлевой компоновке (две напорные и две сливные линии), спроектированным и смонтированным в 2004–2006 гг., описание которого приведено в [2].

Рабочий участок для проливки расходомеров «Шадр-32М» с подводящей и отводящей трубами Ду-50 включен через конические переходники в контур одной из сливных линий с диаметром труб Ду-100, так как на одной напорной и одной из сливных линий установлены метрологически аттестованные электромагнитные расходомеры (ЭМР) «Взлет-Эр», которые имеют малую погрешность только при больших расходах ~80–135 м³/ч (их относительная погрешность  $\pm(0,9+0,15/V_{\text{ср}})\%$ ). Поэтому необходимые расходы через «Шадр-32М» от 8 до 50 м³/ч реализованы через разность больших расходов в напорной линии одной петли и сливной линии в другой петле, измеряемые с малой погрешностью. Например, при подаче расхода в напорную линию 130 м³/ч и сливную линию другой петли 120 м³/ч пропускаемый расход через «Шадр-32М» составляет 10 м³/ч. Такая схема проливки позволила получать малые относительные погрешности измерения действительного расхода через «Шадр-32М»  $\pm 1,4\%$  (даже при условии одинаковой направленности погрешности обоих ЭМР). Установленные в двух питательных баках гидростенда подогреватели воды мощностью 42 кВт обеспечивали повышение температуры до 70°C.

В порядке подготовки к массовым проливкам первичных преобразователей «Шадр-32М» на гидростенде с моделью реактора первоначально часть преобразователей проливалась на стенде кафедры «Циркуляционная петля» [3], обеспечивающем расходы только до 25 м³/ч, однако с возможностью измерения действительных расходов тремя независимыми способами:

- метрологически аттестованным расходомером «Вентури»;
- расходомером ИАТЭ (по измеренной максимальной скорости и перепаду давления на длине);
- расходомером ИАТЭ (только по измеренной максимальной скорости) [4].

Температурный режим воды на стенде «Циркуляционная петля» также может устанавливаться до 70°C.

В способе измерения расхода, разработанного на кафедре теплофизики ИАТЭ, повышение точности достигается за счет учета действительного профиля скорости при турбулентном течении на стабилизированных участках труб через измерение максимальной скорости  $U_{\text{max}}$  в центре трубы и перепада давления на длине [5]; в последующих работах [4], [6] проведено его уточнение и экспериментальная верификация.

Обоснованная рекомендованная зависимость для определения объемного расхода  $Q$  по способу ИАТЭ имеет вид

$$Q = \pi a^2 \cdot \left( U_{\text{max}} - 2,885 \sqrt{\frac{\Delta P a}{\rho L}} \right), \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – измеренные потери давления на длине  $L$  с одинаковым по длине радиусом трубы  $a$ ;  $\rho$  – плотность.

Из формулы (1) следует отличная от рекомендованных в справочниках связь между средней и максимальной скоростью [6]:

$$V_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{max}}}{1 + 1.4425\sqrt{\lambda}}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления трения, а расход

$$Q = \pi \cdot a^2 \cdot V_{\text{ср}}. \quad (3)$$

Таким образом, по способу ИАТЭ объемный расход определяется двумя путями:

- по формуле (1), для чего необходимы две измеренные величины – максимальная скорость и потери давления на произвольный длине  $L$ , не имеющей местных сопротивлений;

- по формуле (2) только по измеренной максимальной скорости; уточнение средней скорости осуществляется итерационным процессом по  $\lambda$ .

Поскольку оба пути приводят практически к 100%-му согласию [4], отпала необходимость измерения перепада давления на длине.

Так как в названных двух стендах кафедры на стабилизированных участках течения установлены устройства для измерения максимальной скорости, действительные расходы определялись по способу ИАТЭ, а после установления соответствия способа ИАТЭ и электромагнитных расходомеров «Взлет-Эр» – расходомерами «Взлет-Эр» при массовых проливках.

Независимо от способа измерения действительного расхода при графическом представлении и сравнении в качестве режимного параметра использован измеренный перепад  $\Delta h_p$  между полным напором в центре трубы и статическим напором на стенке, через который определялись максимальные скорости в трубе Ду-50:

$$U_{\text{max}} = \sqrt{2g\Delta h_p}, \text{ (м/с)}. \quad (4)$$

Даже если действительный расход измерялся на трубе Ду-100 непосредственно показывающим расходомером «Взлет», его показания приводились с использованием формул (2) и (4) к режимному параметру  $\sqrt{\Delta h_p}$ , пересчитанному на трубу Ду-50.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Расхождение в показаниях расходомеров «Шадр-32М» и действительных расходов больших 10 м³/ч, при температуре 20°C составляло не более 1,6%. При более высоких температурах для малых расходов (~8 м³/ч) это расхождение доходило до 14%. Измеренные расходы с помощью «Шадр-32М»  $Q_t^{\text{ш}}$  и измеренные действительно расходы  $Q_t^{\text{д}}$  графически представлялись в безразмерном виде в зависимости от режимного параметра  $\sqrt{\Delta h_p}$ :

$$\bar{Q}_t^{\text{ш}} = \frac{Q_t^{\text{ш}} - Q_{\text{min } t}^{\text{ш}}}{Q_{\text{max } t}^{\text{ш}} - Q_{\text{min } t}^{\text{ш}}} = f_1(\sqrt{\Delta h_p}), \quad (5)$$

$$\bar{Q}_t^{\text{д}} = \frac{Q_t^{\text{д}} - Q_{\text{min } t}^{\text{д}}}{Q_{\text{max } t}^{\text{д}} - Q_{\text{min } t}^{\text{д}}} = f_2(\sqrt{\Delta h_p}), \quad (6)$$

где  $t$  – температура теплоносителя.

Расходы через «Шадр-32М» изменялись от 8 до 60 м³/ч в диапазоне температур от 17 до 70°C.

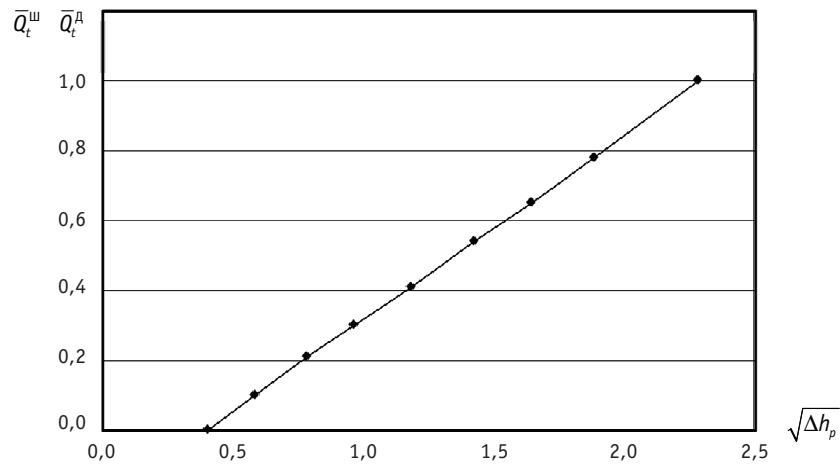


Рис. 1. Значение безразмерных расходов для разных температур и способов измерения расходов

Оказалось, что экспериментальные точки для безразмерных расходов  $\bar{Q}_t^w$  и  $\bar{Q}_t^d$  в зависимости от режимного параметра  $\sqrt{\Delta h_p}$  находятся на одной и той же прямой линии (рис. 1) независимо от способа измерения расхода и температуры:

$$\bar{Q}_t^w = \bar{Q}_t^d = idem \sim k \sqrt{\Delta h_p}, \quad (7)$$

где  $k$  – тангенс угла наклона линии, равный  $0,531 \text{ м}^{-1/2}$ .

При этом значения максимальных и минимальных расходов (при графическом представлении (5) и (6)) принимались для одинаковых режимных параметров  $\sqrt{\Delta h_{p \min}}$ ,  $\sqrt{\Delta h_{p \max}}$ .

Из условия (7) нетрудно получить структуру формулы для определения действительного расхода по измеренному расходу «Шадр-32М»:

$$Q_t^d = Q_t^w \left( 1 - \frac{Q_{\max t}^w - Q_{\max t}^d}{Q_t^w} \right), \quad (8)$$

так как установлено, что  $\frac{Q_{\max t}^d - Q_{\min t}^d}{Q_{\max t}^w - Q_{\min t}^w} \cong 1$  при любой температуре.

По нашим экспериментам второе слагаемое в скобках довольно хорошо аппроксимируется зависимостью

$$\frac{Q_{\max t}^w - Q_{\max t}^d}{Q_t^w} = \left( \frac{t^\circ \text{C}}{20} \right)^{0.05} - 1. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), получим зависимость для определения действительного объемного расхода при любой температуре  $Q_t^d$  по расходу, измеренному «Шадр-32М»  $Q_t^w$  при той же температуре:

$$Q_t^d = Q_t^w \left( 2 - \left( \frac{t^\circ \text{C}}{20} \right)^{0.05} \right). \quad (10)$$

На рисунке 2 представлены расчеты действительных расходов по формуле (10) по расходам, измеренным «Шадр-32М» на стендах кафедры, до  $60 \text{ м}^3/\text{ч}$  и температурах 23, 40, 50,  $60^\circ\text{C}$ . Здесь же нанесены тестовые расчеты действительных расходов при номинальной температуре в ТК Курской АЭС  $265^\circ\text{C}$ . Результаты пересче-

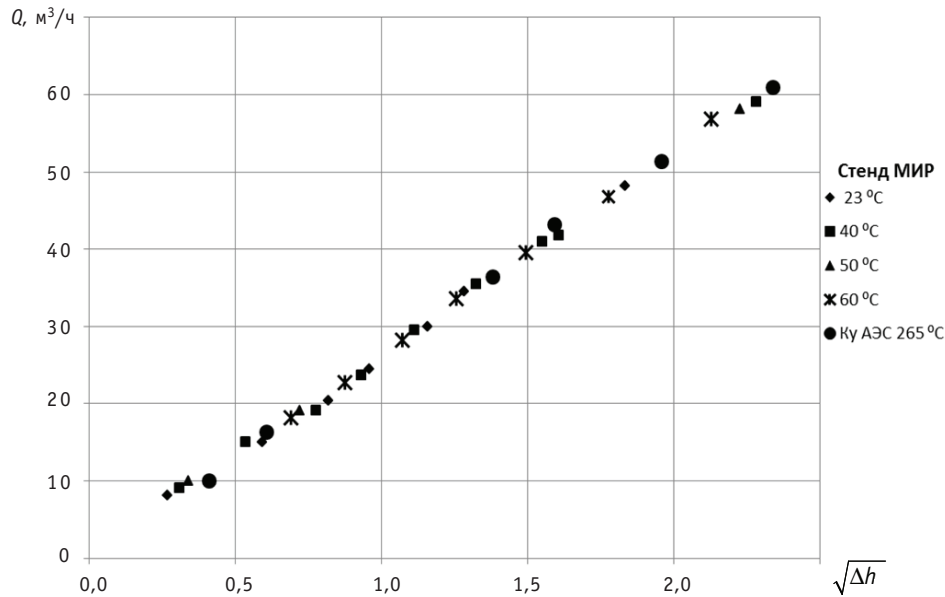


Рис. 2. Значение действительных расходов по формуле (10)

та показывают, что в диапазоне номинальных расходов в ТК РБМК формула (10) действительна в широком диапазоне температур (20–270 °C).

Для получения из условия (7) выражения для действительного расхода необходимо найти зависимости от температуры разностей  $(Q_{\max}^{\text{ш}} - Q_{\min}^{\text{ш}})$ ,  $(Q_{\max}^{\text{д}} - Q_{\min}^{\text{д}})$  и значений  $Q_{\min}^{\text{ш}}$  и  $Q_{\min}^{\text{д}}$ . При обработке экспериментальных данных при температурах воды 20, 40 и 60 °C были получены более точные аппроксимирующие зависимости:

$$Q_{\max}^{\text{ш}} - Q_{\min}^{\text{ш}} = 50,495 + 0,0099t^{\circ\text{C}}; \quad Q_{\max}^{\text{д}} - Q_{\min}^{\text{д}} = 50,49 + 0,009t^{\circ\text{C}};$$

$$Q_{\min}^{\text{ш}} = 10,781 + 0,00231t^{\circ\text{C}}; \quad Q_{\min}^{\text{д}} = 10,78 + 0,0021t^{\circ\text{C}}.$$

После подстановки этих аппроксимаций в условия (7), используя для расчета коэффициента сопротивления трения  $\lambda$  формулу Филоненко  $\lambda = (1,82 \cdot \lg \text{Re} - 1,64)^{-2}$  и формулы (2) и (4), получили

$$Q_t^{\text{д}} = \frac{5,05 \cdot 10^5 Q_t^{\text{ш}} + 98 \cdot Q_t^{\text{ш}} \cdot t^{\circ\text{C}} - 1,32 \cdot 10^{-3} (t^{\circ\text{C}})^2 - 3,801 \cdot t^{\circ\text{C}} + 9,917 \cdot 10^{-3}}{5,05 \cdot 10^5 + 99 \cdot t^{\circ\text{C}}} \times \frac{\sqrt{h_p^{\text{д}}}}{h_p^{\text{ш}}}, \quad (11)$$

где

$$\sqrt{h_p^{\text{д}}} = 115,04 \cdot Q_t^{\text{д}} \left( 1 + \frac{1,44}{1,82 \lg \text{Re}^{\text{ш}} - 1,64} \right), \quad \sqrt{h_p^{\text{ш}}} = 115,04 \cdot Q_t^{\text{ш}} \left( 1 + \frac{1,44}{1,82 \lg \text{Re}^{\text{д}} - 1,64} \right). \quad (12)$$

Система (11)–(12) легко решается итерационным путем.

Расчеты по формуле (11) и их сравнение с измеренными значениями приведены в табл. 1, из которой видно, что

- при температуре  $t = 20^{\circ\text{C}}$  действительные расходы и измеренные «Шадр-32М» практически совпадают;
- погрешность измерения расходов «Шадр-32М» значительная при малых расходах и уменьшается при больших;
- погрешность расчетного определения действительных расходов по формуле (11) уменьшается с увеличением температуры.

Таблица 1

$Q_{\text{ш}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{\text{д}}^{\text{экс}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{\text{д}}^{\text{расчет}}, \text{ м}^3/\text{ч}$	Погрешность вычислений по формуле (11), %	Погрешность «ШАДР-32М»
Температура воды 20°C				
42,86	43,23	41,56	3,86	0,86
49,49	50,13	48,17	4,07	1,28
60,63	61,56	59,28	3,85	1,5
Температура воды 40°C				
15,09	14,63	13,9	3,14	5,16
30,69	30,37	29,3	3,64	1,05
60,30	59,89	58,68	2,06	0,69
Температура воды 60°C				
10,22	8,93	9,08	1,61	14,45
35,47	33,42	33,87	1,33	6,13
59,81	57,36	57,93	0,99	4,27

Для параметров в реакторе РБМК-1000 ( $p = 79.6 \text{ кгс/см}^2$ ,  $t = 275^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 1,261 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ , приняв показания «Шадр-32М»  $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ , действительный расход по формуле (11), получим  $Q_{\text{д}}^{\text{д}} = 27,3 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Полученная погрешность «Шадр-32М» 9,9% соответствует его паспортным характеристикам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обработкой экспериментальных данных выявлено условие равенства безразмерных объемных расходов, не зависящее от способов их измерения и температуры.
2. Обоснованы два выражения для расчетного определения действительных объемных расходов в ТК РБМК по расходам, измеренным первичными преобразователями «Шадр-32М» в широком диапазоне температур 20–270°C.
3. При низких значениях температур (~до 100°C) более высокую точность дает формула (10), при высоких значениях, включая номинальные параметры, рекомендуется использовать формулу (11).

## Литература

1. Иванов Н.И. Исследование метрологических характеристик шариковых расходомеров повышенной надежности. Метрологическое обеспечение средств измерения расхода, уровня давления на стадии разработки, выпуска и эксплуатации/Сб. научн. тр. НИИ «Теплоприбор», М.: 1987
2. Авдеев Е.Ф., Чусов И.А., Устюжанин А.Е. и др. Гидравлический стенд для испытания моделей ядерных реакторов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – №4. – С. 70-83.
3. Авдеев Е.Ф., Чусов И.А., Белозеров В.И. и др. Верификация гидравлических характеристик стенда «Циркуляционная петля» // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – №4. – С. 46-53.
4. Авдеев Е.Ф., Большунова В.В., Виноградов А.В. Определение расхода по максимальной скорости и перепаду давления // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – №2. – С. 51-56.
5. Авдеев Е.Ф., Большунова В.В. Способ определения расхода в трубопроводе/Патент на изобретение № 2169905, Москва, 27.06.2001 г., 6 с.
6. Авдеев Е.Ф., Карташов К.В. Верификация способа определения расхода при турбулентном течении в трубах по измеренной максимальной скорости/Труды IV Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ). – 2006. – Т. 8. – С. 33-34.

Поступила в редакцию 28.10.2011

**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.