

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ГОРЮЧИХ И ВЗРЫВООПАСНЫХ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДО-ЭЛЕКТРОЛИТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

П.Н. Мартынов, М.Е. Чернов, А.Н. Стороженко, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, А.С. Фомин

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Важнейшей задачей обеспечения безопасной эксплуатации производственных объектов, связанных с получением, использованием, хранением и переработкой горючих газов и легковоспламеняющихся жидкостей (нефте- и газопереработка, химическая промышленность, транспорт, ядерная энергетика, оборонный комплекс), является обнаружение утечек горючих газов на ранних стадиях. Система, позволяющая обнаружить малые концентрации горючих газов в воздухе, способна выявить возникновение аварийной ситуации на раннем этапе. Такая диагностика в случае принятия своевременных мер может способствовать предотвращению аварийной ситуации или локализации аварии на ранних стадиях развития.

В настоящее время в ГНЦ РФ-ФЭИ разрабатываются системы на основе капсульных твердоэлектролитных датчиков, удовлетворяющие данным требованиям.

Датчики контролируют содержание кислорода в газе, включающем в себя горючие примеси, и обладают возможностью производить раннее обнаружение малых концентраций таких примесей.

Ключевые слова: керамический чувствительный элемент (КЧЭ), сенсор кислорода, каталитический фильтр, парциальное давление кислорода, ионная проводимость.

Key words: ceramic sensitive element (CSE), oxygen sensor, catalytic filter, partial pressure of oxygen, ionic conductivity.

Атомная энергетика в настоящее время является важнейшим звеном в энергетической стратегии развития страны и ее национальной безопасности [1, 2].

Программы российской корпорации «Росатом» предусматривают модернизацию оборудования АЭС в целях продления срока эксплуатации действующих АЭС, строительство и ввод в действие новых блоков АЭС на территории России, а также строительство и ввод в действие при помощи России ряда зарубежных АЭС. Все эти направления в развитии атомной энергетике должны обеспечивать наряду с надежностью и эффективностью работы АЭС их ядерную и радиационную безопасность.

© П.Н. Мартынов, М.Е. Чернов, А.Н. Стороженко, В.М. Шелеметьев, Р.П. Садовничий, А.С. Фомин, 2011

Проблема обеспечения безопасности и надежности АЭС достигается совершенством, надежностью и достаточностью специальных защитных систем. К таким специальным элементам защитных систем безопасности АЭС относится система водородной взрывобезопасности (СВБ) АЭС, которая является одной из важнейших структур в общей системе средств безопасности АЭС.

Рекомендации о необходимости наличия системы водородной безопасности в системе безопасности АЭС, находящихся в эксплуатации, реконструируемых и вновь строящихся станций, определены в документах МАГАТЭ [3, 4].

Важность обеспечения функции водородной взрывозащиты обусловлена, в первую очередь, тем обстоятельством, что последствия взаимодействия кислорода с водородом, выделяющегося в результате возникновения аварий, могут быть чрезвычайно разрушительными и привести к неконтролируемому протеканию аварийной ситуации по типу Чернобыльской.

Взрывоопасными концентрациями водорода являются концентрации, которые соответствуют определенному соотношению водорода и кислорода в процессе их взаимодействия. При этом на реакцию взаимодействия водорода и кислорода влияет ряд факторов, которые следует учитывать при оценке взрывоопасного состояния среды:

- общее количество и скорость выхода водорода;
- динамика изменения соотношения количества водорода и кислорода;
- наличие пара;
- объем помещения;
- давление в объеме.

На базе опыта ГНЦ РФ-ФЭИ по созданию различных устройств контроля для атомной энергетики [5–7] в настоящее время активно ведется разработка системы для контроля водорода в помещениях АЭС. В данный момент существующие и строящиеся АЭС активно оснащаются подобными системами, в том числе производимыми в ГНЦ РФ-ФЭИ, но они имеют довольно высокий порог обнаружения (примерно 0,5% об.)

Разрабатываемая система способна контролировать водород в атмосфере контейнента АЭС, а также метан и другие водородосодержащие газы в атмосфере производственных и бытовых помещений.

В отличие от аналогичных устройств разрабатываемая система наиболее полно соответствует требованиям эксплуатации на АЭС и сочетает в себе высокую чувствительность (от 0,005 % об.), быстродействие (менее 1 с), способность функционировать в широком диапазоне рабочих температур (до 700°C) и давлений (0–0,7 МПа).

Структурная схема системы показана на рис. 1.

Основными составными частями системы являются

- чувствительный элемент (ЧЭ), представляющий собой сенсор кислорода на основе специально разработанного нанокерамического материала – твердого оксидного электролита;
- каталитический фильтр (рекомбинатор) на основе высокопористого ячеистого материала;
- электронный блок, осуществляющий измерение ЭДС ЧЭ и поддержание температуры нагревателей ЧЭ.

Основной элемент системы раннего обнаружения взрыво- и пожароопасных газов в воздухе – сенсор кислорода (рис. 2), обладающий высокой чувствительностью по отношению к активным к кислороду примесям в воздухе.

Конструкция сенсора кислорода приведена на рис. 3. Керамический чувствительный элемент (КЧЭ) 6 герметично закреплен в корпусе 3 из коррозионно-стой-

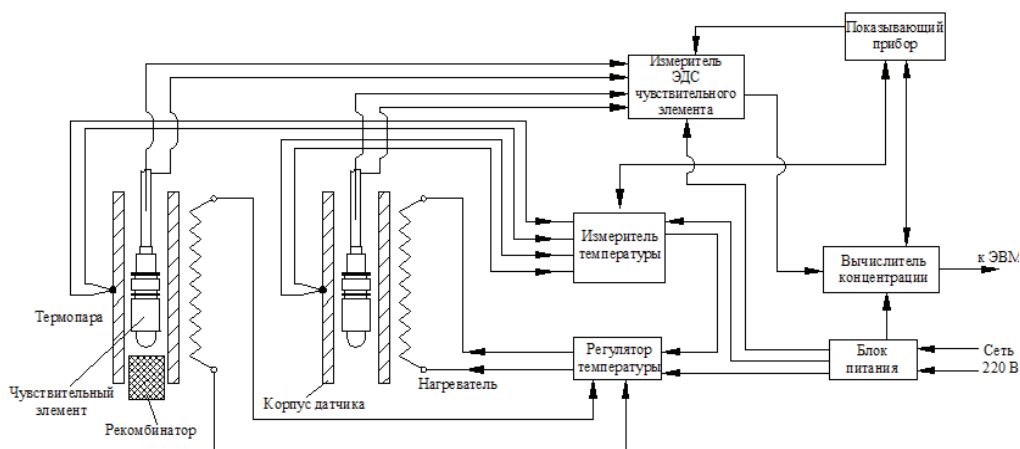


Рис. 1. Структурная схема системы раннего обнаружения и контроля взрыво- и пожароопасных газов



Рис. 2. Сенсор кислорода

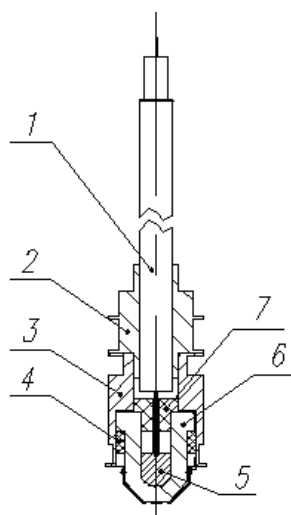


Рис. 3. Схема сенсора кислорода:
1 – коаксиальный кабель; 2 – втулка;
3 – корпус; 4 – ситалл; 5 – электрод сравнения; 6 – керамический чувствительный элемент; 7 – керамическая пробка

кой жаропрочной стали при помощи высокотемпературного герметика – ситалла 4. Внутри сенсора расположен электрод сравнения 5, представляющий собой смесь висмута и его оксида. В верхней части датчика расположен гермоввод, который изолирует внутреннюю полость датчика от внешней газовой среды. Гермоввод состоит из втулки 2 и герметичного коаксиального кабеля 1. Керамическая пробка 7 предназначена для исключения попадания паров металла в электрод сравнения на торец коаксиального кабеля, обращенного к жидкометаллическому электроду.

Принцип определения концентрации кислорода чувствительным элементом системы основан на электрохимическом методе с использованием твердого оксидного электролита, обладающего при определенных условиях ионоселективной проводимостью, в данном случае – по отношению к ионам кислорода. Суть метода

заключается в составлении гальванического элемента – «электрод сравнения-твердый оксидный электролит-рабочий электрод». Разность концентраций кислорода в электроде сравнения с постоянным парциальным давлением кислорода и исследуемой среде стремится выровняться за счет диффузии ионов кислорода через КЧЭ. Величина установившейся разности потенциалов определяется температурой и парциальным давлением кислорода в электроде сравнения и в исследуемой среде. Появление в исследуемой среде составляющей горючего газа приводит к изменению потенциала гальванического элемента благодаря взаимодействию кислорода и горючего газа и сорбционным процессам на рабочем электроде чувствительного элемента.

В качестве материала КЧЭ сенсора используется диоксид циркония, частично стабилизированный оксидами иттрия, характеризующийся достаточно высокой кислородоионной проводимостью, стабильностью свойств во времени, технологичностью. В результате проведенных исследовательских работ разработан оптимальный химический и фазовый состав КЧЭ [3] и изготовлены керамические чувствительные элементы в виде капсул.

Каталитический фильтр (рекомбинатор) системы раннего обнаружения (рис.



Рис. 4. Каталитический фильтр-рекомбинатор

4) представляет собой катализатор на основе высокопористых ячеистых материалов (ВПЯМ) с наноструктурным платиновым покрытием. Катализаторы на основе ВПЯМ обладают малым гидравлическим сопротивлением, а за счет особенностей структуры, аналогичной лабиринту, обеспечивают интенсивный массо- и теплообмен по всему объему катализатора. Благодаря этому увеличивается время контакта газа с рабочей поверхностью и достигается равномерная газодинамическая и тепловая нагрузка. Основной функцией рекомбинатора является каталитическое окисление водорода, метана, пропана и других горючих газов и паров легковоспламеняющихся жидкостей (ацетон, спирт и др.).

Рассмотрим подробнее принцип работы разработанной системы раннего обнаружения взрыво- и пожароопасных газов. Измерительный блок системы сверххранне-

го обнаружения горючих газов (рис. 5) состоит из двух сенсоров кислорода в отдельных термостатированных корпусах – первого 1 и второго 2, каждый из которых снабжен кабельным нагревателем и кабельным термоэлектрическим преобразователем. Оба корпуса герметично соединены с трубой 3, снабженной штуцерами, для подвода и отвода исследуемого газа. В нижней части корпуса второго сенсора расположен каталитический фильтр 4. Исследуемый газ, проходя через трубу, поступает к первому 1 и второму 2 сенсорам. При этом, если на показания первого сенсора оказывает влияние примесь горючего газа, то воздух, поступающий ко второму сенсору, будет очищен от этой примеси благодаря действию каталитического фильтра (дожигателя) 4. В связи с этим разница в показаниях ЭДС первого и второго сенсоров определит степень загрязненности исследуемого воздуха. Электронный блок (на рисунке не показан) производит измерение, сравнение и анализ электрических сигналов обоих сенсоров, определение температуры при помощи кабельных термоэлектрических преобразователей и управление кабельными нагревателями с целью поддержания оптимальной рабочей температуры чувствительных элементов сенсоров.

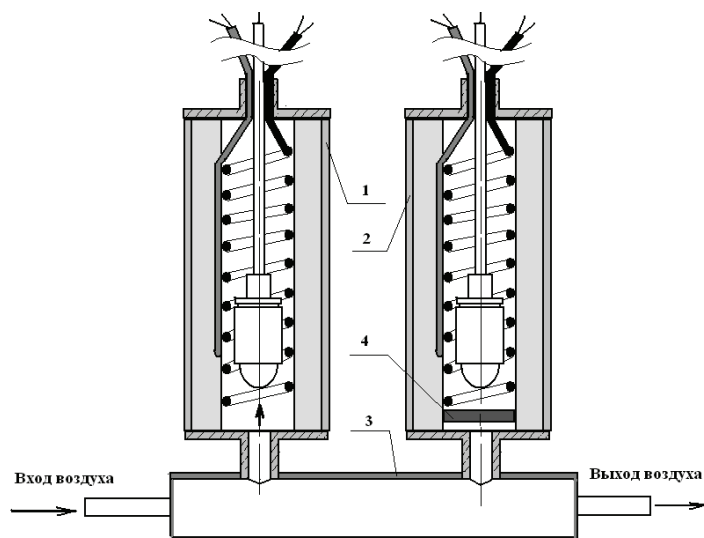


Рис. 5. Схема измерительного блока системы раннего обнаружения горючих газов: 1 – корпус сенсора 1; 2 – корпус сенсора 2; 3 – труба; 4 – каталитический фильтр

Технические характеристики системы раннего обнаружения

Нижний порог обнаружения газовых примесей в воздухе, % об. водорода паров ацетона, спирта метана, пропана	0,005 0,05 0,1
Диапазон контролируемого парциального давления кислорода, % об.	0 – 30
Давление исследуемой среды, кПа	0 – 700
Давление окружающей среды, кПа	84,0 – 106,7
Диапазон допустимых температур среды в месте установки измерительного блока от 0 до 200°C от 200 до 250°C от 250 до 700°C	Неограниченное время 1 час 250 с
Температура окружающей среды в месте установки электронного блока, °C	5 – 40

Питание датчика осуществляется от сети переменного тока с напряжением (220 +22; -33) В, частотой (50±1) Гц.

В данный момент разрабатывается конвекционный вариант системы, в которую анализируемый газ поступает за счет собственной конвекции.

ВЫВОДЫ

Разработанная система обнаружения и контроля водорода и других взрыво- и пожароопасных газов с использованием датчиков на основе керамических твердых электролитов позволяет производить непрерывный мониторинг окружающей атмосферы и на ранней стадии диагностировать случаи возникновения утечек водорода и других взрывоопасных газов. Система позволяет работать в условиях высоких температур (до 700°C) и давлений (до 700 кПа) исследуемой среды.

Характеристики разработанной системы раннего обнаружения позволяют ей сохранять свою работоспособность при

- запроектных авариях на АЭС;
- пожарах в угольных шахтах и различных промышленных помещениях;
- других нештатных и аварийных ситуациях.

Потенциальными потребителями продукта являются атомная промышленность, водородная энергетика, нефте- и газоперерабатывающая, химическая, добывающая, автомобильная промышленность, ядерная энергетика, НИИ, оборонный комплекс и др.

Литература

1. *Мальшев А.Б.* Решение проблем безопасности АЭС с ВВЭР в процессе развития АЭС и прогнозы на начало XXI в./Сб. тезисов докладов и сообщений X Ежегодной конференции Ядерного общества РФ: Научно-техническая конференция «От первой в мире АЭС к атомной энергетике XXI в.». – Обнинск, 1999.
2. *Мальшев А.Б.* Анализ совершенствования решений по обеспечению безопасности АЭС с реакторами водо-водяного типа/Сб. науч. тр. ГНИПКИИ «Атомэнергопроект». – М.: Изд-во АЭП, 2001. – Вып. 2. – С. 3-17.
3. Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants/SAFETY GUIDE. No. NS-G-1.10. – International Atomic Energy Agency, Vienna, 2000.
4. Safety of Nuclear Power Plants: Design/REQUIREMENTS. No. NS-R-1. – International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
5. *Шматко Б.А., Шимкевич А.Л., Блохин В.А.* Диагностика коррозии и контроль технологических процессов методами активометрии в теплоносителе свинец-висмут/Сборник докладов конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерной технологии». Т. 2. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – С. 741.
6. Пат. 2298176 РФ, МПК G01N 27/406. Твердоэлектролитный датчик концентрации кислорода и способы его изготовления/*Мартынов П.Н., Чернов М.Е., Гулевский В.А.* – № 2004122556/28; Заявл. 23.07.04; Оpubл. 27.04.07. Бюл. № 12. – 12 с.
7. *Викулин В.В., Мартынов П.Н., Чернов М.Е. и др.* Исследование зависимости кислородоионной проводимости твердых электролитов из $ZrO_2-Y_2O_3$, работающих в жидкометаллических теплоносителях от фазового состава и структуры керамики/Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. Вып. 4. – Калуга.: Издательский дом «Эйдос», 2003. – 154 с.

Поступила в редакцию 29.08.2011

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.516.2.232

About the Xenon Oscillations Boundary in the Reactor with Nonhomogeneous Axial Load \A.M. Zagrebayev, V.A. Nasonova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.

The results of modeling for estimation the xenon oscillations boundary in the reactor with nonhomogeneous axial load are given.

УДК 621.039.526: 621.039.59

One-group Fission Cross Sections for Plutonium and Minor Actinides in Neutron Spectra of Fast Reactor Cooled with Lead-208 or Lead-Bismuth \G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 3 tables. – References, 8 titles.

One-group fission cross sections of isotopes of plutonium and minor actinides- Np-237, Am-241, 243 and Cm-246 – in neutron spectra of fast reactor RBEC-M cooled with Pb-Bi or Pb-208 are calculated on the basis of 28 group system ABBN. As a result of replacement of Pb-Bi coolant over Pb-208 coolant, the mean energy of neutrons increases on 6.4% and 6.1% in the core and lateral blanket, respectively. Under such neutron spectra hardening, the one-group fission cross section increases on 6% for Pu-240 and on 10% for Am-241.

УДК 621.039.526: 621.362

Space Nuclear Power System Based on SAFE Fast Reactor with Low-temperature Thermionic Converters \V.I. Yarygin, G.E. Lazarenko, M.K. Ovcharenko, A.P. Pyshko, D.G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 4 tables, 4 illustrations. – References, 18 titles.

The possibility of low-temperature thermionic converters (emitter temperature $T_e \leq 1700$ K) appliance for space nuclear power system (SNPS) based on fast SAFE (Safe Affordable Fission Engine) reactor with thermal power of 300 kW for long-term operation as a part of the lunar base have been discussed.

The results of systematic optimization for SNPS parts and equipment and the calculations for mass-dimensional characteristics are presented and also the life cycle of SNPS is specified.

УДК 621.039.534.3

Oxygen and Hydrogen Control Systems Used in Gas Circuits and NPP Containment Vessels \P.N. Martynov, M.E. Chernov, A.N. Storozhenko, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 3 tables, 6 illustrations. – References, 5 titles.

Increased reliability and safety of the operation of one-piece reactors and installations using Pb-Bi and Pb as coolant require the development and improvement of the systems able to diagnose the state of the coolant and detect at early stages the possibility of accident situations. The main controlled parameters are the oxygen activity in the coolant and the concentration of oxygen and hydrogen in the gas phase circuit. The most promising devices enabling control of these parameters are the solid electrolyte sensors made of ceramic oxide, which allow measurement to be taken in the continuous mode under conditions of high temperatures, pressures, velocities of the environment and thermal shocks.

УДК 621.039.534.6

The Combustible and Explosive Gases Control System Based on Solid-electrolyte Ceramic Sensors \P.N. Martynov, M.E. Chernov, A.N. Storozhenko, V.M. Shelemetev, R.P. Sadovnichy, A.S. Fomin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 7 titles.

The most important task of ensuring the safe operation of production facilities related to the production, use, storage and processing of combustible gases and easily flammable liquids (oil and

gas processing, chemical industry, transport, nuclear power engineering, defense industry) is to detect leaks of combustible gases in the early stages. The system allowing one to detect small concentrations of combustible gases in air is capable of detecting an accident situation at an early stage. In the event of timely taken actions, such diagnostics can help prevent the accident situation or confine it in the early stages of its development.

Currently the systems based on capsular solid-electrolyte sensors are under development in the SSC RF-IPPE, which are capable of meeting these requirements.

The sensors monitor the oxygen content in gas including combustible impurities as well and provide the opportunity to make early detection of small concentrations of such impurities.

УДК 621.039.7

SHS-Immobilization of High-Level Waste of An-Tc Fraction into Ceramic-Metal Matrix Materials \ E.E. Konovalov, T.O. Mishevets, S.V. Yudinsev, B.S. Nikonov, Yu.D. Boltoev, S.S. Shulepov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

The study has been performed into metallothermic processes of ceramic-metal (cermets) matrices synthesis for immobilization of Nd, Sm and Re simulating actinides (An) and ^{99}Tc of high-level waste (HLW) produced in the mode of self-propagating high-temperature synthesis. These matrices include mineral-like formations having the structure of garnet and pyrochlore fixing neodymium and samarium and alloys fixing rhenium. They are designed for long-term isolation of HLW from the environment.

УДК 621.039.7

Immobilization of Uranium Wastes into Glass-Crystal Matrix Using the Self-Propagating High Temperature Synthesis \ E.E. Konovalov, T.O. Mishevets, S.V. Yudinsev, B.S. Nikonov, Yu.D. Boltoev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 5 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The study has been performed into the immobilization of uranium waste into glass-crystal matrix material using the self-propagating high-temperature synthesis (SHS). Waste reprocessing involved the use of sorbent based on heat-treated silica gel enriched with uranium from liquid waste. The structure of synthesized matrix materials has been investigated by X-ray fluorescence analysis and scanning electron microscopy.

УДК 631.438: 621.41

The Influence of Physico-Chemical Properties of Soils on the Bioavailability of ^{60}Co \ I.V. Kochetkov, V.S. Anisimov, I.A. Krikunov, M.V. Eremin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 3 tables. – References, 6 titles.

The role of physico-chemical parameters of soils in the accumulation of ^{60}Co by plants (barley) was defined. A method for scoring the buffering capacity of soils as for ^{60}Co contamination was proposed. It is based on dependence between the main physico-chemical soil properties and accumulation of the radionuclide in plants (barley). Soils are ranked according to the buffering capacity with respect to ^{60}Co .

УДК 621.039.586

Studies of Shutdown BN Reactor Cooling-Down Modes \ E.Yu. Anishev, V.S. Gorbunov, S.M. Dmitriev, S.L. Osipov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 6 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles. Emergency cooling modes of shutdown reactor and conditions for coolant natural circulation development are considered.

УДК 621.039.58

Experimental Investigations of Heat Transfer for the Case with Steam Condensing from the Steam-Air Mixture on the Heat-Exchange Surface of the Containment Emergency Pressure Reduction System \ A.M. Bakhmetyev, M.A. Bolshukhin, A.M. Hizbullin, M.A. Kamnev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 1 table. – References, 13 titles.

Presented are experimental investigation results for heat transfer for a case with steam condensing from a steam-air mixture on an S-shaped heat-exchange surface of the containment emergency pressure reduction system. The investigations were conducted in the air mass concentration range of 0.270.7