

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ И СВОЙСТВ ПУЗЫРЬКОВОЙ СРЕДЫ В ЖИДКОСТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СКВОЗНЫХ ДЕФЕКТОВ ОБОЛОЧЕК БЛОЧКОВ С НАТРИЕМ

Н.Н. Титаренко, П.А. Дворников, С.Н. Ковтун, В.П. Полионов

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



Рассмотрена возможность использования метода акустической эмиссии для контроля микродефектов в оборудовании. В частности, впервые экспериментально показано, что в процессе взаимодействия натрия с водой параметры акустической эмиссии определяются величиной области взаимодействия реагирующих компонентов реакции. Высказано предположение, что основным источником акустической эмиссии в реакции взаимодействия натрия с водой является генерация акустических колебаний в результате фазовых превращений гидроксида натрия. Полученные данные позволили разработать высокоэффективную систему контроля сквозных дефектов оболочек блочков с натрием.

Ключевые слова: Акустическая эмиссия, химическая реакция, пузырьковая среда, контроль дефектов.

Key words: acoustic emission, chemical reaction, bubble medium, to control defects.

ВВЕДЕНИЕ

Одно из важнейших направлений обеспечения безопасности жизнедеятельности – это предотвращение глобальных катастроф, вызванных авариями на потенциально опасных объектах атомной, нефтегазовой и химической отраслей. Контроль технологических процессов и ранняя диагностика возникновения аварийных ситуаций позволяют принять своевременные меры и способствуют минимизации или предотвращению опасных последствий таких аварий.

Существует множество методов обнаружения утечек из работающего технологического оборудования, включающих в себя несколько групп, среди которых особое место занимает акустический метод контроля (акустическая эмиссия (АЭ)), реализуемый путем регистрации акустических волн, возбуждаемых при протекании веществ через неплотности и дефекты материала оболочек оборудования [1, 2].

Важнейшим преимуществом акустических методов является их универсальность. Измерения проводятся в режиме реального времени без прямого контакта

и с минимальным вторжением в исследуемый процесс. Различают два метода акустического контроля процессов:

- активный, при котором измеряются параметры прохождения зондирующих среду сигналов (обычно ультразвуковых);
- пассивный, при котором измеряются сигналы акустической эмиссии, генерируемые самим процессом.

Колебания пузырьков в жидкости и их схлопывание приводят к генерации акустических волн, распространяющихся в среде в широком диапазоне частот.

Газо- и парожидкостные системы широко используются в различных областях энергетики, в металлургии, химической, биологической и других областях техники. Газовые пузырьки могут играть важную роль в различных технологических процессах, в частности, в атомных реакторах и мощных тепловых установках. В последние годы расширяется круг исследований процессов, происходящих с газовыми пузырьками в акустических полях.

Движение пузырьков и капель в подвижной жидкости или газе является основным элементом моделирования двухфазных потоков и определения скорости дрейфа. Теоретическому и экспериментальному изучению этих вопросов, а также процессам распространения и эволюции волн в газожидкостных средах посвящено значительное число работ. Среди них ограничимся лишь указанием известных монографических изданий [3–8], включающих в себя обширный библиографический обзор.

Известно, что резонансная частота для случая объемных (монопольных) колебаний, малых по сравнению с радиусом пузырька, определяется формулой Минаерта [8]

$$f_0 = \frac{1}{\pi D} \sqrt{\frac{3\gamma p_0}{\rho_f} \left(1 + \frac{4\sigma_f}{\rho_0 D} \right) - \frac{4\sigma_f}{\rho_f D}}.$$

где p_0 – гидростатическое давление в жидкости, н/м²; $\gamma = c_p/c_v$ – отношение удельных теплоемкостей газа; σ_f – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, н/м; ρ_f – плотность жидкости, кг/м³; D – эквивалентный диаметр пузырька, м.

Активные акустические методы контроля состояния двухфазных потоков основаны на том факте, что пузырьки газа в жидкости изменяют акустические свойства всей среды. К основным этим свойствам относятся

- изменение затухания акустических волн в смешанном потоке жидкости и пузырьков газа;
- изменение скорости прохождения акустических волн в объеме парожидкостной среды;
- возникновение резонансного отклика при внесении коротких импульсных возмущений по давлению в поток за счет осцилляций объемов пузырьков газа на собственных частотах.

В частности, из анализа теоретических моделей следует, что декремент затухания акустической волны пропорционален объемной концентрации газа и убывает с ростом размеров пузырьков. Скорость акустической волны существенно зависит от концентрации газа в жидкости.

Задача создания «активной» системы индикации утечек, основанной на перечисленных выше эффектах, сводится к разработке методов и технических средств реализации измерений декремента затухания или скорости распространения акустических волн в объеме жидкости и обнаружения изменений этих характеристик.

В последние два десятилетия обсуждается возможность использования в различных прикладных приложениях явления генерации акустических колебаний, возникающих в ходе химических реакций и физико-химических процессов в гомогенных жидких средах [9–21].

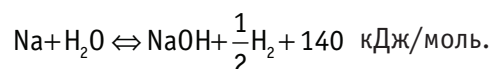
Многие химические реакции, в особенности связанные с фазовым переходом, являются акустически активными. Индивидуальный спектр акустических сигналов определяется природой участвующих в реакции продуктов. Прикладная значимость этого явления весьма существенна – возникает возможность мониторинга промышленных процессов и химических систем, который трудно осуществить иным способом.

В работе [19] экспериментально исследована акустическая эмиссия при фазовых переходах в водной среде, в частности, при плавлении льда. Показано, что частота, длительность и другие параметры индуцируемых акустических импульсов зависят от природы вещества и внешних условий. Зафиксировано явление акустической эмиссии в талой воде (гомогенной жидкости). Это позволяет использовать акустическую эмиссию как метод контроля ряда технологических процессов с участием метастабильных состояний вещества, для которых он может оказаться единственно пригодным.

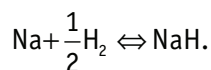
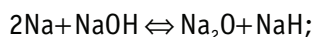
В работе [21] изучено применение метода акустической эмиссии для контроля процесса сольватации, в частности, рассмотрена динамика изменения параметров сигналов акустической эмиссии в процессе растворения кристаллов хлорида натрия. Приводится сравнение полученных акустико-эмиссионных данных и известных рентгеновских фазоконтрастных исследований. Показано, что различные стадии растворения надежно регистрируются предлагаемым методом в частотном диапазоне до 400 кГц, а параметры метода достаточно информативно отражают кинетику процесса растворения.

Целью данной работы является экспериментальное обоснование возможности использования генерации акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах и акустических свойств пузырьковой среды в жидкости для выявления сквозных дефектов оболочек контролируемых объектов.

Рассматривается реакция взаимодействия натрия с водой. Химическое взаимодействие натрия ($T_{пл} = 371,0 \text{ К}$, $T_{кип} = 1157,7 \text{ К}$) и воды протекает в два этапа [22, 23]. На первом этапе реакция протекает с большой скоростью с образованием гидроксида натрия, выделением газообразного водорода и тепла:



На втором этапе происходит химическое взаимодействие продуктов первого этапа реакции с избыточным натрием:



УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК БЛОЧКОВ С НАТРИЕМ

Была разработана и изготовлена установка для регистрации сигналов датчиков АЭ в жидкой среде. Экспериментальная установка (см. рис. 1) состоит из реакционной камеры, жидкости (воды) и канала регистрации появления пузырьков в воде. Реакционная камера состоит из корпуса 1 (часть дна корпуса образована поверхностью исследуемого блока 2 со сварным швом 3). Блок с натрием 2 закреплен в дне корпуса 1 с помощью фигурной прокладки 4, выполненной из мягкой резины. Реакционная камера залита водой 5 при повышенной температуре до уровня, выше расположения сварного шва 4. Для нагрева и поддержания заданной температуры воды реакционная камера оснащена нагревателем 6 и дат-

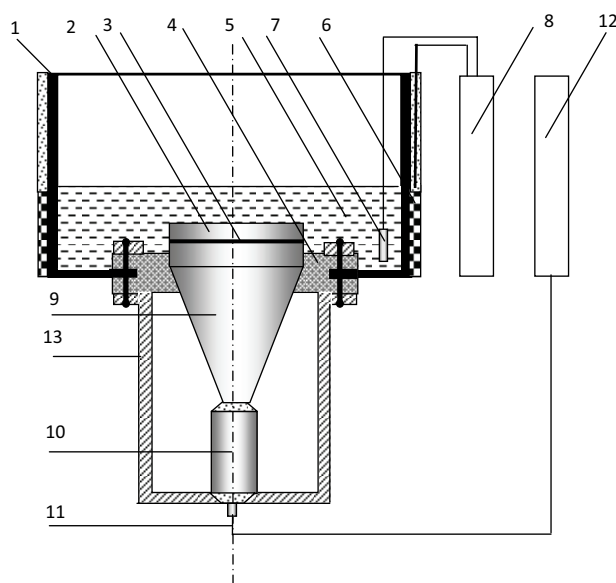


Рис. 1. Установка для контроля герметичности оболочек блоков с натрием

чиком температуры воды 7, которые подключены к измерителю-регулятору температуры 8.

Канал регистрации появления пузырьков в воде состоит из концентратора акустической энергии 9, выполненного в виде усеченного конуса, основание которого имеет акустический контакт с нижней плоскостью исследуемого блока, верхняя часть конуса сопряжена с чувствительной частью акустического датчика 10, который через линию связи 11 подключен ко входу измерительного комплекса 12. Концентратор и акустический датчик удерживаются в нужном положении фигурной прокладкой и скобой.

Работа установки осуществляется следующим образом. Непосредственно перед проверкой на герметичность партии блоков проводят их подготовку к измерениям. Для этого их нагревают вне установки до температуры выше температуры плавления натрия ($97,8^{\circ}\text{C}$), при этом натрий в блоках переходит в жидкое состояние, вязкость его резко падает, а давление на оболочку возрастает. Это обстоятельство создает благоприятные условия заполнения жидким натрием дефектов сварки, если таковые имеются в оболочке блока.

На следующем этапе разогретый блок переносят в реакционную камеру и устанавливают на основание конуса акустического концентратора таким образом, чтобы контролируемый сварной шов был полностью покрыт водой. После этого запускается измерительный комплекс.

При наличии в оболочке блока микродефекта вода и натрий вступают в реакцию с выделением водорода, наблюдаемого в виде пузырьков в воде. В процессе химической реакции происходит интенсивная генерация акустических колебаний в широком диапазоне частот. Образование пузырьков, отрыв их от блока, движение в воде и схлопывание на линии раздела вода-воздух также являются источниками акустического шума, который передается оболочке блока.

Находящийся в акустическом контакте с оболочкой блока концентратор интегрирует сигналы со всей нижней поверхности блока и передает на чувствительную часть акустического датчика, который преобразовывает их в электрические сигналы и по кабельной линии связи передает в измерительный комплекс. Таким

образом, акустический датчик одновременно воспринимает все акустические колебания, приходящие на его поверхность. Это позволило повысить чувствительность всей установки. Частотный диапазон экспериментальной установки составляет от 100 до 600 кГц.

Разработанный акустико-эмиссионный комплекс представляет собой многоканальную систему регистрации АЭ, обрабатывает сигналы акустического датчика (линейный выход), формирует их, определяет их среднеквадратическую величину (логарифмический выход) за время измерений, сравнивает зарегистрированный сигнал с фоновым сигналом, полученным в измерениях с герметичным блоком, и по результатам сравнения выдает заключение. Сравнение проводится с использованием методов статистического анализа, позволяющего обнаружить негерметичность блока с наперед заданной достоверностью.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунках 2–5 приведены некоторые результаты работы, полученные на установке для контроля герметичности блоков с натрием. Из рисунков видно, что

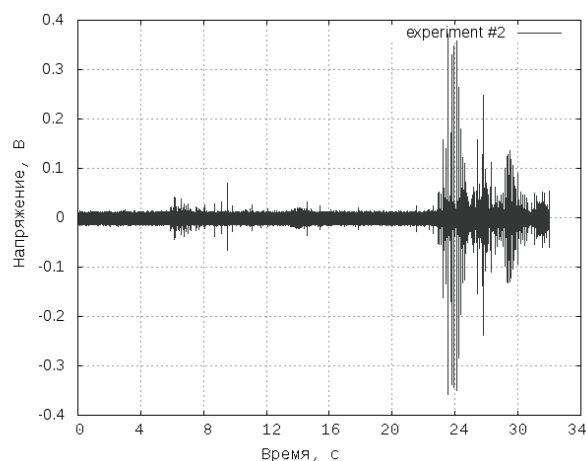


Рис. 2. Амплитуда сигнала АЭ (линейный выход) при схлопывании пузырька водорода диаметром ~3 мм на поверхности воды

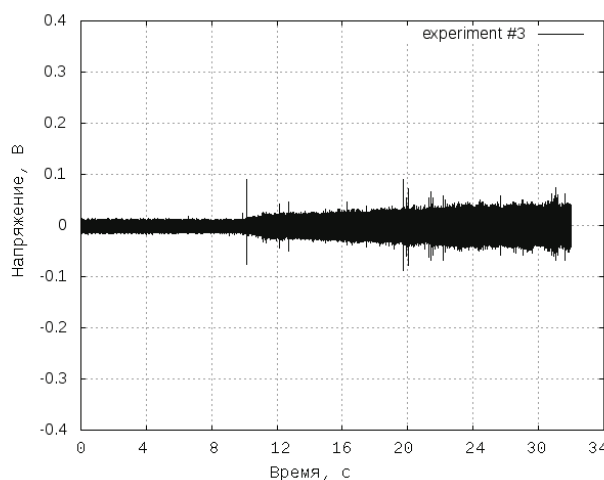


Рис. 3. Амплитуда сигнала АЭ (линейный выход) при схлопывании пузырька водорода диаметром ~1 мм на поверхности воды

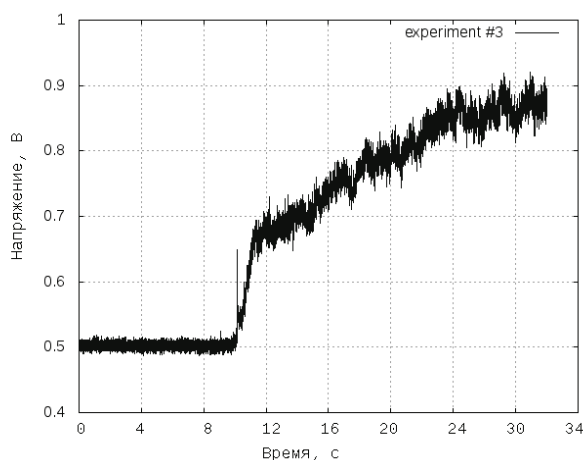


Рис. 4. Амплитуда сигнала АЭ (логарифмический выход) при схлопывании пузырька водорода диаметром ~1 мм на поверхности воды

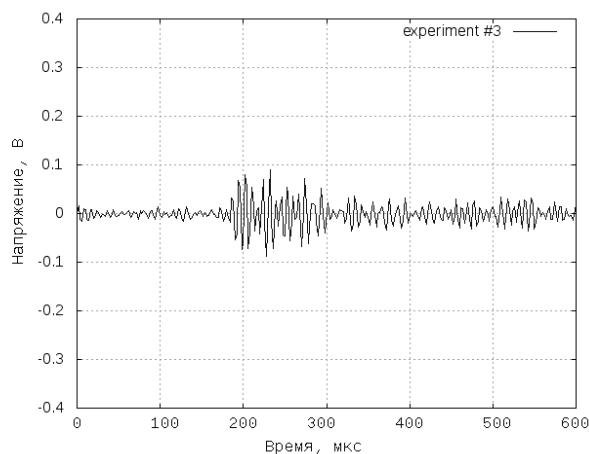


Рис. 5. Фрагмент реализации показаний линейного выхода акустического канала при схлопывании пузырька водорода диаметром ~1 мм на поверхности воды

благодаря особенностям конструкции установки, а именно, отсутствия в ней посторонних источников акустического шума, и выбранного теплового режима ее работы фоновая составляющая сигнала акустического канала мала. Кроме того, заметное различие частотных характеристик фонового и полезного сигналов позволяет надежно выделить последний, что понижает порог чувствительности обнаружения негерметичности блоков с натрием.

Длительность акустического сигнала в момент генерации пузырька примерно в 3,5 раза меньше длительности акустического сигнала в момент его схлопывания. Анализ спектра сигналов показывает, что он простирается преимущественно в диапазоне частот от 100 до 600 кГц.

Эксперименты, проведенные на макете установки, позволили получить оценку времени измерения, необходимого для надежного контроля герметичности оболочки блока, оно оказалась не более 5 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании пассивного акустического метода разработана установка для контроля микронеплотностей оболочек блоков с металлическим натрием. Уста-

новка позволила наблюдать динамику изменения параметров АЭ, сопровождающую реакцию взаимодействия натрия с водой.

В результате экспериментальных исследований показано, что при взаимодействии натрия с водой основным источником акустических сигналов является генерация акустических колебаний при фазовых превращениях гидроксида натрия. Образование пузырьков водорода, отрыв их от микронеплотности и схлопывание на линии раздела вода-воздух также являются дополнительными источниками акустических сигналов.

Замечено, что процесс взаимодействия натрия и воды при истечении одного реагента в другой в свободном объеме сопровождается пульсацией давления в зоне реакции. Это, в свою очередь, также может приводить к генерации акустических колебаний в жидкости.

Общая акустическая активность наблюдаемого процесса является информативным параметром и для задач дефектоскопии его вполне достаточно. Однако для целей выяснения механизма и кинетики физико-химических процессов следует проводить серию специальных исследований, которые позволили бы не только выделить сигналы нужной реакции, но и определить основные характеристики самих сигналов.

Статья подготовлена при выполнении Государственного контракта от 05.08.2011 №16.526.11.6006 в рамках федеральной целевой программы.

Литература

1. Иванов В.И., Белов В.М. Акустикоэмиссионный контроль сварки и сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
2. Дробот Ю.Б., Грешиников В.А., Бачегов В.Н. Акустическое контактное течеискание. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
3. Fowler T. J. Chemical industry applications of acoustic emission, *Materials Evaluation*, 1992, 875-882
4. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. – М.: Энергоатомиздат. 1990. 248 с.
5. Нугматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 2. – М.: Наука. 1987. – 359 с.
6. Leighton T.J. The acoustic Bubble. – London: Academic Press Limited, 1994. – 613 p
7. Leighton T.G., Ramble D.G. and Phelps A.D. The detection of tethered and rising bubbles using multiple acoustic techniques//*J. Acoust. Soc. Am.* 1997. – 101 (5). – P. 2626-2635
8. Ainslie M.A., Leighton T.G. Near resonant bubble acoustic cross-section corrections, including examples from oceanography, volcanology, and biomedical ultrasound//*J. Acoust. Soc. Am.* – 2009. – 126 (5). – P. 2163-2175.
9. Boyd J.W.R., Varley J. The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes//*Chemical Engineering Science*. – 2001. – 56. – P. 1749-1767.
10. Betteridge D., Joshlin M.T. & Lilley T. Acoustic emissions from chemical reactions//*Analytical Chemistry*. – 1981. – 53. – P. 1064-1073.
11. Sawada T., Gohshi Y., Chikako A. & Furuya K. Acoustic emission from phase transition of some chemicals. *Analytical Chemistry*, 57, (1985). 1743-7145.
12. Belchamber R.M., Betteridge D., Collins M.P., Lilley T., Marczewski C.Z. & Wade A.P. Quantitative study of acoustic emission from a model chemical process//*Analytical Chemistry*. – 1986. – 58. – P. 1873-1877.
13. Wentzell P.D. & Wade A.P. Chemical acoustic emission analysis in the frequency domain//*Analytical Chemistry*. – 1989. – 61. – P. 2638-2642
14. Crowther T.G., Wade A.P., Wentzell P.D. & Gopal R. Characterization of acoustic emission from an electrolysis cell//*Analytica Chimica Acta*. – 1991. – 254. – P. 223-234.

15. Cao Z., Wang B.-F., Wang K.-M., Lin H.-G. & Yu R.-Q. Chemical acoustic emissions from gas evolution processes recorded by a piezoelectric transducer//Sensors and Actuators B. – 1998. – 50. – P. 27-37.
16. Manasseh R., LaFontaine R.F., Davy J., Shepherd I., Zhu Y.-G. Passive acoustic bubble sizing in sparged systems//Experiments in Fluids. – 2001. – 30. – P. 672-682.
17. Смирнов А.Н. Генерация акустических колебаний в химических реакциях и физико-химических процессах//Российский химический журнал. – 2001. – Т. 45. – С. 29-34
18. Al-Masry W.A., Ali E.M., Aqeel Y.M. Determination of bubble characteristics in bubble columns using statistical analysis of acoustic sound measurements//Chemical Engineering Research and Design. – 2005. – 83. – P. 1196-1207.
19. Кузнецов Д.М., Смирнов А.Н. Сыроешкина А.В. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях в водной среде//Российский химический журнал. – 2008. – Т. LII. – № 1. – С. 114-121.
20. Manasseh R., Ooi A. Frequencies of acoustically interacting bubbles. Bubble Science, Engineering and Technology 1, (2009)58–74.
21. Кузнецов Д.М., Буйло С.И., Козаченко П.Н., Дубовсков В.В. Акустико-эмиссионные исследования растворения кристаллов хлорида натрия//Фундаментальные исследования. – 2012. – № 9. – С. 388-392.
22. Боришанский В.М., Кутателадзе С.С., Новиков И.И., Федьинский О.С. Жидкометаллические теплоносители. 3-е изд. – М.: Атомиздат, 1976. – 328 с.
23. Поплавский В.М., Козлов Ф.А. Безопасность парогенераторов натрий-вода. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 144 с.

Поступила в редакцию 17.12.2012

fresnoite and perovskite, chemical durability of produced glasses was very high level, since equilibrium leach rate of Eu was $3 \cdot 10^{-6}$ g/m²·day and of U was $4 \cdot 10^{-6}$ g/m²·day.

УДК 546.212:541.12.012.3+534-14

Use of Generation of Acoustic Vibrations in Chemical Reaction and Properties of the Bubble Medium in Liquid to Reveal through Defects in Claddings of Slugs with Sodium \ Titarenko N.N., Dvornikov P.A., Kovtun S.N., Polionov V.P.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 5 illustrations. – References, 23 titles.

An opportunity to use the acoustic emission method to control micro-defects in the equipment is considered. In particular, for the first time it is shown experimentally that while sodium is interacting with water, the acoustic emission parameters are determined by the size of the interacting area for reacting components of the reaction. It is assumed that the major source of acoustic emission in the reaction of sodium interacting with water is generation of acoustic vibrations caused by phase transitions of sodium hydroxide. The obtained data make it possible to design a high-efficient system to control through defects in claddings of slugs with sodium.

УДК 621.039.534

The Investigation of the Acoustic Level Limit Switch of Coolant in the Integrated Stand of the KV-2 \ V.I. Melnikov, V.V. Ivanov, Yu.A. Kiselev, A.A. Kiselev, K.M. Miriasov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 5 pages, 3 illustrations. – References, 4 titles.

The results of the level switch based on 24 point acoustic probes which monitored process into the testing integrated unit KV-2 three-year operation was generalized. It has been estimated that the developed level switch worked satisfactorily. They make possible monitoring the thermohydraulic processes associated with vapor phase formation died to the increase of liquid level and steam condensation into reactor.

УДК 004.42.001.5

Coolant Forecasting of Nuclear Reactors \ Malovik K.N., Nikishin V.V.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 6 pages, 7 illustrations. – References, 15 titles.

The article considers analytic forecasting of coolant and its limit condition. Shown experimental data of physical modeling of volumetric steam content via improvement of machine vision system. Proposed using theory of dynamic trends for coolant forecasting of nuclear reactor.

УДК 621.039.517

Technique and Software to Calculate Temperature Field in the System of Layered Cylindrical Fuel Elements \ Starkov V.A., Marikhin N.Yu.; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 9 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 5 titles.

A technique has been proposed and thermal conductivity problem has been solved analytically for the system of layered cylindrical fuel elements. Based on the results, an algorithm and FORTRAN software for the thermo-hydraulic calculation of a channel (THCC) have been developed to calculate the temperature field and thermal flux density in a fuel assembly with layered cylindrical fuel elements. The software also provides the calculation of the surface boiling onset temperatures on the fuel elements, critical fluxes and corresponding thermotechnical margins. Two coolant circulation schemes are provided for a fuel assembly: straight flow and Field tube. The results of the THCC calculations were compared with the analogous ones. A correlation between the calculation results is shown as well as the advantages of the THCC software performance.

УДК 519.6:621.039.5

The Overimplicit Scheme of Incomplete Factorization Method for Solving the Three-dimensional Difference Equations of Elliptic Type \ N.M. Troyanova, V.P. Ginkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Hier Scools. Nuclear Power Engineering) – Obnibsk, 2013. 8 pages, 1 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

The over-implicit scheme of the incomplete factorization method (IFM) is proposed for solving the systems of linear algebraic equations that approximate the equations for neutron transport in the multigroup diffusion approximation, and the variant of combined IFM schemes is proposed, in which the peripheral