

ISSN 2305-414X

2016, 4

**GLOBAL
NUCLEAR
SAFETY**



**ГЛОБАЛЬНАЯ
ЯДЕРНАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

<http://gns.mephi.ru>

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2016, 4(21)

Founded in November, 2011

The subscription index is 10647 in the catalogue «Press of Russia»

Quarterly

ISSN 2305-414X, reg. № FS77-47155, November, 3 2011

Web-site: <http://gns.mephi.ru>

Editor-in-Chief:

M.N. Strikhanov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)

Editorial Staff:

M.N. Strikhanov (Editor-in-Chief, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)),
V.A. Rudenko (Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Sociology, Professor (*Russia*)),
Denis Flory (Deputy CEO of IAEA (*Austria*)),
Liu Daming (Professor of the Chinese Nuclear Power Institute (CIAE (*China*)),
Nancy Fragoyannis (Senior Counsellor of the USA Nuclear Regulation Commission (*USA*)),
Buhach Andrzej (Doctor of Technical sciences, Professor (*Poland*)),
M.K. Skakov (Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Kazakhstan*)),
A.D. Malyarenko (Doctor of Technical sciences, Professor (*Belarus*)),
S.E. Gook (PhD (Technical Science) (*Germany*)),
P.D. Kravchenko (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),
A.P. Elokhin (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),
Y.I. Pimshin (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),
Y.P. Mukha (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),
V.V. Krivin (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),
V.I. Ratushny (Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)),
Y.S. Sysoev (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),
A.V. Palamarchuk (PhD (Technical sciences), *Russia*),
V.E. Shukshunov (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),
V.P. Povarov (PhD (Physics and Mathematics), *Russia*),
S.M. Burdakov (PhD (Technical sciences), associate professor (*Russia*)),
I.A. Bublikova (PhD (Technical sciences), associate professor (*Russia*)),
A.V. Zhuk (PhD (History), associate professor (*Russia*))

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address: Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia
Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia
telephone: (8639)222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru
Press address: Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia.

Moscow

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2016, 4(21)

Журнал основан в ноябре 2011 г.
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 10647
Выходит 4 раза в год, ISSN 2305-414X
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г.
Журнал включен в перечень ВАК РФ

Web-site: <http://gns.mephi.ru>

Главный редактор:

М.Н. Стриханов, доктор физико-математических наук, профессор (*Россия*)

Редакционная коллегия:

М.Н. Стриханов (главный редактор, д-р физ.-мат. наук, проф. (*Россия*)),
В.А. Руденко (заместитель главного редактора, д-р соц. наук, проф. (*Россия*)),
Денис Флори (заместитель генерального директора МАГАТЭ (*Австрия*)),
Лю Дамин (проф. Китайского института ядерной энергетики (*Китай*)),
Нэнси Фрагояннис (старший советник Комиссии по ядерному регулированию США (*США*)),
Бухач Анджей (д-р техн. наук, проф. (*Польша*)),
М.К. Скаков (д-р физ.-мат. наук, проф. (*Казахстан*)),
А.Д. Маляренко (д-р техн. наук, проф. (*Беларусь*)),
С.Э. Гоок (к-т техн. наук (*Германия*)),
П.Д. Кравченко (д-р техн. наук, проф. (*Россия*)),
А.П. Елохин (д-р техн. наук, проф. (*Россия*)),
А.В. Чернов (д-р техн. наук, проф. (*Россия*)),
Ю.И. Пимишин (д-р техн. наук, проф. (*Россия*)),
Ю.П. Муха (д-р техн. наук, проф. (*Россия*)),
В.В. Кривин (д-р техн. наук, проф. (*Россия*)),
В.И. Ратушный (д-р физ.-мат. наук, проф. (*Россия*)),
Ю.С. Сысоев (д-р техн. наук, проф. (*Россия*)),
А.В. Паламарчук (к-т техн. наук (*Россия*)),
В.Е. Шукинунов (д-р техн. наук, проф. (*Россия*)),
В.П. Поваров (к-т физ.-мат. наук (*Россия*)),
С.М. Бурдаков (к-т техн. наук, доц. (*Россия*)),
И.А. Бубликова (к-т техн. наук, доц. (*Россия*)),
А.В. Жук (к-т ист. наук, доц. (*Россия*))

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Адрес редакции: 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31;
347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94,
тел. (8639) 222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru
Адрес типографии: 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94.

Москва

CONTENTS

2016, 4(21)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

Tritium Monitoring as Possible Indicator of Leaks from Special Pipelines and Other Water Bearing Communications at the "Bushehr-1" NPP <i>V.Yu. Ulyanov, A.P. Elokhin</i>	7
Criterion Choice for Evaluation of Transport and Packing Set Firmness with Nuclear and Radiation Dangerous Object <i>O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze, S.M. Burdakov</i>	16

RESEARCH, DESIGN, CONSTRUCTION AND INSTALLATION OF NUCLEAR FACILITIES MANUFACTURING EQUIPMENT

Operational Reliability Increase of Welded Connections of Steam Generators for PWR Reactor Installations <i>N.N. Podrezov, S.A. Tomilin, V.V. Shishov</i>	22
The Analysis of Magnetic Field of Quadripolar Magnetic System for Arc Welding <i>A.M. Rybachuk, N.V. Krysko</i>	27
System Adaptation of the Accepting and Radiating Objects Synchronized on the Phase in the Conditions of Selection Phase Distortion Using of Artificial Neural Networks <i>Nguyen Dang Thao</i>	32
Metallurgical, Physical and Chemical Features of Influence of Gumboil and Forming Linings on the Root Seam Structure at Unilateral Arc Welding <i>Yu.V. Doronin, A.Yu. Doronin</i>	43

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

The Electrophysical Diagnosis Methods and Reactor Equipment Control <i>V.I. Surin, Z.S. Volkova, R.A. Denisov, V.D. Motovilin, N.V. Rhine</i>	50
Quality Assessment of Regulation and Optimization of the Power Automatic Regulator Settings of PWR-1000 Reactor <i>H.F. Almasri</i>	61
Diagnosis of Valves Using Entropy Indicators <i>E.A. Abidova, L.S. Hegay, A.V. Chernov, O.E. Draka, O.J. Pugachyova</i>	69

SAFETY CULTURE, SOCIO AND LEGAL ASPECTS OF TERRITORIAL DEVELOPMENT OF NUCLEAR FACILITIES LOCATION

Minimizing of the Human Factor Impact on the Reliability and Safety of the NPP and other Dangerous Objects by Improving the Effectiveness of Training Sessions <i>M.V. Alyushin, L.V. Kolobashkina, A.M. Alyushin</i>	78
Role of Economic Training in Professional Competences Formation of Technical Higher Education Institutions Graduates for Nuclear Industry <i>G.B. Belyaeva, A.G. Sirotkina, A.B. Makarets, G.A. Fedorenko</i>	89

Author Index of vol. 4, 2016.....	97
-----------------------------------	----

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2016

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Мониторинг трития как возможного индикатора утечек из спеттрубопроводов и других водонесущих коммуникаций на площадке АЭС «Бушер-1»
В.Ю. Ульянов, А.П. Елохин 7
- Выбор критерия оценки стойкости транспортно-упаковочного комплекта с ядерно- и радиационно опасным объектом
О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе, С.М. Бурдаков 16

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Повышение эксплуатационной надежности сварных соединений парогенераторов для реакторных установок на основе ВВЭР
Н.Н. Подрезов, С.А. Томилин, В.В. Шишов 22
- Анализ магнитного поля четырёхполюсной магнитной системы для дуговой сварки
А.М. Рыбачук, Н.В. Крысько 27
- Адаптация системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов в условиях искажения фазы выборки с использованием искусственных нейронных сетей
Нгуен Данг Тао 32
- Металлургические и физико-химические особенности влияния флюса и формирующих подкладок на структуру корневого шва при односторонней дуговой сварке
Ю.В. Доронин, А.Ю. Доронин 43

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Методы электрофизической диагностики и контроля реакторного оборудования
В.И. Сурин, З.С. Волкова, Р.А. Денисов, В.Д. Мотовилин, Н.В. Рейн 50
- Оценка качества регулирования и оптимизация настроек автоматического регулятора мощности реактора ВВЭР 1000
Х.Ф. Альмасри 61

Диагностирование электроприводной арматуры с использованием энтропийных показателей

Е.А.Абидова, Л.С. Хегай, А.В. Чернов, О.Е. Драка, О.Ю. Пугачёва.....69

КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Минимизация влияния человеческого фактора на надежность и безаварийность работы АЭС и других опасных объектов за счет повышения эффективности учебно-тренировочных занятий

М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина, А.М. Алюшин.....78

Роль экономической подготовки в формировании профессиональных компетенций выпускников инженерно-технических вузов для атомной отрасли

Г.Б. Беляева, А.Г. Сироткина, А.Б. Макарец, Г.А. Федоренко.....89

Авторский указатель номера 4, 2016.....97

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 504.064.36

МОНИТОРИНГ ТРИТИЯ КАК ВОЗМОЖНОГО ИНДИКАТОРА УТЕЧЕК ИЗ СПЕКТРУБОПРОВОДОВ И ДРУГИХ ВОДОНЕСУЩИХ КОММУНИКАЦИЙ НА ПЛОЩАДКЕ АЭС «БУШЕР-1»

© 2016 В.Ю. Ульянов*, А.П. Елохин**

* Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры (ПГАСиА),
Днепропетровск, Украина

** Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе дано обоснование необходимости организации на площадке действующей АЭС «Бушер-1», расположенной в Исламской Республике Иран, принципиально новой системы - мониторинга трития с целью повышения безопасности при эксплуатации объектов и оборудования АЭС. Данная система должна стать составной частью системы мониторинга площадки АЭС, расположенной в сейсмически активном регионе. Основная задача системы мониторинга трития должна состоять в обеспечении постоянного контроля целостности сбросных спектрубопроводов на площадке АЭС в режиме реального времени. Положение об организации службы мониторинга трития на АЭС должно быть разработано и закреплено в нормативных документах.

Ключевые слова: Исламская Республика Иран, АЭС «Бушер-1», мониторинг трития, интеллектуальный радиометр, ультра-низкофоновый жидко-сцинтилляционный спектрометр.

Поступила в редакцию 25.11.2016

ВВЕДЕНИЕ

Методы радиационного контроля, широко используемые на АЭС и других объектах использования атомной энергии (ОИАЭ), охватывают контроль радиоактивных выбросов (в атмосферу) и сбросов (пруды-охладители) [1]. После трагических событий на Чернобыльской АЭС (1986 г.) вопросу радиационного контроля в СССР, России уделялось большое внимание, что позволило существенно ужесточить нормы радиационного контроля в России и существенно снизить активность выбросов и сбросов. Одной из проблем радиационного контроля при сбросах является радиационный контроль радиоактивного изотопа водорода трития¹,

¹ Тритий (от греческого tritos - третий) Т, или ${}^3_1\text{H}$, радиоактивный (β -активен) тяжелый изотоп водорода с массовым числом 3. Ядро атома трития - тритон с массой 3,016050 состоит из одного протона и двух нейтронов, энергия связи 8,1-8,4 МэВ. При β -распаде трития образуются легкий изотоп гелия ${}^3_2\text{He}^{1+}$, β -частица e^- и нейтрино $\bar{\nu}_e$: ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}^{1+} + e^- + \bar{\nu}_e$, $T_{1/2} = 12,33$ года; максимальная энергия излучения 18,61 кэВ, средняя - 5,54 кэВ. Тритий образуется в верхних слоях атмосферы в результате взаимодействия космического излучения главным образом с ядрами N, например: ${}^{14}_7\text{N} + n \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \text{T}$. Таким образом, атомы трития в результате образующиеся реакций радиационного окисления и изотопного обмена переходят в молекулы воды, затем тритий в составе дождевой воды выпадает на поверхность Земли. Используется в биологии и химии как радиоактивная метка, в экспериментах по исследованию свойств нейтрино, в термоядерном оружии как источник нейтронов и одновременно термоядерное горючее, в геологии для датирования природных вод. Промышленный тритий получают облучением лития-6 нейтронами в ядерных реакторах по следующей реакции: ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0n \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$.

представляющего собой сверхтяжёлый водород (^3_1H). Большая часть трития, наработанного на АЭС (в среднем, до 85 %), покидает АЭС с жидкими стоками. Поскольку жидкие стоки на большинстве АЭС сбрасываются в пруд-охладитель, куда и поступает тритий, попавший с различными протечками в стоки, а именно – в техническую воду, используемую для охлаждения турбин и прочего оборудования, дебалансные воды и т.д.

Образовавшиеся при распаде трития β -частицы, распространяются в воздухе всего на 6,0 мм и не могут преодолеть даже верхний слой кожи человека [2]. В силу малой энергии распада трития, испускаемые электроны хорошо задерживаются даже простейшими преградами типа одежды или резиновых хирургических перчаток. Тем не менее, этот изотоп представляет радиационную опасность при вдыхании, поглощении с пищей, впитывании через кожу. Единичный случай употребления *тритиевой воды* не приводит к длительному накоплению трития в организме, так как его *период полувыведения* – от 7 до 14 дней [3], [4].

При работе атомных электростанций тритий ^3_1H образуется в реакторных аппаратах в результате сложной реакции на ядрах дейтерия, находящегося в воде и выполняющей функцию теплоносителя, а также как продукт тройного деления ядер горючего. Часть реакций образования трития протекает непосредственно в реакторной воде (в воде первого контура АЭС с реакторами типа ВВЭР), а часть – в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛх) и стержнях регулирования. Из ТВЭЛов и стержней регулирования тритий попадает непосредственно в реакторную воду при нарушении их герметичности, а также вследствие диффузии – через оболочки или вследствие утечки через неплотности самих оболочек.

В результате работы АЭС вода первого контура или контура многократной принудительной циркуляции, как правило, неоднократно полностью обновляется, и, следовательно, весь наработанный и попавший в эти контуры тритий поступит в пруд-охладитель (естественно, за исключением доли трития, который был выброшен в атмосферу, но это сравнительно небольшая его доля – не более 15-20 %). Загрязнение тритием подземных, как правило, грунтовых, вод имеет место при нормальной эксплуатации практически большинства АЭС стран СНГ, в т.ч. и в РФ, однако степень этого загрязнения может быть весьма различной [5].

Ввиду своих специфических свойств, который отличает его от других радионуклидов, образующийся на АЭС тритий поступает в окружающую среду, как правило, минуя очистные барьеры в виде тритиевой воды в составе жидких стоков, а также с различными газовыми выбросами [6].

Значительное время полураспада, как и трудности с удалением трития химическим путём приводят к тому, что существующие технические мероприятия по его удержанию в системах АЭС в т.ч., за счет сокращения объёма дебалансных вод, увеличения емкостей для хранения сбросных вод первого контура и т.п., не могут дать сколь-нибудь значимого эффекта. Подавляющее большинство трития, образовавшегося в 1-м контуре, по системам сбросных коммуникаций различного назначения в конечном итоге всё равно поступает за пределы АЭС, т.е. фактически постоянно циркулирует в этих системах, что и является основой предлагаемого метода.

ХАРАКТЕРИСТИКА СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА НА ПЛОЩАДКЕ АЭС «БУШЕР-1»

На площадке АЭС после передачи блока Заказчику мониторинг подземных вод осуществляется иранской стороной (BNPP) по сети ранее существовавших и дополнительно пробуренных в 2010 году режимных скважин.

Проводимый в настоящее время иранским персоналом мониторинг подземных вод зачастую фактически сводится к наблюдению за уровнем подземных вод (УПВ). В своём нынешнем виде он принципиально не способен своевременно, в т.ч. и в режиме реального времени, обнаружить утечки, особенно локальные и малообъёмные, преимущественно из содержащих маломинерализованную воду трубопроводов систем UJ, UL, UK, а уже тем более – условно радиоактивные утечки из спецтрубопроводов и спецканализации на площадке АЭС. Разработанные в своё время АО «Институт Оргэнергострой» (Москва) специально для условий данной площадки инструкции по обследованию поверхности вдоль трасс водонесущих коммуникаций с целью обнаружения утечек, причём, как при расположении труб в грунте, так и при их размещении в заглубленных сооружениях (технологических каналах), а также методики по испытаниям фланцевых соединений на герметичность, так и не были востребованы местной службой эксплуатации. И это всё при том, что значительная часть строительных конструкций и часть трубопроводных коммуникаций были сооружены ещё фирмой KWU в 1974-1976 гг.

Выполняемый начиная с 2012 г. в рамках проведения радиационного мониторинга отбор проб грунтовых вод из ограниченного числа скважин с периодичностью 1 раз в месяц в настоящее время уже также недостаточен, поскольку не позволяет получить полную картину содержания трития в грунтовых водах. К тому же часть скважин на участке т.н. «ядерного острова» начиная с 2015 г. вообще была исключена из перечня опробуемых, что резко снизило представительность получаемых результатов. Предоставление результатов по времени также значительно задерживалось и по этой причине они теряли свою актуальность. А между тем, анализ данных радиационного мониторинга подземных вод свидетельствовал о значительно увеличении в отдельные периоды содержания радионуклидов в скважинах площадки АЭС после начала её постоянной эксплуатации, особенно на участке сооружений указанного «ядерного острова» (в частности, в скважинах у реакторного здания 1ZA/B). Так, содержание трития ^3H в пробах воды в одной из этих скважин за период с 17.02.2013 г. по 14.07.2013 г. увеличилось от уровня минимально детектируемой активности (МДА) до 15000 Бк/л, а содержание прочих β -радионуклидов за период с 06.08.2012 г. по 17.02.2013 г. увеличилось от уровня минимально детектируемой активности до 252 Бк/л. Содержание α -радионуклидов в смежной скважине только за период с 19.05.2013г. по 30.06.2013 г. увеличилось с 0.06 Бк/л до 0.97 Бк/л, а в другой скважине за период с 19.05.2013 г. по 13.07.2013г. соответственно с 0.14 Бк/л до 1.44 Бк/л.

В период проведения ремонтных компаний содержание радионуклидов в подземных (грунтовых) водах в целом значительно снижалось, но после пуска блока в эксплуатацию в отдельных скважинах быстро увеличивалось (и прежде всего содержание трития), что только ставило дополнительные вопросы к службе эксплуатации и надзора за коммуникациями.

Уровень вмешательства (УВ) для β -излучения в подземных водах составляет 1 Бк/л. По тритию ^3H уровень вмешательства согласно НРБ-99/2009 составляет 7600 Бк/л (для сравнения, этот показатель в странах Евросоюза равен 100 Бк/л) [1], [7], [8]. По α -излучающим радионуклидам уровень вмешательства составляет по установленным нормам радиационной безопасности 0,1 Бк/л. Необходимо подчеркнуть, что «Санитарные правила...» рассматривают значения суммарной α - и β - активности не как критерии ограничения радиационной безопасности воды, а как критерии предварительной оценки ее соответствия УВ [9], [10]. Анализ воды на содержание радионуклидов считается нецелесообразным, если $Q_\alpha < 0.1$ Бк/л и $Q_\beta < 1.0$ Бк/л. В случае же превышения указанных уровней, предлагается проводить анализ воды на содержание ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{222}Rn и ^{40}K , причем,

определение ^{40}K обязательно при $Q_p > 1.0$ Бк/л. Хотя и приведенные данные УВ относятся к питьевым водам, но их сопоставление с данными радиационного мониторинга подземных вод площадки АЭС «Бушер-1» может служить как свидетельством чрезвычайной чувствительности подземной гидросферы площадки 1 блока, так и прямым доказательством значительного увеличения техногенной нагрузки на водоносный горизонт после пуска АЭС в эксплуатацию с соответствующей постановкой вопроса, который, в свою очередь, требует дальнейшего расширения и совершенствования систем мониторинга.

Эти обстоятельства заставляют вновь вернуться к вопросу об организации на площадке АЭС службы своевременного выявления утечек из различных трубопроводных коммуникаций, в т.ч. и наружных спецкоммуникаций со слаборадиоактивными технологическими водами, основанных, в т.ч. и на мониторинге трития в подземных (грунтовых) и сбросных водах АЭС [11], [12]. Тем более, что на этой площадке в ближайшем будущем будут размещены дополнительные энергоблоки, решение о начале сооружения которых уже принято.

МОНИТОРИНГ ТРИТИЯ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС

С целью своевременного выявления малодобитных утечек из наружных условно радиационно-опасных трубопроводных систем и заглубленных сооружений, существующая на площадке система мониторинга нуждается в расширении и дополнении новой системой – мониторинга трития ^3H .

В данной области известны способы контроля протечек из ёмкостей и резервуаров, описание которых выходит за рамки настоящей статьи. Однако в большинстве случаев эти способы не являются способами непосредственного контроля протечек и не позволяют определять малые протечки из резервуаров и слабо напорных или безнапорных трубопроводов. Для данной цели малоприменимы также акустические течеискатели, так как малые протечки из безнапорных трубопроводов (в отличие от напорных) обладают низкими поисковыми характеристиками, особенно в условиях площадки АЭС «Бушер», обладающей достаточно высоким уровнем шумовых помех от работающего оборудования.

Для обнаружения малых протечек требуется использование индикатора протечки, т.е. необходимо наличие вещества, находящегося в растворенном виде в резервуаре или технологической системе. Такие индикаторы известны, как правило, это химические вещества, обладающие окрашивающим эффектом, либо это радиоактивные вещества. Однако использование красителей не является эффективным из-за сорбции этих веществ на поверхностях материалов, через которые просачивается жидкость, например бетон строительных конструкций. Пропускающие стыки трубопровода могут быть также выявлены по «Способу определения утечек из трубопровода» [13]. Однако данный способ применим только в процессе проверки оборудования на герметичность и не применим в процессе эксплуатации. Наиболее близким к рассматриваемому в данной статье вопросу является «Способ обнаружения течи в охлаждающем контуре, встроенном в электрическую машину» [14], по которому утечка обнаруживается добавлением индикатора типа трития к воде, используемой для охлаждения и последующим обнаружением индикатора соответственно в воде. Данный способ иллюстрирует техническую возможность определения не герметичности систем путём использования для этой цели трития ^3H .

Назначение предлагаемой дополнительной системы мониторинга – контроль резервуаров, каналов и сбросных трубопроводов АЭС «Бушер-1» на герметичность с

помощью жидких веществ с тритием в качестве индикатора (тритиевой воды), если источники протечек установить затруднительно иными способами либо они не дают должного эффекта. Такие задачи возникают, например, в тех случаях, когда резервуары или системы забетонированы, или заглублены под многослойные асфальтобетонные дорожные покрытия (что особенно характерно для значительной части площадки 1 блока АЭС «Бушер»), а также расположены в стесненных помещениях, непосредственный визуальный контроль в которых невозможен. По увеличению концентрации трития в пробах воды из ближайшей точки отбора (скважина, секция подземного канала, сбросной коллектор и пр.) судят о не герметичности ближайшей к точке отбора технологической системы или резервуара. Следует особо отметить, что предлагаемая система относится исключительно к расширенному мониторингу подземных вод и предназначена для использования службой эксплуатации зданий и сооружений АЭС «Бушер-1».

Предлагаемый способ несложен и вполне практически реализуем. На начальном этапе измерения сводятся к регистрации относительной активности трития с большей частотой, чем прочих радионуклидов. Метод отличается специфичностью и относительная точность определения негерметичной системы (участок трубопровода, коллектор и пр.). Для регистрации радиоактивности используют серийную измерительную аппаратуру. Соблюдение норм радиационной безопасности в нормальных условиях обеспечивается применением относительно низких индикаторных концентраций. Специальных мер безопасности не требуется [15, 16].

ПЕРЕЧЕНЬ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА НА ПЛОЩАДКЕ АЭС

Для качественного проведения мониторинга трития на площадке АЭС «Бушер-1» с целью определения дефектных коммуникаций перечень объектов мониторинга должен быть существенным образом расширен.

Основные положения:

- опробование базовых скважин и прочих водопунктов с частотой 1 раз в 15 дней (а при необходимости и чаще) и немедленной выдачей результатов измерений в виде карты радиационного поля подземных вод (возможна выдача поэлементных карт);
- помимо базовых скважин на участке т.н. «ядерного острова» отбор проб при необходимости производится из секций прилегающих кабельных каналов (только при условии наличия грунтовых или иных вод в стыках и на днище секций);
- отбор проб из сопрягающих сооружений 1ZN.2, 1ZN.3, открытого сбросного канала ZN33, открытого подводящего канала ZM.0;
- отбор проб из дренажного колодца ПН-1 у турбинного здания 1ZF (из отводящего трубопровода);
- отбор проб из концевых частей промливневых коллекторов системы UG на участках сброса в Персидский залив, а из коллекторов системы UG-2 перед сбросом в UG-1;
- включение в перечень объектов для отбора проб периферийных скважин за пределами площадки 1 блока с целью определения фоновых значений;
- в связи с периодическим превышением пороговых концентраций (уровней вмешательства) α - и β -радионуклидов в подземных водах отдельных скважин дополнительно определять в пробах воды следующие элементы: ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{222}Rn и ^{40}K во всех водопунктах.

ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Отечественная полевая аппаратура для непрерывной регистрации трития ^3H в

подземных водах (в скважинах), как и аппаратура для непрерывной регистрации трития в проточных (сбросных водах) АЭС в настоящее время практически отсутствует. Это связано с тем, что непосредственное непрерывное автоматизированное измерение содержания трития в проточных водах – достаточно сложная техническая задача, связанная с тем, что тритий, как указывалось ранее, относится к радионуклидам низких энергий и для его регистрации существующими средствами измерений (спектрометры типа TRI-CARB, QUANTULUS, TRIAFLE) в пробу воды для увеличения интенсивности света (пропорциональна энергии β -частиц) необходимо добавлять сцинтиллятор.

На начальных этапах мониторинга трития на площадке АЭС предлагается использовать имеющееся в структуре BNPP (Environmental Monitoring and Protection Laboratory) специальное лабораторное оборудование, а именно – ультра-низкофоновый жидко-сцинтилляционный спектрометр Quantulus 1220. В дальнейшем предлагается использовать портативные образцы фактически лабораторных приборов для определений непосредственно на месте отбора. В качестве такого оборудования может быть предложен интеллектуальный радиометр РКБ-05П российского производства [17].

В качестве единственного существующего зарубежного автоматизированного оборудования для мониторинга трития на АЭС может быть указана модель «TriMaran-H₂O», производимая компанией «Overhoff Technologies Corporation» (США). Следует, однако, отметить помимо достоинств данного типа оборудования – полную автономность, также и его недостатки: высокую стоимость, значительные габариты и сложность в эксплуатации, в т.ч. и по причине относительно низкой сейсмостойкости. Стандартные приборы этой модели оснащены 6 входными линиями для подвода воды из нескольких опробуемых водопунктов, что делает проблематичной и затратной её применение для единичных источников в конкретных условиях площадки, как правило, удалённых друг от друга на значительное расстояние. Длина подводящих линий не может быть протяжённой как по причине сложных климатических условий площадки, так и особенностей общей компоновки АЭС, что требует установки оборудования непосредственно у каждой точки отбора проб воды на тритий, что также нецелесообразно с экономической точки зрения.

На длительную перспективу необходимо будет оборудовать критически значимые сбросные коммуникации автоматизированными системами непрерывного определения содержания трития ^3H в проточных (сбросных) водах. В качестве первоочередного объекта установка данной системы возможна на отводе дренажного колодца ПН-1 возле турбинного здания 1ZF.

По возможности, необходимо полезно будет оборудовать подобной системой сбросные промливневые коллекторы системы UG-1 перед сбросом вод в Персидский Залив, а также на сбросные трубопроводы систем VE и UL в сопрягающих сооружениях 1ZN.3-1ZN.32 перед сбросом вод в открытый сбросной канал ZN.33.

ВЫВОДЫ

С целью своевременного выявления малodeбитных утечек из наружных условно радиационно-опасных трубопроводных систем и заглубленных сооружений, существующие на площадке АЭС «Бушер-1» системы мониторинга, в т.ч. мониторинга подземных вод, нуждаются в расширении и дополнении новой системой – мониторинга трития ^3H .

Для качественного проведения мониторинга трития на площадке АЭС «Бушер-1» с целью определения дефектных водонесущих коммуникаций перечень объектов мониторинга должен быть существенным образом расширен.

На длительную перспективу необходимо оборудовать сбросные коммуникации автоматизированными системами непрерывного определения содержания трития ^3H в проточных (сбросных) водах.

Внедрение в практику АЭС «Бушер-1» мониторинга трития самым положительным образом скажется как на безопасной эксплуатации отдельных её систем, так и на АЭС в целом.

При отработке всех организационных и технологических вопросов системы мониторинга трития на 1 блоке АЭС «Бушер» можно будет рассмотреть вопрос о распространении её и на следующие блоки АЭС, решение о сооружении которых уже принято.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санитарные правила и гигиенические нормативы СанПин 2.6.1.24-03. «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03)». – М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2003.
2. Nuclide safety data sheet: Hydrogen-3 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://www.ncsu.edu/ehs/radiation/forms/nuclide_sheets.pdf – 10.11.2016.
3. Backgrounder on Tritium, Radiation Protection Limits, and Drinking Water Standards (англ.). U.S.NRC (февраль 2011). Архивировано из первоисточника 14 октября 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/tritium-radiation-fs.html> – 10.11.2016.
4. Osborne R.V. Review of the Greenpeace report: «Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities» (англ.). Canadian Nuclear Association (август 2007). Архивировано из первоисточника 14 октября 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.nuclearfaq.ca/ReviewofGreenpeacereport_Final.pdf – 10.11.2016.
5. Турбаевский, В.В. Миграция трития в подземных водах в районе расположения Запорожской АЭС: дис. канд. техн. наук: 21.06.01 [Текст] / В.В. Турбаевский. – Харьков: Украинский НИИ экологических проблем, 2006. – 144 с.
6. МУ 2.6.1.15-02. Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения при поступлении в организм человека. Методические указания [Текст]. – М., 2004.
7. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Минздрав России [Текст]. – М., 1999. – С. 79–102.
8. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99). Минздрав России [Текст]. – М., 2000. – С. 55–56.
9. СанПин 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 (утв. постановлением главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. №47) [Текст].
10. СТО 95 102-2013. Ведение объектового мониторинга состояния недр на предприятиях госкорпорации «РОСАТОМ». Введ. 2013-02-14 [Текст]. – М.: СРО НП «СОЮЗАТОМГЕО», 2013. – 57 с.
11. СП 2.6.6.2572-2010 «Обеспечение радиационной безопасности при обращении с промышленными отходами атомных станций, содержащих техногенные радионуклиды» [Текст].
12. МР 2.6.1.27-2003. Зона наблюдения радиационного объекта. Организация и проведение радиационного контроля окружающей среды [Текст].
13. Вартазаров, С.Я. Применение радиоактивных изотопов в гидравлических и гидрологических исследованиях [Текст] / В.Я. Вартазаров. – М.: Атомиздат, 1967. – 186 с.
14. Способ обнаружения течи в охлаждающем контуре, встроенном в электрическую машину. Заявка №1362924, G01M3/20 [Текст]. Великобритания, 1974.
15. РД 52.18.595-96. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды / Методика контроля содержания трития в природных водах МВИ 01– 6/96 [Текст]. – М., 1998.
16. Методика выполнения измерений удельной (объемной) активности трития и углерода-14 в объектах окружающей среды сцинтилляционным методом. Аттестована во ВНИИФТРИ - ВИ-41-99 [Текст]. – 12 с
17. Рекомендации по приборному обеспечению дозиметрического и радиометрического контроля в соответствии с НРБ-99 и ОСПОРБ-99 [Текст].

REFERENCES

- [1] Sanitarnye pravila i gigienicheskie normativy SanPin 2.6.1.24-03. «Sanitarnye pravila proektirovaniia i ekspluatatsii atomnykh stantsii (SP AS-03)» [The sanitary rules and hygienic standards of SanPin 2.6.1.24-03. "Sanitary rules design and operation of nuclear power plants (SP AS-03)"]. M. Pub. Ministerstvo zdravookhraneniia Rossiiskoi Federatsii [Ministry of Health of the Russian Federation], 2003. (in Russian)
- [2] Nuclide safety data sheet: Hydrogen-3. Available at: https://www.ncsu.edu/ehs/radiation/forms/nuclide_sheets.pdf (in English)
- [3] Backgrounder on Tritium, Radiation Protection Limits, and Drinking Water Standards. U.S.NRC. February 2011. Available at: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/tritium-radiation-fs.html> (in English)
- [4] Osborne R.V. Review of the Greenpeace report: «Tritium Hazard Report: Pollution and Radiation Risk from Canadian Nuclear Facilities». Canadian Nuclear Association August 2007. Available at: http://www.nuclearfaq.ca/ReviewofGreenpeacereport_Final.pdf (in English)
- [5] Turbaevskii V.V. Migratsiia tritiia v podzemnykh vodakh v raione raspolozheniia Zaporozhskoi AES [Migration of tritium in underground waters around an arrangement of the Zaporizhzhia NPP]: dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. Ukrainskii NII ekologicheskikh problem [PhD thesis in Engineering. Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems]. Kharkov, 2006. 144 p. (in Russian)
- [6] MU 2.6.1.15-02. Tritii i ego soedineniia. Kontrol velichiny individualnoi effektivnoi dozy vnutrennego oblucheniia pri postuplenii v organizm cheloveka. Metodicheskie ukazaniia [MU 2.6.1.15-02. Tritium and its connections. Control of size of an individual effective dose of internal radiation at receipt in a human body. Methodical instructions]. M. 2004. (in Russian)
- [7] Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB-99). Minzdrav Rossii [Standards of radiation safety (NRB-99). Russian Ministry of Health]. M. 1999, pp. 79–102. (in Russian)
- [8] Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniia radiatsionnoi bezopasnosti (OSPORB-99). Minzdrav Rossii [Basic health regulations of ensuring radiation safety (OSPORB-99). Russian Ministry of Health]. M. 2000, pp. 55–56. (in Russian)
- [9] SanPiN 2.6.1.2523-09 Normy radiatsionnoi bezopasnosti NRB-99/2009 (utverzhdeny postanovleniem glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossiiskoi Federatsii ot 7 iuliia 2009 goda. №47) [SanPiN 2.6.1.2523-09 Norms of radiation safety of NRB-99/2009 (the resolution of the chief state health officer of the Russian Federation of July 7, 2009 № 47)]. (in Russian)
- [10] CTO 95 102-2013. Vedenie obiektoivogo monitoringa sostoianiia nedr na predpriiatiakh goskorporatsii «ROSATOM». Vvedeno 2013-02-14 [STO 95 102-2013. Conducting object monitoring of a condition of a subsoil at the enterprises of ROSATOM State Corporation. Intr. 2013-02-14]. M. Pub. Samoreguliruemaiia organizatsiia NP «SOIuZATOMGEO» [Self-regulatory organization NP SOYUZATOMGEO], 2013. 57 p. (in Russian)
- [11] SP 2.6.6.2572-2010 «Obespechenie radiatsionnoi bezopasnosti pri obrashchenii s promyshlennymi otkhodami atomnykh stantsii, soderzhashchikh tekhnogennye radionuklidy» [SP 2.6.6.2572-2010 "Ensuring radiation safety at the address with industrial wastes of the nuclear power plants containing technogenic radionuclides"]. (in Russian)
- [12] MR 2.6.1.27-2003. Zona nabludeniia radiatsionnogo obieekta. Organizatsiia i provedenie radiatsionnogo kontroliia okruzhaiushchei sredy [MP 2.6.1.27-2003. Zone of observation of radiation object. Organization and carrying out radiation control of the environment]. (in Russian)
- [13] Vartazarov S.Ya. Primenenie radioaktivnykh izotopov v gidravlicheskikh i gidrologicheskikh issledovaniiax [Use of radioactive isotopes in hydraulic and hydrological researches]. M. Pub. Atomizdat [Atomizdat], 1967. 186 p. (in Russian)
- [14] Sposob obnaruzheniia techi v okhlazhdaiushchem konture, vstroennom v elektricheskuiu mashinu. Zaiavka №1362924, G01M3/20 [Way of detection of a leak in the cooling contour which is built in the electrical machine. Application № 1362924, G01M3/20]. UK, 1974. (in Russian)
- [15] RD 52.18.595-96. Federalnyi perechen metodik vypolneniia izmerenii, dopushchennykh k primeneniui pri vypolnenii rabot v oblasti monitoringa zagriazneniia okruzhaiushchei prirodnoi sredy. Metodika kontroliia soderzhaniia tritiia v prirodnykh voda MVI 01–6/96 [RD 52.18.595-96. The federal list of techniques of performance of the measurements allowed to application when working in the field of monitoring of pollution of the surrounding environment / the Technique of control of content of tritium in natural MVI 01-6/96 water]. M. 1998. (in Russian)
- [16] Metodika vypolneniia izmerenii udelnoi (obiemnoi) aktivnosti tritiia i ugleroda-14 v obiektakh okruzhaiushchei sredy stsintilliatsonnym metodom. Attestovana vo VNIIFTRI - VI-41-99

[Technique of measurements performance of specific (volume) activity of tritium and carbon-14 in environment objects by a scintillation method. It is certified in VNIIFTRI - VI-41-99]. pp. 1–12. (in Russian)

- [17] Rekomendatsii po pribornomu obespecheniiu dozimetricheskogo i radiometricheskogo kontrolya v sootvetstvi s NRB-99 i OSPORB-99 [Recommendations about instrument ensuring radiation and radiometric control according to NRB-99 and OSPORB-99]. (in Russian)

Tritium Monitoring as Possible Indicator of Leaks from Special Pipelines and Other Water Bearing Communications at the "Bushehr-1" NPP

V.Yu. Ulyanov*, A.P. Elokhin**

** Dnieper State Academy of Construction and Architecture,
Chernyshevsky St., 24a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49600*

e-mail: vuluanov@mail.ru

*** National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

e-mail: elokhin@yandex.ru

Abstract – In work justification of need of the organization at the NPP "Bushehr-1" located in the Islamic Republic of Iran, essentially new system - tritium monitoring for the purpose of increase in safety of the NPP objects and equipment is given. This system should be an integral part of the NPP monitoring system located in a seismically active region. The main objective of tritium monitoring system has to consist in ensuring constant control of special pipelines integrity at the NPP in real time. Regulations of the organization of the tritium monitoring service should be developed and enshrined in the normative documents.

Keywords: Islamic Republic of Iran, "Bushehr" NPP, tritium monitoring, intelligent radiometer, ultra-low-background liquid scintillation spectrometer.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 539.42

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ТРАНСПОРТНО-УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА С ЯДЕРНО- И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫМ ОБЪЕКТОМ

© 2016 О.А. Губеладзе*, А.Р. Губеладзе**, С.М. Бурдаков*

* Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

** Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия

Исследование посвящено повышению защищенности транспортно-упаковочного комплекта с ядерной установкой от воздействия высокоскоростных ударников. Решена задача выбора критерия оценки стойкости мобильного объекта с защитной конструкцией.

Ключевые слова: транспортно-упаковочный комплект (ТУК), стойкость, ударник, ядерно- и радиационно опасный объект (ЯРОО), конструктивные методы защиты, критерий оценки стойкости ТУК, величина угла подхода ударника.

Поступила в редакцию 10.12.2016

Одним из наиболее опасных процессов на этапе эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО) является транспортирование. Вопросы обеспечения безопасности данного процесса отражены в различных руководящих и нормативных документах [1, 2, 3]. Для перевозки ЯРОО используются различные транспортные упаковочные комплекты (ТУК). Сущность требований к упаковкам, содержащим ЯРОО, сводится к тому, что такой материал должен упаковываться и перевозиться способом, полностью исключающим достижение критической массы и возникновение самоподдерживающейся цепной реакции при обычных и аварийных условиях перевозки. Существующие в настоящее время конструкции транспортно – упаковочных комплектов не обеспечивают достаточно эффективной защиты от воздействия высокоскоростных ударников. В первую очередь следует обратить внимание на значительное уменьшение скорости ударника за преградой (т.е. после пробития оболочки ТУК). Это обуславливается не только увеличением радиусов зон охраны от поражения мобильных агрегатов, а еще от параметров и характеристик ударника (масса, угол подхода, место воздействия) [2].

В данной работе повышение защищенности ТУК с ядерной установкой, от воздействия высокоскоростных ударников предлагается обеспечить техническими мероприятиями, к которым относятся конструктивные методы защиты.

При выборе критериев необходимо следовать следующим принципам:

- критерий должен соответствовать масштабу исследований;
- критерий, по возможности, учитывает как можно больше факторов, определяющих стойкость объекта;
- выбор такого критерия, при котором показатели стойкости объекта легко вычисляется;
- ясный физический смысл критерия.

Для решения задачи предлагается следующая модель. Рассмотрим корпус ТУК, состоящий из N -слоев. Каждый слой характеризуется своим набором конструктивных параметров:

$$\{u_1^i, u_2^i, u_3^i, \dots, u_r^i\} \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Взаимодействие слоев преграды с ударником может определяться совокупностью уравнений их математического описания, включающих функциональные преобразования в слоях:

$$\begin{aligned} v_{nn}^{i+1} &= F_1(v_{nn}^i, q_{nn}^i, \rho_{nn}^i, u_1^i, u_2^i, \dots, u_r^i); \\ q_{nn}^{i+1} &= F_2(v_{nn}^i, q_{nn}^i, \rho_{nn}^i, u_1^i, u_2^i, \dots, u_r^i); \\ \rho_{nn}^{i+1} &= F_3(v_{nn}^i, q_{nn}^i, \rho_{nn}^i, u_1^i, u_2^i, \dots, u_r^i), \end{aligned} \quad (2)$$

где v_{nn}^i – скорость ударника на входе в i -слой;

v_{zn}^i – скорость ударника на выходе из i -слоя;

q_{nn}^i – геометрическая характеристика ударника перед преградой (i -слоем);

q_{zn}^i – геометрическая характеристика ударника после пробития преграды (i -слоя);

ρ_{nn}^i – плотность ударника перед преградой (i -слоем);

ρ_{zn}^i – плотность ударника после пробития преграды (i -слоя).

Причем, $v_{nn}^{i+1} = v_{zn}^i$; $\rho_{nn}^{i+1} = \rho_{zn}^i$; $q_{nn}^{i+1} = q_{zn}^i$.

Тогда обозначим,

$$\begin{aligned} v_{nn}^1 &= v_{zn} = v_1; \\ v_{nn}^2 &= v_{zn}^1 = v_2; \\ v_{nn}^3 &= v_{zn}^2 = v_3; \\ v_{nn}^n &= v_{zn}^{n-1} = v_n. \end{aligned}$$

Ограничения на конструктивные параметры запишутся в виде:

$$d_j(u_1^i, \dots, u_r^i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, q_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

где q_i – количество ограничений на конструктивные параметры i -го слоя.

С учетом ограничений по режимным параметрам (характеристики ударника):

$$D_j(v_i, \rho_i, q_i, u_1^i, \dots, u_r^i) \leq 0, \quad j = 1, \dots, q_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (4)$$

Анализируя принятый критерий, отличим, что он представляет собой функциональную зависимость вида

$$J = \sum_{i=1}^N Q_i(v_i, \rho_i, q_i, u_1^i, \dots, u_r^i), \quad (5)$$

где Q_i – зависимость, отражающая вклад i -го слоя в целевую функцию и являющаяся функцией от режимных и конструктивных параметров этого слоя.

Представим пробитие многослойной конструкции в виде многошагового процесса, схема которого представлена на рисунке 1.

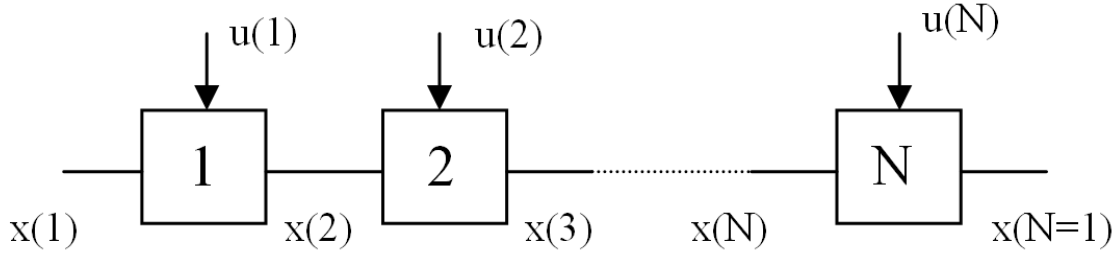


Рис. 1. – Схема процесса

Функция цели теперь выражается в виде:

$$J = \sum_{i=1}^N \varphi(x(i), u(i), i), \quad (6)$$

где φ – функция, зависящая от номера слоя i .

Для N – слойного корпуса ТУК скорость ударника за преградой (пробитие при $\alpha = 90^\circ \div 70^\circ$) определяется из выражения [5].

$$v_{zn}^{TYK} = v_{N+1} = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{v_{i-1}^2}{\exp\left(2\chi^* \frac{m_i}{m_0}\right)} - \frac{H_{\partial i}}{\chi^* \rho_{ni}} \left(\exp\left(2\chi^* \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{m_0}\right) - 1 \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Обозначим $v_{nn}^{TYK} - v_{zn}^{TYK} = \Delta v^{TYK}$. Одним из путей повышения стойкости объекта к подобным воздействиям является использование дополнительных защитных конструкций.

Общее снижение скорости ударника (для случая применения простых заслонов - дополнительных слоев) определится:

$$\Delta v_{\Sigma} = \Delta v^{TYK} + \Delta v^{ЗК}. \quad (8)$$

При расположении защитных конструкций из L -слоев на некотором расстоянии внешней поверхности ТУК:

$$\Delta v_{\Sigma} = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{v_{i-1}^2}{\exp\left(2\chi^* \frac{m_i}{m_0}\right)} - \frac{H_{\partial i}}{\chi^* \rho_{ni}} \left(\exp\left(2\chi^* \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{m_0}\right) - 1 \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} + \left[\sum_{i=1}^L \left(\frac{v_{i-1}^2}{\exp\left(2\chi^* \frac{m_i}{m_0}\right)} - \frac{H_{\partial i}}{\chi^* \rho_{ni}} \left(\exp\left(2\chi^* \sum_{i=1}^L \frac{m_i}{m_0}\right) - 1 \right) \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

С учетом ограничений на массу и габариты защитной конструкции критерий оценки стойкости будет иметь вид:

$$K = k_3 \left(\frac{\Delta v^{3K}}{\sum_{l=1}^L m'_l} \right) + \frac{\Delta v^{TYK}}{\sum_{i=1}^N m'_i}, \quad (10)$$

где m'_l и m'_i – массы l -го и i -го слоев защитной конструкции и сегмента корпуса ТУК соответственно;

k_3 – коэффициент защищенности, учитывающий долю поверхности обстреливаемой поверхности ТУК закрытой защитной конструкцией.

Определим величину критерия (10) для гипотетического ТУК. Оценку проведем без учета наличия силовых элементов конструкции.

Так как дополнительная защита отсутствует, то принимаем $k_3 = 0$, тогда:

$$K = \frac{\Delta v^{TYK}}{\sum_{i=1}^N m'_i}. \quad (11)$$

В рассматриваемом примере величина K принимает значения, представленные в таблице 1.

В случае использования простейшей защитной конструкции (щит толщиной $\delta_3 = 3$ мм, материала АМг-6) для различных k_3 , критерий будет принимать значения, представленные в таблице 2.

Таблица 1. – Значения K незащищенной конструкции

$L, м$	K			
	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
10	0,1025	0,1175	0,1540	0,1900
100	0,1125	0,1280	0,1705	0,2000
500	0,1250	0,1400	0,1835	0,2130

Таблица 2. – Значения K конструкции с простейшей защитой

$L, м$	k_3	K			
		$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 30^\circ$
10	0,5	0,8167	0,9151	1,1659	1,4192
	1,0	1,5310	1,7127	2,1778	2,6483
500	0,5	0,9583	1,0477	1,3352	1,5553
	1,0	1,7916	1,9555	2,4870	2,8975

Проведенный анализ полученных результатов показал, что существенное влияние на уменьшение Δv_Σ оказывает величина угла подхода ударника к преграде α .

Для определения уровней стойкости защитных преград теперь имеются все необходимые параметры. Обобщая вышесказанное можно представить методику оценки стойкости мобильных агрегатов с ТУК и средств защиты к воздействию

ударников в виде алгоритма, представленного на рисунке 2.

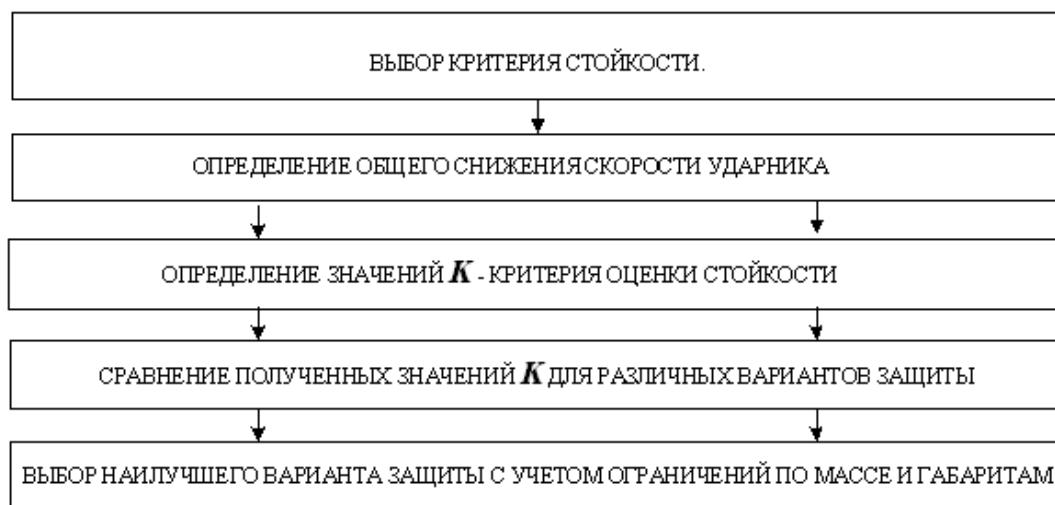


Рис. 2. – Алгоритм оценки

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 №170-ФЗ (действующая редакция, 2016) [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «Консультант Плюс». – Режим доступа: URL: https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8450 – 22.11.2016.
2. ГОСТ 12916-89. Транспортирование радиоактивных веществ. Термины и определения. [Текст] – М.: Издательство стандартов, 1990. – 10 с.
3. Приказ Ростехнадзора от 07.06.2013 №248 (ред. от 22.09.2015) «Об утверждении Административного регламента по исполнению Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору государственной функции по федеральному государственному надзору в области использования атомной энергии» (Зарегистрировано в Минюсте России 25.07.2013 №29174) [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «Консультант Плюс». – Режим доступа: URL: https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150393 – 22.11.2016.
4. Сахабудинов, Р.В. и др. Научно-методические основы обеспечения физической защиты ядерноопасных объектов [Текст] / Р.В. Сахабудинов, О.А. Губеладзе. – Ростов-на-Дону: ООО «Терра», 2006. – 153 с.
5. Губеладзе, О.А. Моделирование высокоскоростного удара [Текст] / О.А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №1. – С. 61–69.

REFERENCES

- [1] Federalnyi zakon «Ob ispolzovanii atomnoi energii» ot 21.11.1995 №170-FZ (deistvuiushchaia redaktsiia, 2016) [The federal law "About Use of Atomic Energy" from 11/21/1995 № 170-FL (the current version, 2016)]. Ofitsialnyi sait kompanii «Konsultant Plus» [Official site of the Consultant Plus company]. Available at: https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8450 (in Russian)
- [2] GOST 12916-89. Transportirovanie radioaktivnykh veshchestv. Terminy i opredeleniia [State Standart 12916-89. Transportation of radioactive materials. Terms and definitions]. M. Pub. Izdatelstvo standartov [Standards Publishing House], 1990. 10 p. (in Russian)
- [3] Prikaz Rostekhnadzora ot 07.06.2013 №248 (red. ot 22.09.2015) «Ob utverzhdenii Administrativnogo reglamenta po ispolneniiu Federalnoi sluzhboi po ekologicheskemu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru gosudarstvennoi funktsii po federalnomu gosudarstvennomu nadzoru v oblasti ispolzovaniia atomnoi energii» (Zaregistrirvano v Miniuste Rossii 25.07.2013 №29174) [The order of Rostekhnadzor from 6/7/2013 № 248 (an edition from 9/22/2015) "About the approval of Administrative regulations on execution of the state function by Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision on federal state

supervision in the field of use of atomic energy" (It is registered in the Ministry of Justice of the Russian Federation 7/25/2013 № 29174)]. Ofitsialnyi sait kompanii «Konsultant Plus» [Official site of the Consultant Plus company]. Available at: https://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_150393 (in Russian)

- [4] Sakhabudinov R.V., Gubeladze O.A. Nauchno-metodicheskie osnovy obespecheniia fizicheskoi zashchity iadernoopasnykh obiektov [Scientific and methodical bases of ensuring physical protection of nuclear-dangerous objects]. Rostov-on-Don. Pub. ООО «Terra» [LLC Terra], 2006. 153 p. (in Russian)
- [5] Gubeladze, O.A. Modelirovanie vysokoskorostnogo udara [Modeling of high-speed blow]. Globalnaia iadernaia bezopasnost [Global nuclear safety]. 2015, №1, ISSN 2305-414X, pp. 61–69. (in Russian)

Criterion Choice for Evaluation of Transport and Packing Set Firmness with Nuclear and Radiation Dangerous Object

O.A. Gubeladze^{*1}, A.R. Gubeladze^{1}, S.M. Burdakov^{*2}**

^{} Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 34736*

*^{**} Don State Technical University*

Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

¹e-mail: buba26021966@yandex.ru, ²e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

Abstract – One of the most dangerous processes at an operational phase of nuclear and radiation dangerous objects (NuRDO) is transportation. Various transport packing sets (TPS) are used for transportation of NuRDO. Work is performed within the researches of increase in security of a transport and packing set with nuclear installation from high-speed drummer influence. The problem of the choice of criterion for evaluation of firmness of a mobile object with a protective design is considered.

Keywords: transport and packing set (TPS), firmness, drummer, nuclear and radiation dangerous object (NuRDO), constructive methods of protection, criterion for evaluation of TPS firmness, angle size of drummer approach.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ
РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ВВЭР**

© 2016 Н.Н. Подрезов *, С.А. Томилин *, В.В. Шишов **

* Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

** Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск,
Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В конструкции парогенераторов ПГВ-1000 и ПГВ-1000М для реакторных установок на основе водо-водяных энергетических реакторов существует ряд проблемных швов, снижающих эксплуатационную надежность изделия. Это следует из статистики повреждаемости указанного энергетического оборудования и выявляется при планово-предупредительных ремонтах в условиях атомных электрических станций. Особого внимания требуют кольцевые швы № 111-1 и № 111-2 приварки холодного и горячего коллекторов к патрубку Ду 1200, которые работают в условиях прогрессирующей стресс-коррозии, что приводит, в ряде случаев, к потере их конструкционной прочности через 5 – 25 лет после пуска реакторных установок.

В работе рассмотрена технология сварки указанных швов в условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск. Предложены производственные меры, реализация которых направлена на повышение технологической свариваемости рассматриваемых швов с целью уменьшения уровня остаточных сварочных напряжений в критической зоне, в качестве которой согласно отраслевой Методике оценки срока службы узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000 принята зона перехода от «кармана» коллектора к патрубку Ду 1200.

Ключевые слова: парогенератор, сварное соединение, дефекты сварного шва, остаточные сварочные напряжения, эксплуатационная надежность.

Поступила в редакцию 15.12.2016

С 2013 г. изготовление полных комплектов парогенераторов атомных электрических станций (АЭС) проектов В-320 и АЭС-2006 поручено филиалу АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск. Как показал опыт изготовления первых комплектов конструкции парогенераторов ПГВ-1000, ПГВ-1000М для реакторных установок на основе водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) по сварным соединениям являются технологичными. Однако в парогенераторе есть ряд проблемных сварных соединений, снижающих эксплуатационную надежность изделия, что следует из статистики их повреждаемости, выявляемой при планово-предупредительных ремонтах в станционных условиях.

Особое внимание уделяется кольцевым швам № 111-1 и № 111-2 (далее – СС №111) приварки холодного и горячего коллекторов к патрубку Ду 1200. Эти швы, как известно [1], работают в условиях прогрессирующей стресс-коррозии, что приводит, в ряде случаев, к потере их конструкционной прочности через 5 – 25 лет после пуска реакторных установок. Например, 5ПГ1 на Нововоронежской АЭС введен в

эксплуатацию в сентябре 1989 г. В 2013 г. обнаружены трещиноподобные дефекты на участке 510 мм. Срок эксплуатации до обнаружения дефектов составил 24 года.

В данный момент отсутствует тенденция к уменьшению количества ремонтов СС №111 на отечественных АЭС. Следствием этого стала разработка в 2014 г. отраслевой Методики оценки срока службы узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000. В качестве критической зоны принята зона перехода от «кармана» коллектора к патрубку Ду 1200 (галтель радиусом 20 мм), расположенная ниже СС № 111, рис.1.

В основу методических расчета положен учет возможности развития в «кармане» коллектора макротрещин вследствие замедленного деформационного коррозионного растрескивания. Стресс-коррозионное разрушение реализуется в условиях водно-химического режима второго контура, поддерживающего коррозионно-активную среду при следующих условиях:

- наличие концентраторов напряжений (центров активации), запускающих автокаталитические процессы питтинговой и язвенной коррозии на поверхности «кармана»;
- действие растягивающих напряжений на уровне предела текучести в области СС №111 во время работы парогенератора в режимах, отличных от нормального (разогрев, повышение/понижение мощности, отключение/включение главного циркуляционного насоса и т.п.).

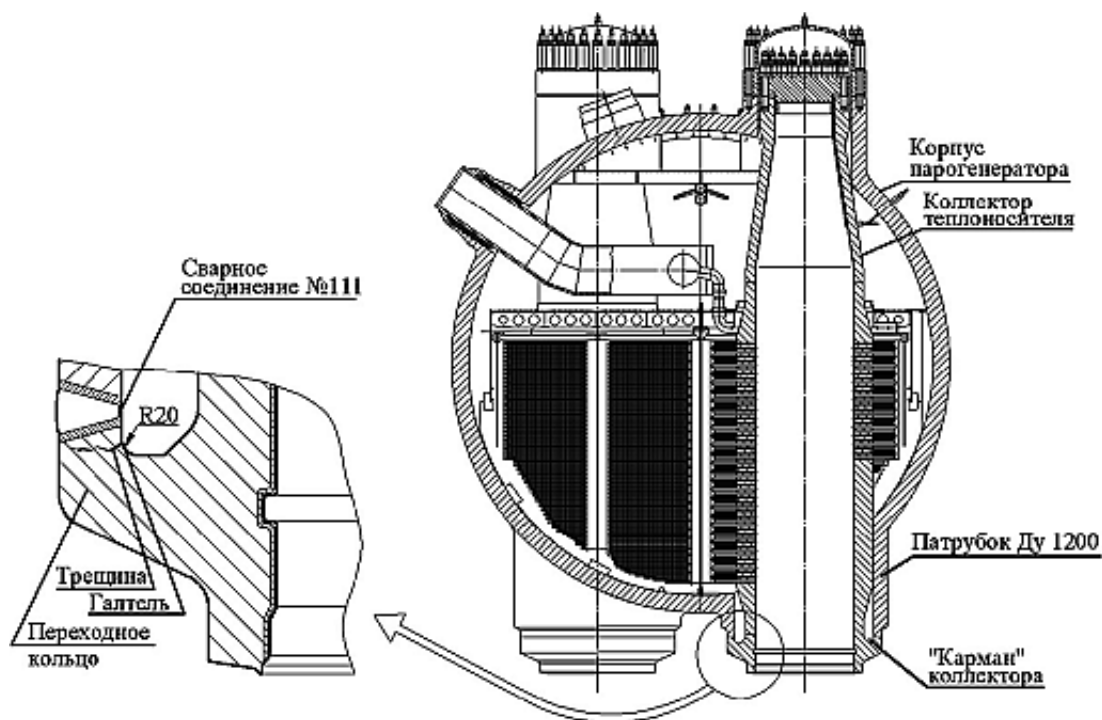


Рис. 1. – Критическая зона повреждаемости «кармана» коллектора

За последнее время проделана большая работа по снижению риска возникновения замедленного деформационного коррозионного растрескивания. В частности, изменена на более благоприятную форма разделки СС № 111 для парогенераторов более поздних модификаций ПГВ-1000МКП и ПГВ-1500М. В процессе эксплуатации предусмотрены процедуры гидродинамических отмылок, химических промывок и продувок для удаления шлама со стенок «карманов», оптимизируется переход на этаноламиновый водно-химический режим, снижающий интенсивность коррозии.

Поскольку разрушения сварных соединений носит задержанный по времени характер, то до последнего времени на производственные факторы их изготовления обращалось недостаточное внимание. Однако, измерение остаточных напряжений СС №111 на «горячих» коллекторах 5ПГ1-4 Нововоронежской АЭС, во время планово-предупредительного ремонта 2009 г. специалистами ВНИИАЭС и АО «ИНКОТЕС» методом акустоупругости показало [2], что на всех четырех 5ПГ1-4 остаточные напряжения в критических зонах СС №111 были сопоставимы с пределом текучести стали 10ГН2МФА. Как следствие, все парогенераторы энергоблока №5 Нововоронежской АЭС были повреждены в период 1998 – 2009 годов и отремонтированы (некоторые не один раз) в области СС № 111. Достижение уровня высоких эксплуатационных напряжений в области кармана стало возможным из-за высокой остаточной напряженности проблемного узла после сварки в производственных условиях.

В настоящее время специалистами Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск предпринят ряд мер для уменьшения остаточных напряжений, исключения концентраторов напряжений в «кармане» в рамках действующей технологии сварки СС №111.

При ручной аргонодуговой сварке корневой части шва для качественного формирования обратного валика предусмотрены герметизация зоны сварки и поддув аргона со стороны «кармана». После первого прохода корневой части СС №111 проводится визуальный оптический контроль эндоскопом на отсутствие подрезов, наплывов, непроваров в корне шва. В случае обнаружения дефекты устраняются с помощью специального пневматического инструмента с гибким приводом.

После завершения ручной аргонодуговой сварки корневой части выполняется ее радиографический контроль и аттестация на отсутствие дефектов. При обнаружении «непроходных» дефектов и невозможности их устранения с последующей подваркой, коллектор первого контура отрезается от корпуса парогенератора для восстановления кромок под сварку и новой сборки с патрубком Ду1200. Следует отметить, что такие экстраординарные случаи в производственных условиях Филиала АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск не отмечались и, по-видимому, маловероятны в дальнейшем.

Поводом для такого оптимистического прогноза является наличие на предприятии хорошо зарекомендовавшей системы подготовки и аттестации сварщиков для ручной аргонодуговой сварки и ручной дуговой сварки ответственных швов. Так, прежде чем приступить к сварке основного СС №111, даже аттестованные сварщики выполняют пробные сварные соединения, полностью имитирующие штатные. Пробное сварное соединение проходит все виды неразрушающих контролей, что и штатный шов, а на поперечном макрошлифе оценивается формирование шва и отсутствие дефектов в зоне сплавления. Однако после получения положительных заключений по результатам проведенных контрольных операций аттестованный сварщик еще не допускается к работе на штатном шве. Перед самым началом сварки он должен выполнить пробный шов на имитаторе и, только после положительного экспресс анализа имитационного пробного сварного соединения, наконец, получает окончательный допуск.

Заполнение разделки ручной дуговой сварки на полное сечение ведется при сопутствующем подогреве зоны сварного соединения до температур 100 – 200 °С двумя сварщиками одновременно, которые располагаются в диаметрально противоположных сторонах коллектора первого контура. Этих мер, как показывает опыт, достаточно для исключения деформаций увода коллектора от вертикальной оси, соблюдения заданных тепловых зазоров между коллектором первого контура и патрубком корпуса ПГВ

Ду800 и снижения неравномерности распределения временных и послесварочных остаточных напряжений в сварном соединении. После каждого прохода сварной шов слесарным способом зачищается до чистого металла, проводится визуальный контроль на отсутствие дефектов. В процессе сварки штатного СС № 111, длящегося двое суток в непрерывном режиме, постоянно контролируется температура сопутствующего подогрева во всех зонах сварного соединения.

После облицовки СС № 111 и проведения слесарных работ по финишной зачистке в технологическом процессе предусмотрена оценка качества на соответствие требованиям конструкторской документации. В процессе визуального и измерительного контроля обязательно эндоскопируется внутренняя (со стороны «кармана») поверхность сварного шва на предмет качественного и бездефектного обратного формирования, а сам шов с прилегающей околосшовной зоной основного металла проходит цветную дефектоскопию, ультразвуковой контроль и рентгенографическую дефектоскопию. После аттестации результатов контроля по отраслевым нормам качества и получения положительных результатов сварные соединения №111-1 и № 111-2 одновременно подвергают местной термической обработке.

Местная термическая обработка применяется для стабилизации строго вертикального положения коллектора и снятия послесварочных напряжений. В качестве источника тепла используются нагревательные панели фирмы Hitachi Kokusai Electric, теплоизоляция располагается таким образом, чтобы обеспечить равномерный прогрев каждого из сварных соединений и прилегающего к ним основного металла. Режим местной термообработки (скорость подъема температуры не более 40°C в час до $620 - 640^{\circ}\text{C}$, выдержка 8 – 10 часов, регулируемое остывание до 200°C со скоростью не более 30°C в час) регламентирован и контролируется достаточным количеством термопар, выведенных на самописцы. После проведения термической обработки все этапы неразрушающего контроля повторяются.

Таким образом, описанная выше технология выполнения СС № 111 по приварке коллекторов первого контура к патрубку Ду1200 корпуса парогенератора обеспечивает требования, предъявляемые к этим швам и в целом к парогенератору конструкторско-технологической документацией проектной организации. Однако учитывая задержанный характер появления дефектов для снижения вероятности их возникновения спустя годы эксплуатации необходимо дополнительно реализовывать производственные меры, направленные, прежде всего, на повышение технологической свариваемости этих швов [3] с целью уменьшения уровня остаточных сварочных напряжений в критической зоне (рис.1). В частности, в качестве варианта рассматривается возможность автоматизации процесса сварки швов № 111-1 и № 111-2, заполнение которых сейчас выполняются в ручном режиме. Это позволит исключить влияние человеческого фактора и повысить прогнозируемость и повторяемость результатов изготовления проблемных швов и изделия в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуб, А.В. и др. Разработка методик ультразвукового контроля и определения работоспособности узла приварки коллектора к парогенератору ПГВ-1000М [Текст] / А.В. Дуб, В.А. Дурнынин и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – №4 – С. 36–51.
2. Гетман, А.Ф. и др. Причины повреждений сварных швов №111 ПГВ-1000 и предложения по их устранению [Электронный ресурс] / А.Ф. Гетман, А.И. Усанов, Б.И. Лукасевич, А.А. Тутнов, Л.А. Пасманик, В.А. Смирнов, А.В. Камышев. – Режим доступа: URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/documents/sgpg2010-017.pdf>. – 10.12.2016.

3. Доронин, Ю.В. и др. Необходимость формализации понятия свариваемости в производстве изделий АЭС [Текст] / Ю.В. Доронин, Н.Н. Подрезов // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – №3(12). – С. 26–30.

REFERENCES

- [1] Dub A.V., Durnin V.A., etc. Razrabotka metodik ultrazvukovogo kontrolya i opredeleniya rabotosposobnosti uzla privarki kollektora k parogeneratoru PGV-1000M [Development of techniques of ultrasonic control and definition of welding knot operability of a collector to the PGV-1000M steam generator]. Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy control [Technical diagnostics and nondestructive control], 2014, №4, ISSN 0235-3474, pp. 36–51. (in Russian)
- [2] Getman A.F., Usanov A.I., Lukasevich B.I., Tutnov A.A., Pasmanik L.A., Smirnov V.A., Kamyshev A.V. Prichiny povrezhdeniy svarnykh shvov №111 PGV-1000 i predlozheniya po ikh ustraneniyu [Damage reasons of welded seams № 111 PGV-1000 and offer on their elimination]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/documents/sgpg2010-017.pdf> (in Russian)
- [3] Doronin Yu.V., Podrezov N.N. Neobkhodimost formalizatsii ponyatiya svarivaemosti v proizvodstve izdeliy AES [Need of formalization of welding concept for manufacturing of the NPP products]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2014, №3(12), ISSN 2305-4141X, pp. 26–30. (in Russian)

Operational Reliability Increase of Welded Connections of Steam Generators for PWR Reactor Installations

N.N. Podrezov*¹, S.A. Tomilin *², V.V. Shishov**³

* Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», 73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

¹ e-mail: p1n2f@rambler.ru ; ² e-mail: SATomilin@mephi.ru

** Atom mash the branch of JSC AEM-technology in Volgodonsk, Zhukovskoye shosse, 10, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

³ e-mail: shishov_vv@atom mash.ru

Abstract – A number of the problem seams reducing operational reliability of product exists in a design of PGV-1000 and PGV-1000M steam generators for pressurized water reactor installations. The special attention is required by ring seams № 111-1 and № 111-2 of welding of cold and hot collectors to Du 1200 branch pipe. These collectors work in the conditions of progressing stress corrosion that sometimes leads to loss of their constructional durability in 5 – 25 years after start-up of reactor installations.

In work the technology of welding of the specified seams at the Atom mash the branch of JSC AEM-technology in Volgodonsk is considered. Production measures which realization is directed to increase in a technological welding of the considered seams for the purpose of level reduction of residual welding tension in the critical zone are proposed. A critical zone is considered to be transition zone from collector "pocket" to Du 1200 branch pipe according to Technique of assessment of service life of the heat carrier welding collector knot to the PGV-1000 steam generator case.

Keywords: steam generator, welding connection, welded seam defects, residual welding tension, operational reliability.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.791.75.053

**АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНОЙ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ**

© 2016 А.М. Рыбачук, Н.В. Крысько

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

В статье рассматривается характер распределения индукции магнитного поля четырехполюсной системы, применяемой для управления формированием сварного шва при дуговой сварке трубопроводов на объектах атомной энергетики. При работе изделий в агрессивных средах наличие концентрации напряжений в месте перехода от основного металла ко шву уменьшает коррозионную стойкость сварных соединений и приводит к коррозионному растрескиванию. В настоящем исследовании показаны результаты измерения индукции магнитного поля, в результате чего можно сказать, что в области горения дуги и зоне проплавления основного металла магнитное поле является гиперболическим.

Ключевые слова: дуговая сварка, формирование шва в магнитном поле, четырехполюсная магнитная система, объекты атомной энергетики.

Поступила в редакцию 10.12.2016

Качественное формирование шва всегда являлась одной из основных проблем при автоматической дуговой сварке в защитных газах. При расплавлении свариваемых кромок во время сварки стыковых швов с полным проплавлением под действием сил давления дуги, тяжести, электромагнитных и поверхностного натяжения жидкий металл формируется, образуя шов с выпуклостью с обратной стороны. Место перехода от основного металла ко шву является концентратором напряжений и при сварке на весу с увеличением высоты выпуклости с обратной стороны уменьшается радиус перехода от основного металла ко шву и концентрация напряжений увеличивается.

При работе изделий в агрессивных средах наличие концентрации напряжений в месте перехода от основного металла ко шву уменьшает коррозионную стойкость сварных соединений и приводит к коррозионному растрескиванию. При сварке стыков трубопроводов, кроме уменьшения проходного сечения, является важным и то, что в месте перехода от основного металла ко шву скапливаются осадки продуктов, транспортируемых по трубопроводу, которые способствуют усиленной коррозии.

На изделиях для хранения, приготовления и перевозки пищевых продуктов по санитарным условиям не допускается наличие выпуклости с обратной стороны шва. После сварки таких изделий приходится механическим путем удалять выпуклость с обратной стороны и полировать поверхность шва.

Существует способ формирования шва во внешнем поперечном магнитном поле четырехполюсной магнитной системой при дуговой сварке (рис. 1), который позволяет формировать швы с нулевой выпуклостью с обратной стороны при однократной сварке изделий из немагнитных материалов [1]. На рисунке 1 показано направление магнитных полей при сварке на обратной полярности (плюс на электроде).

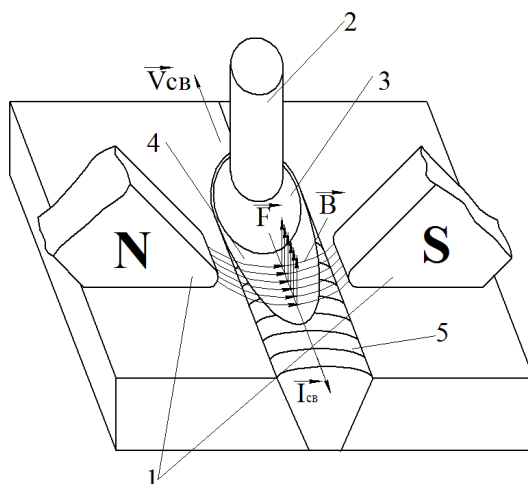


Рис. 1. – Удержание сварочной ванны поперечным магнитным полем при сварке на обратной полярности. 1 - полюса магнита; 2 - электрод; 3 - дуга; 4 - расплавленный металл; 5 - закристаллизовавшийся металл

При использовании симметричной четырёхполюсной магнитной системы (рис. 2) удаётся вводить в область сварочной ванны значительные по величине магнитные поля необходимые для формирования шва при сохранении устойчивости сварочной дуги.

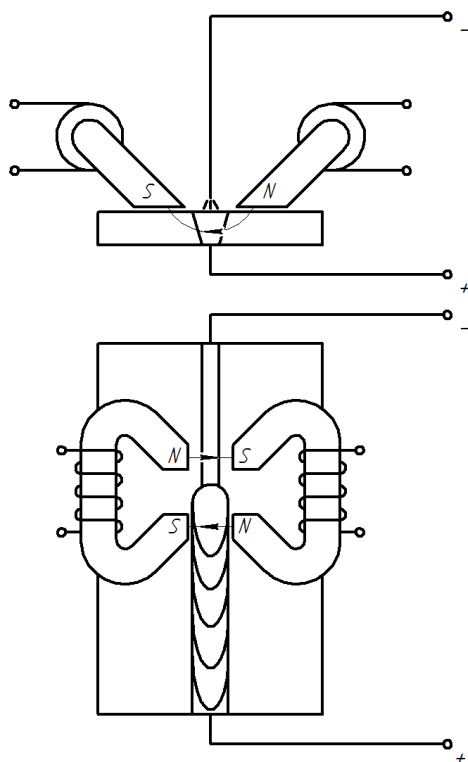


Рис. 2. – Схема устройства для ввода в свариваемое изделие поперечных магнитных полей

При удержании сварочной ванны поперечным магнитным полем сварочная дуга растягивается вдоль направления сварки и сжимается в поперечном направлении (рис. 3).

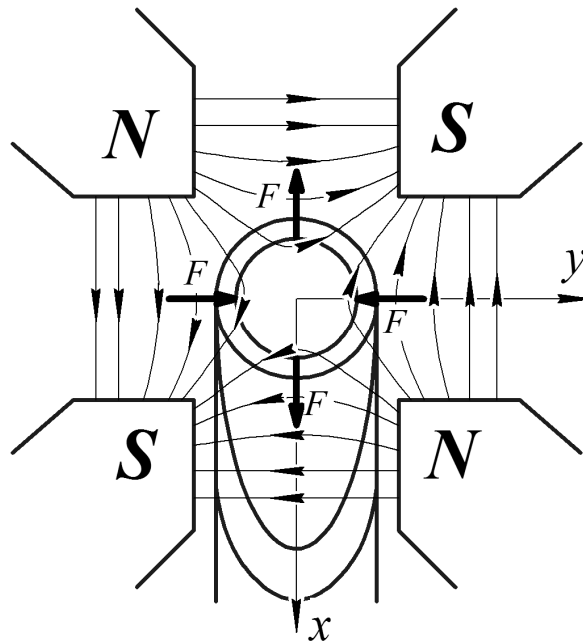


Рис. 3. – Дуга в четырехполюсном магнитном поле

Плотность тока сконцентрирована на острых концах дуги, имеющей эллиптическое основание, следовательно, в сварочной ванне создаются электромагнитные силы значительной величины. В этом случае при сварке стыковых швов с полным проплавлением можно получать требуемую форму обратной стороны шва (рис. 4).

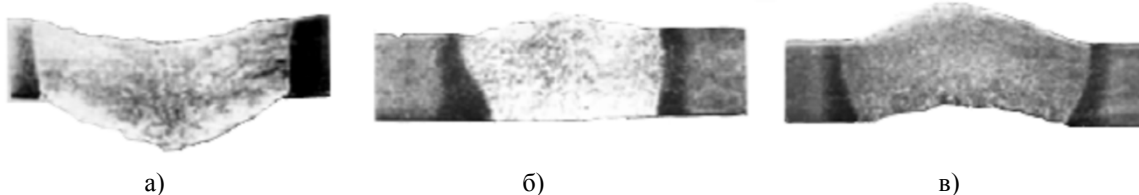


Рис. 4. – Макрошлифы швов, выполненных при индукции магнитного поля:
а) $B=0$; б) $B=0,08\text{ T}$; в) $B=0,1\text{ T}$.

Форма полюсов, расположение полюсов относительно плоскостей симметрии магнитной системы, величина и форма рабочего и боковых зазоров определяет величину и конфигурацию магнитного поля в области дуги и сварочной ванны. Конфигурация магнитного поля в области дуги определяет характер и величину деформации дуги, которая влияет на проплавляющую способность дуги, распределение тока в сварочной ванне и, в конечном счёте, на получаемую форму шва.

Поэтому анализ магнитного поля, создаваемого четырёхполюсной магнитной системой, представляет практический интерес. Магнитное поле, создаваемое такой системой, имеет две взаимно перпендикулярные эквипотенциальные плоскости, проходящие через плоскости симметрии магнитной системы XOZ и YOZ . Две взаимно перпендикулярные эквипотенциальные плоскости образуют поле прямого угла [2], характеризующееся тем, что линии поля и эквипотенциальные линии являются гиперболами. Координатные оси OX и OY можно рассматривать как предельные гиперболы с бесконечной вогнутостью в начале координат. Если в поле прямого угла поместить полюс, имеющий гиперболическую форму, совпадающий с эквипотенциальной поверхностью, то поле останется гиперболическим. Используемая

четырёхполюсная магнитная система имеет полюса не гиперболического вида, расположенные асимметрично относительно биссектрисы прямого угла. Это связано с необходимостью создания максимального поля в рабочем зазоре. Поэтому магнитное поле, созданное такой системой, не будет гиперболическим во всех областях. В области, примыкающей к вертикальной оси магнитной системы, наиболее удалённой от полюсов и наиболее приближенной к взаимно перпендикулярным эквипотенциальным плоскостям характер поля будет больше определяться взаимно перпендикулярными эквипотенциальными плоскостями.

Уравнение потенциальных линий гиперболического поля в координатах x_0, y_0 , совпадающих с биссектрисами прямого угла [3]:

$$x_0^2 - y_0^2 = \frac{2\varphi_m}{k} \text{ или } \varphi_m = \frac{k}{2}(x_0^2 - y_0^2), \quad (1)$$

где $k = \frac{2\varphi_m}{a^2}$,

a – расстояние от оси магнитной системы до эквипотенциальной линии с потенциалом φ_{m1} .

В координатах x, y распределение потенциала описывается уравнением:

$$\varphi_{m1} = kxy$$

Определим составляющие напряженности магнитного поля:

$$H_x = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial x} = -ky; H_y = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial y} = -kx \quad (2)$$

Из формул (2) видно, что для гиперболического поля составляющие напряженности магнитного поля H_x и H_y являются линейными функциями координат.

Т.к. $B = \mu_a H$, то градиенты поперечных составляющих индукции магнитного поля вдоль осей OX и OY постоянны:

$$\frac{\partial B_y}{\partial x} = -\mu_a k; \frac{\partial B_x}{\partial y} = -\mu_a k \quad (3)$$

Экспериментальные данные измерения магнитной индукции (рис. 5)

$B_y = f(x)$ и $B_x = f(y)$ подтверждают, что в центральной области B_y и B_x являются линейными функциями координат.

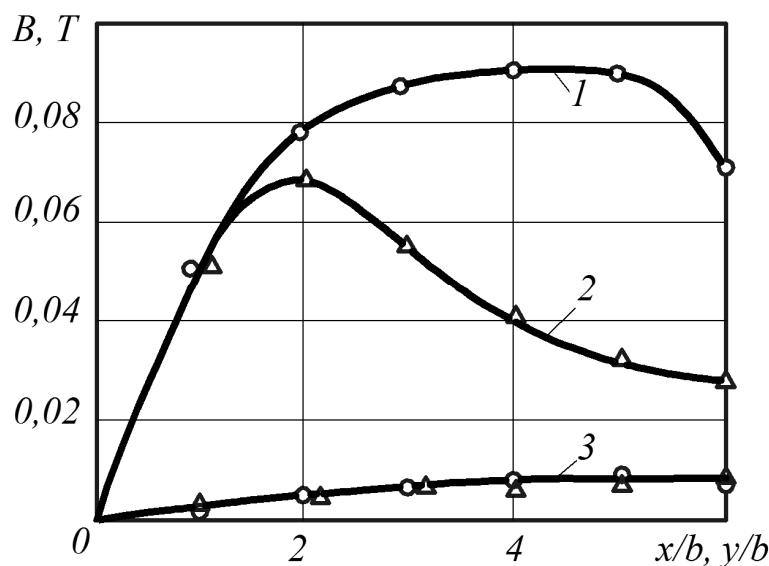


Рис. 5. – Распределение индукции магнитного поля в рабочем и боковом зазорах: 1 - в рабочем зазоре при $z = 0$; 2 - в боковом зазоре при $z = 0$; 3 – в рабочем и боковом зазорах при $z = 5b$. Здесь: b - половина ширины зазора.

Совпадение кривых индукции магнитного поля в рабочем и боковом зазорах центральной области свидетельствует о том, что в области горения дуги и зоне проплавления основного металла магнитное поле является гиперболическим. Причём, данные кривой 3 свидетельствуют об увеличении области гиперболического магнитного поля при удалении от нижних граней полюсов.

ВЫВОДЫ

1) Магнитное поле четырёхполюсной магнитной системы в центральной области, зоне горения дуги и проплавления основного металла, является гиперболическим.

2) Зона гиперболического магнитного поля увеличивается при удалении от нижних граней полюсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов, А.И. и др. Удержание жидкого металла сварочной ванны поперечным магнитным полем [Текст] / А.И. Акулов, А.М. Рыбачук // Сварочное производство. – 1972. – №2. – С. 3–4.
2. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля [Текст] / В.А. Говорков. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 464 с.
3. Жигарев, А.А. и др. Электронно-лучевые и фотоэлектронные приборы [Текст] / А.А. Жигарев, Г.Г. Шамаева. – М.: Высшая школа, 1982. – 463 с.

REFERENCES

- [1] Akulov A.I., Rybachuk A.M. Uderzhanie zhidkogo metalla svarochnoi vannы poperechnym magnitnym polem [Deduction of liquid metal of a welding bathtub by cross magnetic field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding production], 1972, №2, ISSN 0491-6441, pp. 3–4. (in Russian)
- [2] Govorkov V.A. Elektricheskie i magnitnye polia [Electric and magnetic fields]. M. Leningrad: Pub. Gosenergoizdat [Gosenergoizdat], 1960, 464 p. (in Russian)
- [3] Zhigarev A.A., Shamaeva G.G. Elektronno-luchevye i fotoelektronnye pribory [Electron beam and photoelectronic devices]. M. Pub. Vysshaya shkola [Higher school], 1982, 463 p. (in Russian)

The Analysis of Magnetic Field of Quadripolar Magnetic System for Arc Welding

A.M. Rybachuk*, N.V. Krysko**

Bauman Moscow State Technical University

2-Baumanskaya St., 5, build. 1, Moscow, Russia 105005

** e-mail: amrybachuk@mail.ru ; ** e-mail: kryskonv@gmail.com*

Abstract – This article considers the nature of magnetic field density distribution from quadripolar magnetic system, applying to weld formation control during arc welding at nuclear power facilities is considered. Existence of concentration of tension in the transition from the main metal to a seam reduces corrosion resistance of welded connections and leads to corrosion cracking during the product work in hostile environment. In the following research measurement results of magnetic field induction are shown. Therefore magnetic field is hyperbolic in the field of burning of an arch and a zone of pro-melting of the main metal.

Keywords: arc welding, weld formation in magnetic field, quadripolar magnetic system, nuclear power facilities.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.5

**АДАПТАЦИЯ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ПО ФАЗЕ
ПРИЕМОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ
ИСКАЖЕНИЯ ФАЗЫ ВЫБОРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

© 2016 Нгуен Данг Тао

*Московский физико-технический институт
(государственный университет), Москва, Россия*

В работе рассмотрена адаптация системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов методом сравнения с эталоном, в условиях искажения фазы эталона. Для компенсации искажения фазы эталона использовано представление системы в виде искусственной нейронной сети, с последующим её обучением. Представление систем и устройств в виде искусственных нейронных сетей используют для решения различных задач. Такое представление дает возможность применения методов оптимизации параметров, использующихся в искусственных нейронных сетях, для оптимизации параметров, представляемых в виде них систем или устройств. При этом состав оптимизируемых параметров определяется выбором конфигурации искусственной нейронной сети. Показано, что при представлении системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов в виде искусственной нейронной сети с нелинейностью, соответствующей определению модуля комплексного числа, система может адаптироваться методом сравнения с эталоном в условиях искажения фазы обучающих выборок, за счет применения в качестве эталона только модуля эталонного сигнала.

Ключевые слова: система приемоизлучающих объектов, адаптация методом сравнения с эталоном, адаптивная антенная решетка, искусственная нейронная сеть.

Поступила в редакцию 10.12.2016

ВВЕДЕНИЕ

Разнообразные системы, представляющих собой объединение приемоизлучающих объектов, в настоящее время получают все большее распространение. Это как системы стационарных объектов, например сети датчиков, так и системы перемещающихся объектов, например, объединения роботов. Объединение пространственно разнесенных объектов в систему позволяет улучшить суммарные характеристики объединения по сравнению с суммарными характеристиками объектов, не связанных между собой.

Отдельный класс систем приемоизлучающих объектов представляют системы из объектов, приемопередатчики которых синхронизированы по фазе. Приемопередаточная аппаратура, установленная на каждом из объектов, имеет ограниченные возможности по излучаемой мощности и пространственной селекции в связи с требованиями минимальной массы и габаритов объекта. Синхронизация приемопередатчиков объектов по фазе при объединении объектов в систему позволяет расширить возможности приемопередаточной аппаратуры. При этом снимаются имевшиеся ранее

ограничения, связанные с энергопотреблением, массой и габаритами отдельного объекта. В результате синхронизации по фазе может быть сформирована оптимальная пространственная диаграмма направленности (ДН) приема и излучения системы. В качестве основных параметров формируемой ДН могут быть заданы направление главного максимума, соответствующее направлению прихода полезного сигнала, и направления минимумов, соответствующие направлениям прихода помех. Формирование системы приемоизлучающих объектов с оптимальными параметрами ДН, в общем случае, может осуществляться как с использованием классических методов синтеза¹, так и с использованием методов адаптивных антенн².

Перспективным направлением развития систем приемоизлучающих объектов являются системы из объектов со случайными или изменяющимися координатами объектов. Системы из случайно расположенных приемоизлучающих объектов с самостоятельными источниками питания интересны с точки зрения легкости доставки в труднодоступные районы, с использованием сброса с воздушных носителей, а системы из объектов с изменяющимися координатами соответствуют группам подвижных объектов. Для таких систем координаты объектов изначально неизвестны, поэтому оптимизация параметров ДН с использованием синтеза классическими методами и частью адаптивных методов не может применяться. Тем не менее, существует группа методов адаптации, для реализации которых не требуется информация о координатах объектов адаптивной системы (АС). Такие методы могут применяться для синтеза антенн с заданными ДН³ и пригодны для оптимизации параметров систем синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов.

В настоящей статье рассмотрена система приемоизлучающих объектов, осуществляющая адаптацию методом сравнения с эталоном, представленная в виде искусственной нейронной сети. Представление систем и устройств в виде искусственных нейронных сетей используют, например, для оптимизации параметров линий передач⁴ или антенных решеток⁵. Подобное представление позволяет, за счет выбора нужной конфигурации нейронной сети, применять критерии оптимизации, требующиеся для решения конкретных задач.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ПО ФАЗЕ ПРИЕМОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕ ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Структурная схема системы, реализующей адаптацию по критерию минимального среднеквадратического отклонения сигнала на выходе системы от заданного эталонного, показана на рисунке 1.

Сигналы от M источников излучения S , после умножения на матрицу коэффициентов распространения H поступают на входы N приемников объектов и подаются на усилители высокой частоты (УВЧ), служащие также в качестве узкополосного фильтра. На выходе УВЧ n -го приемника формируется комплексный сигнал

¹ Сазонов Д.М. Многоэлементные антенные системы. – М: Издательство «Радиотехника», 2015.

² Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-ух частях. / Под ред. В.А. Григорьева. – СПб: Университет ИТМО, 2016.

³ Хабаров А.В. Объединение антенн с неизвестными координатами в антенную решетку // Антенны. - 2006. - № 11. – С. 7–11.

⁴ Сейдл П., Тауфер И. Модель короткозамкнутой щелевой линии в виде искусственной нейронной сети// Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2009. – №5. - С. 57–61.

⁵ Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. – М: Издательство «Радиотехника», 2009.

$$x_n = \sum_{m=1}^M h_{nm}(t) S_m + \xi_n, \quad (1)$$

где ξ_n – внутренний шум в n – м приемнике,

$h_{nm}(t)$ – комплексный коэффициент передачи сигнала от m -го источника n -у приемнику, в общем случае, зависящий от времени,

S_m – комплексная огибающая m -го сигнала.

После подачи сигналов x_i на вход ДОС, на её выходе формируются выходные сигналы y_j , из которых формируется вектор Y :

$$Y = WX, \quad (2)$$

где W – матрица векторов весовых коэффициентов (ВВК),

X – вектор сигналов на выходах приемников.

Матрица ВВК в (3) состоит из набора ВВК, каждый из которых соответствует своему выходу y_j .

В вычислитель приращений на этапе обучения вводятся вектор эталонных сигналов Y_s , вектор выходных сигналов ДОС Y , Y_s и Y сравниваются, и в результате вырабатываются поправки к весовым коэффициентам ДОС.

Функционал $\Phi(W)$, минимизируемый при осуществлении адаптации по данному критерию, имеет вид

$$\Phi(W) = |Y - Y_s|^2. \quad (3)$$

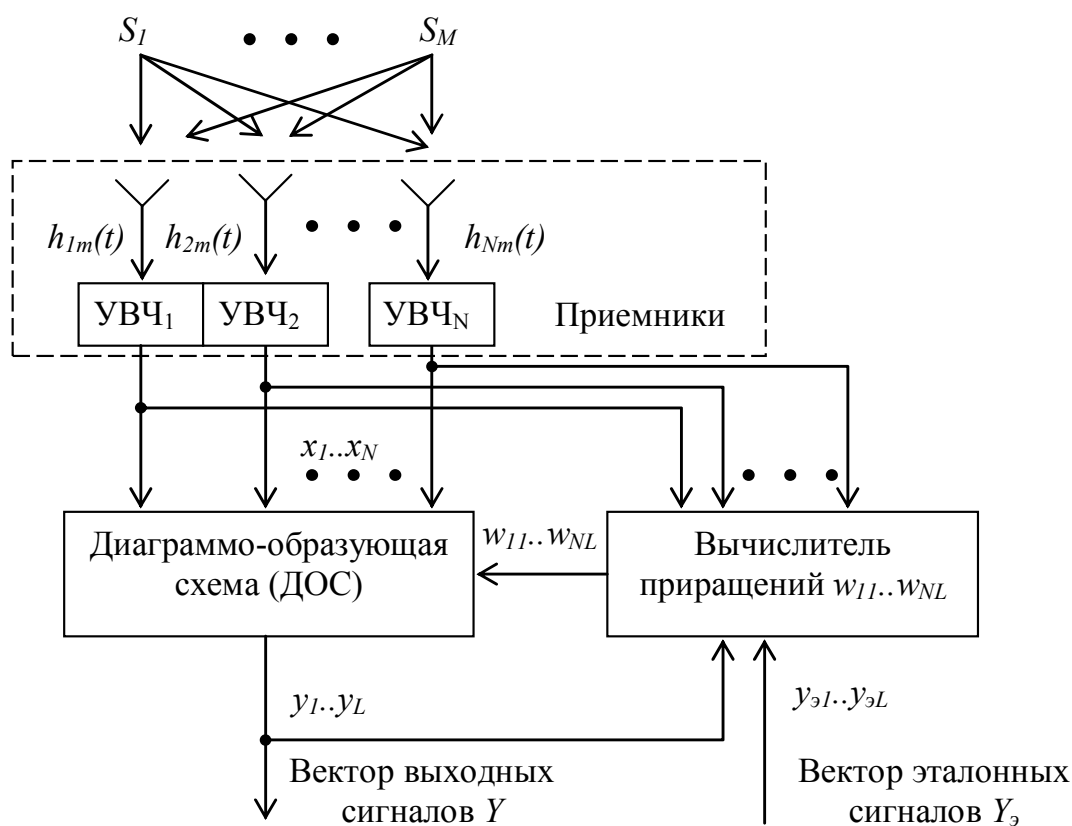


Рис. 1. – Адаптивная система с использованием критерия минимального среднеквадратического отклонения сигнала на выходе АС от заданного эталонного

Удовлетворяющая условию (3) матрица ВВК может быть найдена разными способами.

Если матрица ВВК находится градиентным методом наименьших квадратов, то подстройка ВВК проводится по следующим формулам:

$$\Delta W = 2\mu \cdot [Y_g - Y] \cdot X^* . \quad (4)$$

Подстройка ВВК проводится до достижения заданных значений ошибки рассогласования между вектором сигналов на выходе АС Y и вектором эталонных сигналов Y_g :

$$Err = \frac{1}{Nr} \cdot \sum_{n=1}^{Nr} |Y_{g,n} - Y_n|^2 , \quad (5)$$

где Nr – количество обучающих случаев.

Обучение прекращается, если весовые коэффициенты достигли значений, при которых среднеквадратическая ошибка рассогласования стала меньше заданной.

Искусственные НС представляют собой совокупности однотипных элементов (формальных нейронов), которые показаны на рисунке 2:

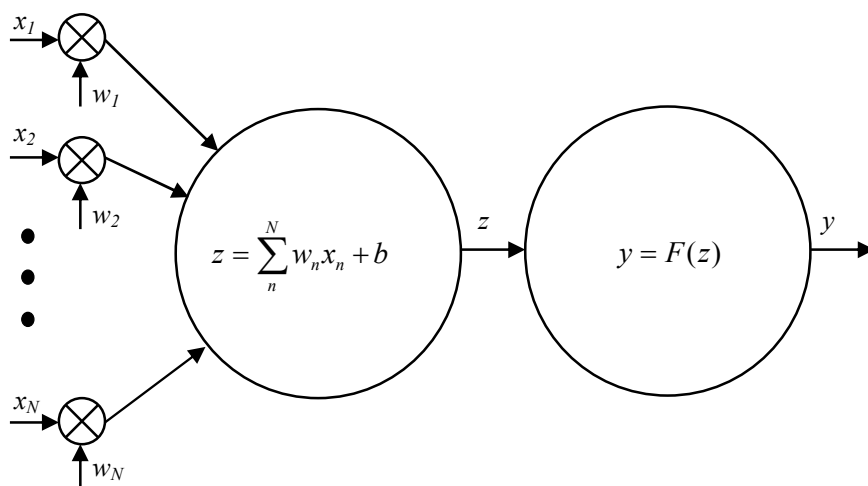


Рис. 2. – Формальный нейрон

В формальном нейроне входные воздействия $x_1 \dots x_n$ умножаются на весовые коэффициенты $w_1 \dots w_n$, после чего суммируются. К полученному значению добавляется смещение b и применяется нелинейная функция $F(z)$.

Выходное значение формального нейрона y вычисляется по формуле:

$$y = F\left(\sum_{n=1}^N w_n \cdot x_n + b\right)$$

Наиболее часто используются модели нейронов с нелинейностями в виде сигмоиды, гиперболического тангенса, пороговой функции⁶.

Модель адаптивной системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов, изображенная на рисунке 2, по структуре схожа с искусственной НС без нелинейных элементов (слоем Гроссберга). Вид нейрона слоя Гроссберга показан на рисунке 3.

Представив входные воздействия формальных нейронов, составляющих слой, и их весовые коэффициенты в виде векторов и матриц: вектор входных воздействий X умножается на матрицу из векторов весовых коэффициентов W , без учета смещения b и

⁶ Тархов Д.А. Нейросетевые модели и алгоритмы. - М: Издательство «Радиотехника», 2014.

нелинейной функции, получим выражение для выходного сигнала слоя формальных нейронов, идентичное выражению (2) $Y=WX$.

Выражения для изменения весов, при которых происходит уменьшение отклонения сигнала на выходе нейросети от заданного эталонного, можно определить, продифференцировав суммарную квадратичную ошибку по значению весов. Подставив в выражение для суммарной квадратичной ошибки разность сигнала на выходе слоя Гроссберга и эталонного сигнала:

$$E = \sum_{n=1}^{Nr} \sum_{j=1}^M (y_{jn} - y_{эjn})^2, \quad (6)$$

где Nr – число обучающих случаев,
 M – число выходов нейронной сети.

Продифференцируем суммарную ошибку по значению весов с использованием выражения для производной сложной функции и получим, что подстройка элементов w_{ij} проводится по формулам:

$$\Delta w_{ij} = -k \cdot \sum_{n=1}^{Nr} (y_{jn} - y_{эjn}) \cdot x_{in}, \quad (7)$$

где k – коэффициент пропорциональности,
 Nr – число обучающих случаев,
 y_{jn} – элементы вектора Y , который появляется на выходе сети при появлении на ее входе вектора X n -й обучающей реализации
 $y_{эjn}$ – элементы вектора Y , который должен появляться на выходе сети при появлении на ее входе вектора X n -й обучающей реализации.

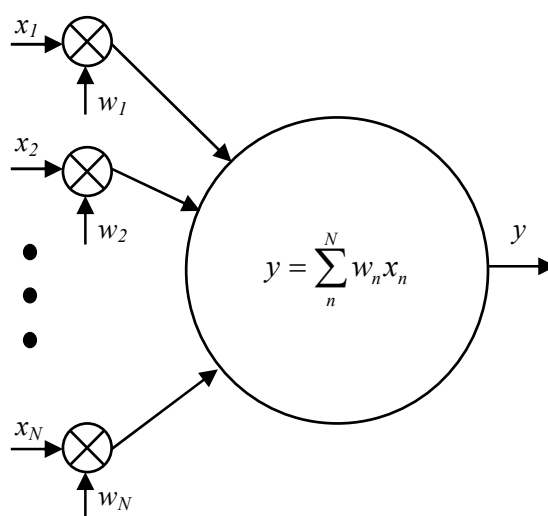


Рис. 3. – Формальный нейрон без учета смещения и нелинейной функции

Выражение (7) получено без учета комплексности входных воздействий и весовых коэффициентов. При учете комплексности сигналов и матрицы ВВК, преобразования дают выражение, аналогичное формуле (4), которая получена для адаптации АС по критерию минимального среднеквадратического отклонения сигнала на выходе АС от заданного эталонного. Вид получаемой при учете комплексности весов и входных воздействий искусственной нейронной сети показан на рисунке 5.

Элементы x_i комплексного вектора входных сигналов X первоначально взвешиваются путем умножения на элементы w_i комплексного вектора весовых коэффициентов W . Далее, действительные и мнимые части полученных произведений раздельно суммируются по формулам:

$$\begin{aligned}
 y1 &= \sum_i \operatorname{Re} x_i \cdot \operatorname{Re} w_i - \sum_i \operatorname{Im} x_i \cdot \operatorname{Im} w_i \\
 y2 &= \sum_i \operatorname{Re} x_i \cdot \operatorname{Im} w_i + \sum_i \operatorname{Im} x_i \cdot \operatorname{Re} w_i,
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

что соответствует правилам умножения и сложения комплексных чисел. Образуется две суммы взвешенных входных сигналов на выходах Нейрона 1 и Нейрона 2. Выходные сигналы нейронов первого слоя y_1 и y_2 суммируются с фиксированными реальным $w1=1$ и мнимым $w2=1i$ весовыми коэффициентами второго слоя. Полученная сумма y представляет собой комплексный выходной сигнал Нейрона 3.

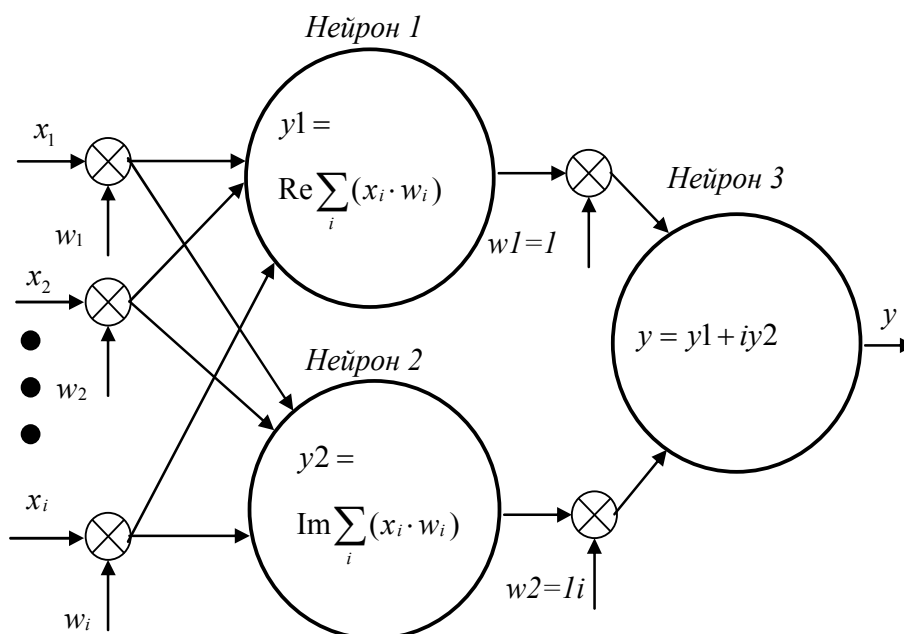


Рис. 5. — Система синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов в виде искусственной нейронной сети

Представление системы синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов в виде искусственной НС, изображенной на рис. 5 расширяет возможности оптимизации параметров системы за счет возможности формирования конфигурации НС под конкретную задачу. Выходные сигналы нейронов 1-3 могут формироваться с использованием нелинейных функций, соответствующих, например, амплитудному или фазовому детектированию и другим. Процедура подстройки весовых коэффициентов при этом может быть определена аналогично известным процедурам подстройки весовых коэффициентов в искусственных нейронных сетях с нелинейностями.

СТРУКТУРА НЕЙРОННОЙ СЕТИ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ АДАПТАЦИИ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ПО ФАЗЕ ПРИЕМОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ИСКАЖЕНИЯ ФАЗЫ ЭТАЛОННОГО СИГНАЛА

Для осуществления подстройки весовых коэффициентов по формулам вида (4), в качестве эталона необходимо задавать как амплитуду, так и фазу принимаемого полезного сигнала. Сравнение с эталоном, сформированным с использованием, как

амплитуды, так и фазы полезного сигнала, предполагает стабильность разности фаз принимаемого полезного сигнала и задающего генератора приемника во время формирования обучающей выборки, иначе обучающая выборка не будет соответствовать полезному сигналу. Фаза принимаемого полезного сигнала во время формирования обучающей выборки может изменяться в результате доплеровского сдвига принимаемого сигнала, изменения характеристик канала распространения и других факторов. Требование высокой стабильности разности фаз принимаемого полезного сигнала и задающего генератора приемника во время формирования обучающей выборки ограничивает область применения метода и снижает качество адаптации.

Для устранения этого недостатка может быть применена искусственная нейронная сеть с нелинейностью, позволяющей формировать обучающее множество только из амплитуд полезного сигнала. Нелинейность при этом должна реализовывать функцию вычисления модуля комплексного числа.

Рассмотрим структуру искусственной НС, соответствующей такому преобразованию суммы комплексных входных сигналов.

Модуль комплексного числа определяется с помощью нелинейного преобразования, по формуле:

$$|A| = \sqrt{(\operatorname{Re} A)^2 + (\operatorname{Im} A)^2}, \quad (9)$$

где A – комплексное число.

Выражение представляет собой сумму двух квадратичных нелинейностей, в которой применена нелинейность в виде квадратного корня. Исходя из этого, искусственную двухслойную НС вида рисунка 5, с целью введения в неё нелинейности, выполняющей функцию вычисления модуля комплексного числа, целесообразно преобразовать в искусственную НС вида рисунок 6.

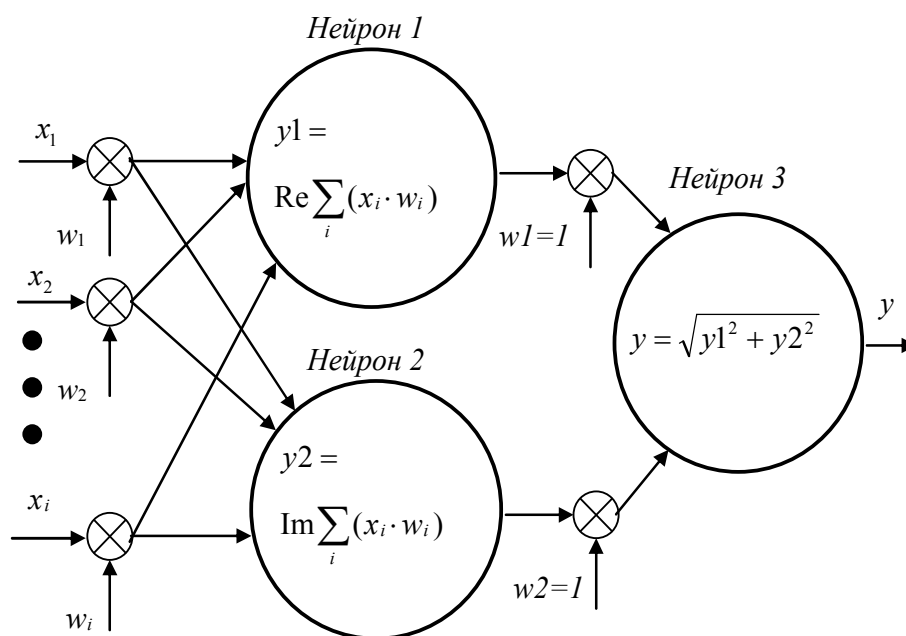


Рис. 6. – Структура искусственной НС с нелинейностью, выполняющей функцию вычисления модуля комплексного числа

Так же, как и для нейронной сети, изображенной на рисунке 5, вектор входных сигналов X взвешивается путем умножения на вектор весовых коэффициентов W ,

действительные и мнимые части полученных произведений отдельно суммируются, образуются две суммы взвешенных входных сигналов. Далее, выходные сигналы первого слоя нейронов y_1 и y_2 суммируются с фиксированными реальными весовыми коэффициентами $w_1=1$, $w_2=1$, и к полученной сумме применяется нелинейность в виде вычисления модуля комплексного числа *Нейрона 3*. Выходной сигнал y полученной искусственной НС, изображенной на рис 6, соответствует модулю выходного сигнала y искусственной НС, изображенной на рисунке 5.

МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА ОБРАТНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОШИБКИ ДЛЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ ФУНКЦИЮ ВЫЧИСЛЕНИЯ МОДУЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ЧИСЛА

В применении к задачам адаптации систем синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов, искусственную НС вида рис. 6 следует обучать с использованием обучающего множества, состоящего из комплексного вектора входных воздействий и соответствующего ему вектора модулей комплексных выходных воздействий. Искусственная НС, изображенная на рисунке 6, многослойная и составляющие её нейроны имеют нелинейности, поэтому, вывод формул для подстройки ВВК такой НС целесообразно сделать аналогично выводу формул для подстройки ВВК в методе обратного распространения ошибки⁷, с использованием частных производных по весам.

Суммарную квадратичную ошибку Err выходного сигнала НС вида рисунка 6 представим в виде:

$$Err = \sum_{n=1}^{Nr} (y_n - y_{\varepsilon n})^2, \quad (10)$$

где Nr – количество обучающих реализаций,

y – выходной сигнал НС,

y_{ε} – эталонный сигнал.

Продифференцируем суммарную квадратичную ошибку Err по изменению весовых коэффициентов w .

С учетом формулы для производной от квадрата функции

$$\frac{dErr}{dw_i} = \sum_{n=1}^{Nr} 2 \cdot (y_n - y_{\varepsilon n}) \cdot \left(\frac{d(y_n - y_{\varepsilon n})}{dw_i} \right) \quad (11)$$

Выходной сигнал 3 нейрона:

$$y = \sqrt{(y_1)^2 + (y_2)^2}$$

Производная константы равна 0:

$$\frac{dy_{\varepsilon}}{dw_i} = 0$$

Учитывая формулу производной от квадратного корня для модуля выходного сигнала и нулевую производную от эталонного сигнала, преобразуем (10):

⁷ Галушкин А.И. Синтез многослойных систем распознавания образов. – М.: «Энергия», 1974.

$$\frac{dErr}{dw_i} = \sum_{n=1}^{Nr} \frac{2 \cdot (y_n - y_{\varepsilon n}) \cdot \frac{1}{2 \cdot \sqrt{(y1_n)^2 + (y2_n)^2}} \times}{\times \frac{d((y1_n)^2 + (y2_n)^2)}{dw_i}} \quad (12)$$

Применив к (12) формулу для производной квадрата функции, получим:

$$\frac{dErr}{dw_i} = \sum_{n=1}^{Nr} \frac{2 \cdot (y_n - y_{\varepsilon n}) \cdot \frac{1}{2 \cdot y_n} \times}{\times 2 \cdot \left(\frac{d(y1_n)}{dw_i} \cdot y1_n + \frac{d(y2_n)}{dw_i} \cdot y2_n \right)} \quad (13)$$

Далее удобно рассмотреть производные $\frac{dErr}{d \operatorname{Re} w_i}$ и $\frac{dErr}{d \operatorname{Im} w_i}$ (преобразования (11) – (13) для них также корректны, это можно показать, выполнив преобразования (11) – (13) для них отдельно)

С учетом (8), получаем:

$$\begin{aligned} \frac{dErr}{d \operatorname{Re} w_i} &= \sum_{n=1}^{Nr} \times 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot (y_n - y_{\varepsilon n}) \cdot \frac{1}{2 \cdot y_n} \times}{\frac{d(\operatorname{Re} x_{in} \cdot \operatorname{Re} w_i - \operatorname{Im} x_{in} \cdot \operatorname{Im} w_i)}{d \operatorname{Re} w_i} \cdot y1_n +} \right. \\ &\quad \left. + \frac{d(\operatorname{Re} x_{ni} \cdot \operatorname{Im} w_n + \operatorname{Im} x_{ni} \cdot \operatorname{Re} w_n)}{d \operatorname{Re} w_n} \cdot y2_n \right) \\ &\quad \times \frac{2 \cdot (y_n - y_{\varepsilon n}) \cdot \frac{1}{2 \cdot y_n} \times}{\frac{d(\operatorname{Re} x_{in} \cdot \operatorname{Re} w_i - \operatorname{Im} x_{in} \cdot \operatorname{Im} w_i)}{d \operatorname{Im} w_i} \cdot y1_n +} \\ &\quad \left. + \frac{d(\operatorname{Re} x_{in} \cdot \operatorname{Im} w_i + \operatorname{Im} x_{ni} \cdot \operatorname{Re} w_i)}{d \operatorname{Im} w_i} \cdot y2_n \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Сократив выражения (14), а также введя коэффициент пропорциональности k , необходимый для осуществления итерационного процесса, получим итоговые формулы для корректировки весовых коэффициентов w_i , с использованием модуля комплексного эталонного сигнала:

$$\begin{aligned} \Delta \operatorname{Re} w_i &= -k \cdot \sum_{n=1}^{Nr} \left(\left(1 - \frac{y_{\varepsilon n}}{y_n} \right) \cdot (\operatorname{Re} x_{in} \cdot y1_n + \operatorname{Im} x_{in} \cdot y2_n) \right) \\ \Delta \operatorname{Im} w_i &= -k \cdot \sum_{n=1}^{Nr} \left(\left(1 - \frac{y_{\varepsilon n}}{y_n} \right) \cdot (\operatorname{Re} x_{in} \cdot y2_n - \operatorname{Im} x_{in} \cdot y1_n) \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, в результате представления адаптивной системы в виде нейронной сети и применив к полученной структуре методы нейронных сетей, удастся получить формулы для адаптации системы в условиях мешающих воздействий, искажающих фазу обучающих выборок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для устранения недостатков, связанных с использованием в качестве эталона полного полезного сигнала, в искусственную нейронную сеть, в виде которой представляется система синхронизированных по фазе приемоизлучающих объектов, может быть введена нелинейность, соответствующая вычислению модуля комплексного числа. Выражения для обучения полученной таким образом многослойной искусственной нейронной сети выводятся аналогично выведению формул для подстройки весовых коэффициентов в методе обратного распространения ошибки, с использованием дифференцирования по весам. В полученных в результате вывода выражениях подстройки весовых коэффициентов применяется только модуль эталонного сигнала, фаза эталонного сигнала в выражениях не используется, что позволяет проводить подстройку весовых коэффициентов в условиях искажения фазы обучающей выборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-х частях / Под ред. В.А. Григорьева. – СПб: Университет ИТМО, 2016.
2. Галушкин, А.И. Синтез многослойных систем распознавания образов [Текст] / А.И. Галушкин. – М.: «Энергия», 1974.
3. Сазонов, Д.М. Многоэлементные антенные системы [Текст] / Д.М. Сазонов. – М.: Издательство «Радиотехника», 2015. – 144 с.
4. Сейдл, П. и др. Модель короткозамкнутой щелевой линии в виде искусственной нейронной сети [Текст] / П. Сейдл, И. Тауфер // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2009. – №5. – С. 57–61.
5. Тархов, Д.А. Нейросетевые модели и алгоритмы [Текст] / Д.А. Тархов. – М.: Издательство «Радиотехника», 2014. – 355 с.
6. Татузов, А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации [Текст] / А.Л. Татузов. – М.: Издательство «Радиотехника», 2009. – 432 с.
7. Хабаров, А.В. Объединение антенн с неизвестными координатами в антенную решетку [Текст] / А.В. Хабаров // Антенны. – 2006. – №11. – С. 7–11.

REFERENCES

- [1] Adaptivnye antennnye reshetki: uchebnoe posobie v 2-kh chastyakh [Adaptive antenna array. The education guidance in 2 parts]. Edited by V.A. Grigoreva. Sankt-Peterburg: Pub. ITMO university, 2016. (in Russian)
- [2] Galushkin A.I. Sintez mnogosloynnykh sistem raspoznavaniya obrazov [Synthesis of multilayered systems of recognition of images]. M. Pub. «Energiya» [Energy], 1974. (in Russian)
- [3] Sazonov D.M. Mnogoelementnye antennnye sistemy [Multielement antenna systems]. M. Pub. «Radiotekhnika» [Radio Engineering], 2015. ISBN 978-5-93-108-093-2, 144 p. (in Russian)
- [4] Seydl P., Taufer I. Model korotkozamknutoy shchelevoiy linii v vide iskusstvennoy neyronnoy seti [Model of the short-circuited slot-hole line in the form of artificial neural network]. Neyrokompyutery: razrabotka, primeneniye [Neurocomputers: development, application]. 2009. №5. ISSN 1999-8554, pp. 57–61. (in Russian)
- [5] Tarkhov D.A. Neyrosetevye modeli i algoritmy [Neural network models and algorithms]. M. Pub. «Radiotekhnika» [Radio Engineering], 2014. ISBN 978-5-88070-376-0, 355 p. (in Russian)
- [6] Tatuzov A.L. Neyronnye seti v zadachakh radiolokatsii [Neural networks in problems of a radar-location]. M. Pub. «Radiotekhnika» [Radio Engineering], 2009, ISBN 978-5-88070-244-243-2, 432 p. (in Russian)
- [7] Khabarov A.V. Objedineniye antenn s neizvestnymi koordinatami v antennuyu reshetku [Combination of antennas with unknown coordinates in an antenna array]. Antennas [перевод], 2006, №11, ISSN 0320-9601, pp. 7–11. (in Russian)

System Adaptation of the Accepting and Radiating Objects Synchronized on the Phase in the Conditions of Selection Phase Distortion Using of Artificial Neural Networks

Nguyen Dang Thao

*Moscow Institute of physics and technology
(State University)*

*Institutsky pereulok, 9, Doloprudy, Moscow region, Russia 141701
info@mipt.ru*

Abstract – The paper discusses the adaptation of the system synchronized on the phase of the accepting and radiating objects by comparison with the reference signal in terms of phase distortion of the reference signal. Representation of system in the form of artificial neural network, with the subsequent training, is used for compensation of distortion of standard phase. Representation of systems and devices in the form of artificial neural networks is used for the solution of various tasks. Such representation enables the application of optimization methods of parameters used in artificial neural networks for parameter optimization are presented in the form of systems or devices. The composition of the optimized parameters is determined by selecting the configuration of the artificial neural network. It is shown that the system can adapt by method of comparison with a standard in the conditions of phase distortion of the training selections, due to application as a standard only of the module of a reference signal at representation of system of the accepting and radiating objects synchronized on a phase in the form of artificial neural network with the nonlinearity corresponding to complex number module definition.

Keywords: system of the accepting and radiating objects, adaptation by last mean square, adaptive array, artificial neural network.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК: 621.791.754.4

**МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ФЛЮСА И ФОРМИРУЮЩИХ
ПОДКЛАДОВ НА СТРУКТУРУ КОРНЕВОГО ШВА ПРИ
ОДНОСТОРОННЕЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ**

© 2016 г. Ю.В. Доронин*, А.Ю. Доронин**

* ООО «Аттестационный центр городского хозяйства» (АЦГХ), Москва, Россия

** Государственный научный центр «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия

Электродуговая сварка борсодержащих сталей в изделиях ответственного назначения сопряжена, как известно, с серьёзными затруднениями, вызванными красноломкостью основного металла. Разработан приемлемый вариант автоматической сварки для ферритной хромистой коррозионностойкой низкоуглеродистой стали 04X14T3P1Ф-Ш (ЧС-82Ш) под керамическим флюсом с применением подкладной ленты марки ЛФС. Сталь применяется в качестве нейтронопоглощающего материала для изготовления в бассейнах выдержки стеллажей хранения облучённого ядерного топлива (ОЯТ) с содержанием урана U-235 < 5%. Показано, что в металле шва хорошо сочетаются структурный и фазовый составы матрицы и неметаллических включений, соотношения титан-бор и титан-бор-хром более благоприятны, чем для основного металла, за счёт применения керамического флюса. Применение подкладных материалов, по-видимому, позволило снизить напряжённость сварного узла и избежать трещинообразования в процессе сварки.

Ключевые слова: борсодержащая нейтронопоглощающая сталь, автоматическая сварка под флюсом, подкладная лента, керамический флюс, боридная эвтектика, шлаковая система.

Поступила в редакцию 15.12.2016

При односторонней дуговой сварке плавящимся электродом принудительное формирование корня шва обеспечивается флюсовыми подушками, флюсо-медными и керамическими подкладками, гибкими флюсовыми лентами. При сварке на весу корневой шов успешно формируется с помощью специальных программ процессов STT, Wise Root, Steel Root и др.

Известны работы, выполненные в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством А.М.Рыбачука по воздействию магнитных полей на форму корневого шва, способных создать практически идеальный обратный валик на толщинах до 8 мм, при сварке неплавящимся электродом.

Положительных результатов при сварке корневых швов кольцевых стыков трубопроводов металлопорошковой проволокой достигли авторы [1]. Уникальная шлаковая система обмазки электрода LB-52U обеспечивает качественный обратный валик при ручной дуговой сварке. Ответственными за геометрические параметры обратного валика шва внутри шлаковой системы являются физические (Тпл. и Ттв.) и физико-химические (вязкость, поверхностное и межфазное натяжения) свойства расплавленного шлака. Подробно влияние физико-химических свойств в сварочных процессах применительно к формированию корня шва освещено в работах [2, 3].

Однако, по-прежнему, неблагоприятная структура металла корня шва является одной из основных причин возникновения дефектов при односторонней дуговой сварке. И если шов не легируется рядом элементов через металлопорошковую проволоку, то, как правило, либо насыщен газами (STT-процесс), либо имеет крупнозернистую структуру после сварки на керамических подкладках или пересыщен шлаковыми включениями в случае использования формирующих корень флюсов, имеющих низкую температуру плавления.

В настоящее время отсутствуют исследования по оценке возможного влияния подкладных устройств или сварочной оснастки на формирование и структуру корня шва изделий ответственного назначения. Не исследована возможность получения мелкозернистой структуры за счет тепломассопереноса в корневой части шва и за счет протекания металлургических реакций восстановления за счёт вводимых в корень шва легирующих элементов. Это особенно актуально при оценке металлургической свариваемости коррозионностойких сталей ферритного класса из-за возможного появления дефектов и снижения механических свойств сварных соединений.

Как известно, для изготовления стеллажей хранения облучённого ядерного топлива (ОЯТ) бассейнов выдержки применяются стали с высоким содержанием бора. При содержании в ОЯТ урана $U-235 < 5\%$ в качестве поглотителя нейтронов применяется ферритная хромистая коррозионностойкая низкоуглеродистая сталь 04X14T3P1Ф-Ш (ЧС-82Ш). В качестве нейтронопоглощающего легирующего элемента (а не микропримеси) выступает бор с марочным весовым содержанием 1,0...2,0%.

В процессе исследования и создания варианта односторонней сварки чехлов стеллажей из этой стали были проверены ряд технологий электродуговой сварки

– в активных и инертных газах, под флюсом, плазменная сварка, ручная дуговая сварка.

Положительные результаты были получены только при сварке под флюсом с применением подкладной ленты марки ЛФС [4]. В этом случае в сварных соединениях не были обнаружены внутренние и поверхностные трещины, а структура металла шва была мелкозернистой без признаков внутренних дефектов с удовлетворительным формированием корня шва.

Автоматическая сварка контрольных сварных соединений выполнялась под керамическим флюсом в сочетании с проволоками Св-03X19H60M15 и Св-01X12H2 (ЭП792-ВИ). Химический состав основного металла и применявшихся сварочных проволок приведен в таблице 1.

Таблица 1. – Химический состав применяемых материалов

Материал	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	B	V	S	P
Сталь 04X14T3P1Ф-Ш	0.028	0.37	0.27	14.35	0.25	2.9	1.5	0.23	0.005	0.009
Сварочная проволока Эп-792-ВИ	0.004	0.32	0.60	12.82	2.06	-	-	-	0.007	0.008
Сварочная проволока Св-03X19H60M15	0.010	0.11	1.49	19.25	осно -ва	0.07	Mo		0.002	0.006
							14.57			

Проволока марки Св-01Х12Н2 (ЭП792-ВИ) должна обеспечить состав металла шва близкий к основному металлу, а проволока Св-03Х19Н60М15 состав металла сварного шва, позволяющий обеспечить его более высокую пластичность. Необходимо отметить, что металл сварного шва, выполненный сварочной проволокой марки Св-03Х19Н60М15 имеет ориентированную дендритную структуру, рис. 1, в то время как структура металла сварного шва, полученного с использованием проволоки марки и ЭП792-ВИ более фрагментирована на крупные структурные элементы. Зона термического влияния при сварке с использованием проволоки марки ЭП792-ВИ более протяжённая, что может быть вызвано повышенным тепловложением при использовании указанной проволоки. В целом структура металла шва имеет более предпочтительный характер по сравнению с основным металлом, особенно, зоной сплавления, рисунок 2.



Рис. 1. – Микроструктура металла сварного шва, сталь 04Х14ТЗР1Ф-Ш.
Сварочные материалы – проволока Св-03Х19Н60М15 + керамический флюс

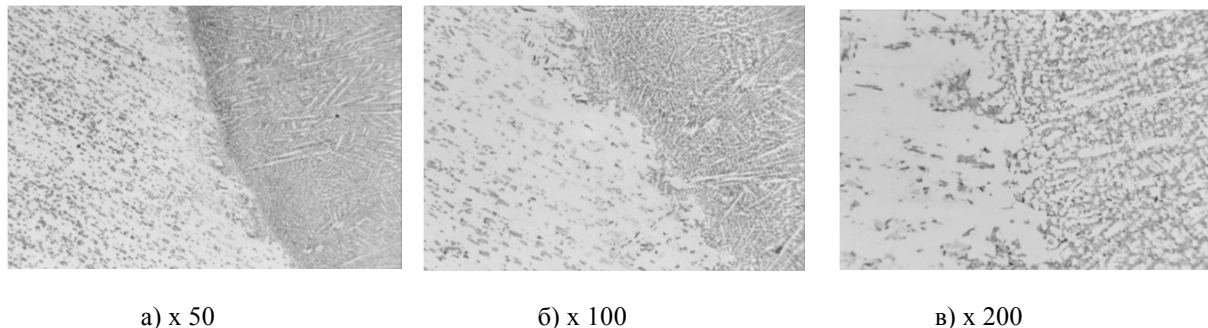


Рис. 2. – Микроструктура металла околошовной зоны, сталь 04Х14ТЗР1Ф-Ш.
Сварочные материалы – проволока Св-03Х19Н60М15 + керамический флюс

Анализ литературных данных показывает, что увеличение содержания бора больше 0,003...0,007 вес.% [5] однозначно приводит к ухудшению металлургической и тепловой свариваемости любой борсодержащей стали. Более высокое содержание бора ведёт к красноломкости, вследствие образования легкоплавкой феррито-боридной эвтектики – (δ – феррит + $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$), что и является основной причиной затруднений при сварке, особенно, электродуговой. Кроме того, как в основном, рисунок 3, так и в наплавленном металле образуются хрупкие неметаллические включения типа железохромистых боридов $(\text{Fe,Cr})_2\text{B}$, с титаном – $(\text{Ti, Cr})_2\text{B}$ и диборидов TiB_2 , существенно снижающих пластичность, вязкость и трещиностойкость обогащенного хромом матричного δ - феррита в условиях термомеханического цикла сварки (ТДМС).

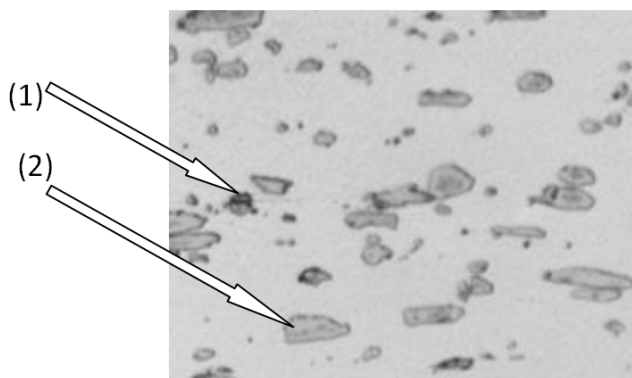


Рис. 3. – Неметаллические включения в основном металле;
(1) – с титаном типа TiB_2 и $(Ti, Cr)_2B$; (2) – типа $(Fe, Cr)_2B$

В работе [6] показано, что для достижения приемлемой пластичности литого и горячекатаного металла нейтронпоглощающих сталей соотношение Ti/B должно быть не менее 2,7. В этом случае происходит измельчение зерна, уменьшение размеров боридов и образование вместо охрупченных боридов $(Fe, Cr)_2B$ более благоприятных неметаллических включений, содержащих титан и ванадий. По этой причине критически важно иметь общее содержание бора в металле шва в пределах марочного состава стали при указанном соотношении Ti/B . В российских разработках это соотношение рекомендовано в пределах 1,7...2,05 [7], что вероятно, не достаточно для полного исключения появления боридных эвтектик. При этом на металл шва накладывается обязательное условие равномерности распределения бора по всему сечению металла шва и зоны сплавления по условию сохранения коэффициента подкритичности $K_{эфф}$ защитной конструкции не менее заданного уровня 0,95, что обеспечивает требуемый уровень ядерной безопасности стеллажей.

Равномерность распределения бора гарантируется его достаточно полным исключением из эвтектической кристаллизации, что достигается при соотношении титан-бор-хром $(Cr - 5(B - Ti/2)) \geq 14,0$. Ti , обладая большим химическим сродством, образует с бором борид титана TiB_2 , температура плавления которого составляет $2800^\circ C$, тем самым выводя его из зоны эвтектической реакции. Кроме того, титан, образуя бориды, а также карбиды и нитриды, способствует сохранению хрома в металлической матрице, тем самым обеспечивая заявленные коррозионные характеристики стали.

Ввиду отсутствия в сварочных проволоках легирование металла шва бором осуществлялось за счет флюса, к которому предъявляются следующие основные требования:

- флюс должен обладать низкой химической активностью по отношению к металлу сварного шва – не более 0,25-0,35 – для предотвращения выгорания легирующих элементов;

- шлаковая система флюса для сварки должна обеспечивать хорошее формирование наплавленного металла, самопроизвольную отделимость шлаковой корки, плавное сплавление валика с поверхностью свариваемого металла при односторонней сварке без разделки кромок, предотвращающее образование подрезов и других дефектов;

- приемлемое формирование обратной стороны сварного шва как при сварке на флюсовой подушке, так и при сварке на специальных подкладках;

Опыт отечественных и зарубежных разработчиков керамических флюсов, показал, что химическая активность оксидов TiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , существенно ниже по

сравнению с SiO_2 , поэтому для сварки под флюсом высокохромистых сталей наиболее предпочтительны следующие шлаковые системы:

- $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$;
- $\text{MgO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$;
- $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-SiO}_2$;
- $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$.

Следует отметить, что флюс, используемый, для односторонней сварки, должен обеспечивать повышенную глубину проплавления, что достигается, в основном, за счет физико-химических свойств шлаковой системы. В результате проведенных исследований установлено, что наилучшими сварочно-технологическими характеристиками обладают сварочные флюсы на базе шлаковой системы $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. В связи с изложенным, дальнейшие исследования по разработке технологии автоматической сварки стали марки 04X14T3P1Ф-Ш (ЧС-82Ш) проводились с использованием керамического флюса на основе $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Амфотерный Al_2O_3 , частично замещающий оксид кремния, обладая комплексобразующими свойствами и, в то же время, менее химически активен, по сравнению с SiO_2 .

Контроль сварки рентгеновским просвечиванием подтвердил высокое качество стыковых соединений при односторонней сварке стали 04X14T3P1Ф-Ш (ЧС-82Ш), выполненных как на «флюсовой подушке», так и с применением керамических подкладных лент. Односторонняя сварка с использованием керамического флюса показала практически полное отсутствие дефектов. В сварном шве не обнаружены шлаковые включения, поры, трещины. На рентгеновских снимках, рисунок 4, выявлены только технологические дефекты, а именно: неполное проплавление, что связано с отступлением от оптимальных режимов сварки [4].

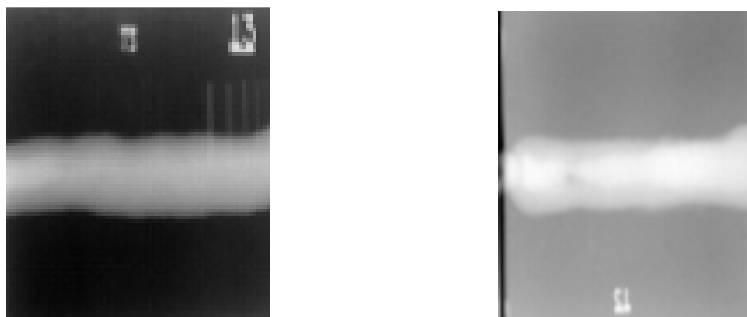
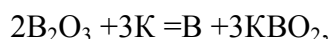


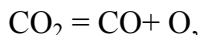
Рис. 4. – Рентгенограммы сварных соединений

Одновременно, исследовалась возможность переноса бора в металл шва из шлака формирующего слоя подкладной ленты, имеющей в своём составе до 10% оксида бора B_2O_3 , кроме оксидов Al, Si и других металлов. Эксперименты проводились на образцах из стали 09Г2 при ручной дуговой сварке корневых швов трубопроводов с использованием гибких лент марки ЛФС и на весу. Сравнительный анализ показал, что в корневом шве имеется до 0,01..0,003% бора, что существенного влияния на микроструктуру металла корневого шва не оказало. По всей видимости, восстановление бора и попадание его в шов из оксидов расплавленного шлака ленты шло по реакции:



где калий в виде оксида имеется в составе формирующего слоя подкладки, либо по реакции между оксидом бора и CO, образовавшегося в результате возгонки

замасливателя – парафина, покрывающего нити стекловолоконной ленты, либо из защитного газа CO₂ в результате разложения под действием температуры сварочной дуги или сварочной ванны по реакции:



что, однако, не исключает, что в дальнейших исследованиях легирование шва через подкладку вполне допустимо.

ВЫВОДЫ

1) При односторонней сварке под флюсом хромистой коррозионно-стойкой нейтронопоглощающей стали ферритного класса 04X14T3P1Ф-Ш (ЧС-82Ш) с содержанием бора в пределах 1,0...2,0%, легирование металла шва осуществляется за счет ферробора, введенного в состав керамического флюса.

2) Разработанный вариант односторонней автоматической сварки чехлов стеллажей хранения (ОЯТ) бассейнов выдержки обеспечивает приемлемую технологическую свариваемость при условии применения «флюсовой подушки» и керамических подкладных лент для заданных сочетаний сварочных материалов.

3) При АСФ в металле шва удачно сочетаются структурный и фазовый состав матрицы и неметаллических включений, соотношения титан-бор и титан-бор-хром более благоприятны, чем для основного металла, за счёт применения керамического флюса.

4) Применение подкладных материалов, по-видимому, позволило снизить напряжённость сварного узла и избежать трещинообразования в процессе сварки.

5) Гибкие подкладные ленты марки ЛФС алюмо-боро-силикатного состава с содержанием B₂O₃ ≥ 5% в процессе активного теплового воздействия со стороны расплавленного металла сварочной ванны влияния на химический состав металл шва не оказывают.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорошенко, Ф.Е. и др. Технологические особенности выполнения различных слоев шва при автоматической сварке трубопроводов [Текст] / Ф.Е. Дорошенко и др. // Сварка и диагностика. – 2014. – №6. – С. 45–49.
2. Доронин, Ю.В. Разработка теоретических основ формирования обратной стороны шва с учетом физико-химических процессов в сварочной ванне и создание новых сварочных материалов для односторонней дуговой сварки плавящимся электродом: дисс. доктора техн. наук [Текст] Ю.В. Доронин. – М., 2010. – 352 с.
3. Березовский, В.М. Оптимизация формы шва при непрерывном проплавлении без подкладки [Текст] / В.М. Березовский // Сварочное производство. – 1988. – №3. – С. 29–31.
4. Волобуев, Ю.С. и др. Оптимизация технологии односторонней сварки опытных образцов сталей аустенитно-ферритного класса с использованием керамического флюса ФКБ-4 [Текст] / Ю.С. Волобуев, Ю.В. Доронин, А.Ю. Доронин // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – №1. – С. 40–53.
5. Гудремон, Э. Специальные стали. Т. I, II: Пер. с нем. – М.: Металлургиздат, 1959. – 1638 с.
6. He L., Liu Y., Li J., Li B. Materials and Design, 2012, Vol. 36, pp. 88 – 93.
7. Патент №2434969. Россия. Коррозионно-стойкая сталь с повышенной нейтронной поглощаемостью. [Текст] / В.С. Дуб, А.В. Дуб и др. – №2011110286/02; заяв. 18.03.11; опуб. 27.11.11, Бюл. №33. – 6 с.

REFERENCES

- [1] Doroshenko F.E. etc. Tekhnologicheskie osobennosti vypolneniia razlichnykh sloev shva pri avtomaticheskoi svarke truboprovodov [Technological features of performance of seam various layers during automatic welding of pipelines]. Svarka i diagnostika [Welding and Diagnostics], 2014, №6, ISSN 2071-5234, pp. 45–49. (in Russian)

- [2] Doronin Yu.V. Razrabotka teoreticheskikh osnov formirovaniia obratnoi storony shva s uchetom fiziko-khimicheskikh protsessov v svarochnoi vanne i sozdanie novykh svarochnykh materialov dlia odносторонnei dugovoi svarki plaviashchimsia elektrodom [Development of theoretical bases of seam reverse side formation taking into account physical and chemical processes in a welding bathtub and creation of new welding materials for unilateral arc welding by the melting electrode]: dissertatsiia na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Doctor of Technical sciences thesis]. M. 2010. 352 p. (in Russian)
- [3] Berezovskii V.M. Optimizatsiia formy shva pri nepreryvnom proplavlenii bez podkladki [Optimization of a form of a seam at unlined continuous pro-melting]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Fabrication], 1988, №3. ISSN 0491-6441, pp. 29–31. (in Russian)
- [4] Volobuev Yu.S., Doronin Iu.V., Doronin A.Yu. Optimizatsiia tekhnologii odносторонnei svarki opytnykh obraztsov stalei austenitno-ferritnogo klassa s ispolzovaniem keramicheskogo fliusa FKB-4 [Optimization of unilateral welding technology of prototypes of austenitic and ferritic class steel with use of ceramic gumboil of FKB-4]. Globalnaia iadernaia bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, №1, ISSN 2304-414X, pp. 40–53. (in Russian)
- [5] Gudremont E. Spetsialnye stali [Special rolled steel bar]. Vol. I, II: Perevod s nemetskogo [Translated from German]. M. Pub. Metallurgizdat [Metallurgizdat], 1959. 1638 p. (in Russian)
- [6] He L., Liu Y., Li J., Li B. Materials and Design, 2012, Vol. 36, pp. 88–93. (in English)
- [7] Dub V.S., Dub A.V. etc. Patent №2434969. Rossiia. Korrozionno-stoikaia stal s povyshennoi neitronnoi pogloshchaemosti. №2011110286/02; zaiavka 18.03.11; opublikovano 27.11.11, Biulleten №33 [Patent № 2434969. Russia. Stainless steel with the increased neutron absorptivity. application 18.03.11; it is published 27.11.11, Bulletin №33]. 6 p. (in Russian)

Metallurgical, Physical and Chemical Features of Influence of Gumboil and Forming Linings on the Root Seam Structure at Unilateral Arc Welding

Yu.V. Doronin *, A.Yu. Doronin**

* LTD «Certification Center of municipal services», 47A Izmajlovskoe St.(schosse),
Moscow, Russia 105187

** State Research Centre “CNIITMASH”,
Sharikopodshipnikovaya St., 4, Moscow, Russia 115088
e-mail: doronin-45@mail.ru

Abstract – Arc welding boron-containing steel is accompanied by the serious difficulties caused by metal red-short. The acceptable option of automatic welding is developed for ferritic chromic stainless low-carbon steel 04H14T3R1F-Sh (ChS-82Sh) under ceramic gumboil with the use of LFS lining tape. Steel is applied as neutron-absorbing material for production in cooling ponds storage racks of the irradiated nuclear fuel (INF) with the content of uranium U-235 < 5%. It is shown that in metal of a seam structural and phase structures of a matrix and nonmetallic inclusions are well combined, ratios titanium-boron and titanium-boron-chrome are more favorable than for the main metal due to application of ceramic gumboil. Use of lining materials has allowed to reduce tension of welded knot and to avoid formation of cracks during the welding.

Keywords: boron-containing neutron-absorbing steel, automatic welding under gumboil, lining tape, ceramic gumboil, boron eutectic, slag system.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.53: 620.179.118 (075)

**МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
И КОНТРОЛЯ РЕАКТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

© 2016 В.И. Сурин, З.С. Волкова, Р.А. Денисов, В.Д. Мотовилин, Н.В. Рейн

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Москва, Россия*

Диагностика реакторного оборудования, находящегося в эксплуатации в течение длительного времени, показывает, что процесс образования опасных макроскопических дефектов, таких как, круговые или продольные трещины, носит стадийный характер. Распределение трещин по размерам или глубине залегания в силовых элементах конструкций (кронштейны, каркасы, основания, опоры и др.) определяется методами неразрушающего контроля, такими как рентгеновский, ультразвуковой, вихретоковый, которые позволяют уверенно диагностировать объемные трещины с размерами от нескольких десятых миллиметров на глубине залегания нескольких миллиметров.

В настоящее время задача выявления коррозионных трещин на ранней стадии образования и определение причин их возникновения является актуальной. Например, для реакторов типа ВВЭР-1000 коррозионное растрескивание имеет место в узле приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора (зона сварного соединения №111). Как известно, причиной растрескивания являются отложения соединений железа и меди в виде шлама, который со временем накапливается в карманах узла приварки.

Цель работы – продемонстрировать достижения электрофизической диагностики и неразрушающего контроля и перспективы применения разработанного метода в условиях работы реакторного оборудования.

Ключевые слова: электрофизическая диагностика, неразрушающий контроль, сканирующая контактная потенциометрия, математическая модель для построения профиля поверхности, АЭС.

Поступила в редакцию 10.12.2016

Применение вышеперечисленных методов неразрушающего контроля на действующем реакторном оборудовании представляет собой сложную задачу. В частности, трудности контроля сварного шва ультразвуковым методом связаны с тем, что образующиеся трещины характеризуются высокой степенью ветвления и большой протяженностью, а также имеют незначительное раскрытие, около 5-10 мкм [1].

Электрофизический неразрушающий контроль дает возможность получить информацию о начальных стадиях зарождения и развития трещин в рабочих условиях. Нами получены результаты по радиационной стойкости ядерного топлива на ранней стадии облучения, когда хрупкое разрушение образцов происходило при малоцикловых усталостных испытаниях [2,3].

Одно из главных преимуществ электрофизического контроля заключается в том, что датчики, имеющие малые линейные размеры (порядка нескольких миллиметров), могут быть размещены, практически, в любом труднодоступном месте. Они также могут быть размещены непосредственно на тех участках технологического оборудования, которые необходимо проконтролировать или, например, там, где ожидается появление трещины с высокой вероятностью. В основе электрофизической диагностики и контроля лежит метод сканирующей контактной потенциометрии (СКП) [4-7]. Датчики могут быть установлены равномерно на поверхности с заданной

линейной плотностью или произвольным образом, в количестве от нескольких единиц до нескольких десятков. Высокая надежность работы измерительной системы позволяют вести непрерывный мониторинг за выделенным участком объекта контроля, в том числе на сварных швах стыковых соединений, на оборудовании, находящемся в рабочих помещениях с повышенным радиационным фоном и в других особых случаях.

Приборы электрофизической диагностики и контроля могут найти широкое применение на атомных станциях. Как показывает опыт внедрения, высокий интерес к ним проявляется и в других отраслях промышленности.

ОСНОВЫ СКАНИРУЮЩЕЙ КОНТАКТНОЙ ПОТЕНЦИОМЕТРИИ

Электрические свойства образующегося контакта зависят от качества обработки и чистоты поверхностей, особенностей электронной структуры металлов и ряда других факторов, что позволяет использовать электрический контакт в качестве чувствительного элемента, который преобразует внешнее воздействие в электрические сигналы.

Взаимодействие электрофизического преобразователя с поверхностью описывается статистическими законами. Как известно, в зависимости от шероховатости поверхностей и приложенной нагрузки размер пятен реального контакта составляет от 0,1 до 10-40 мкм. На этих пятнах возникают давления, достигающие 10-20% от теоретической прочности материала. С увеличением нагрузки рост площади реального контакта происходит в основном за счет увеличения числа пятен при незначительном возрастании их размеров. При использовании метода сканирующей контактной потенциометрии одним из основных вопросов является вопрос о состоянии поверхности контакта.

Площадь реального контакта составляет от 10^{-4} до 10^{-1} номинальной площади касания S_0 и даже при больших нагрузках не превышает 40%. Для пары металлов с различной твердостью площадь фактического контакта определяется свойствами более мягкого металла и геометрией поверхности твердого [8,9].

Современная теория механики контактов твердых тел справедлива при условии выполнения неравенства $S \ll S_0$, где S – площадь поверхности реального контакта. В основе большого числа работ по механике контактов твердых тел лежит приближение «грубой» поверхности со случайным распределением неровностей в виде сферических или эллиптических выступов, для которых справедлива контактная теория Герца. В некоторых случаях можно пренебречь упругим контактным взаимодействием неровностей в зоне контакта, если среднее расстояние между соседними контактирующими областями поверхностей достаточно велико.

В разработанных нами измерительных методиках принимается малым значение нормальной силы (силы поджатия преобразователя), при которой площадь реального контакта намного меньше площади номинального контакта.

Площадь поверхности реального контакта S может возрастать как при увеличении силы поджатия F , так и при возникновении волн упругой и пластической деформации, возникающих на поверхности деформированного металла. Деформационные волны, воздействуя на чувствительный элемент преобразователя, приводят к изменению его показаний.

Пластическая деформация материалов локализуется в поверхностных слоях деформируемого изделия в виде отдельных очагов с различной степенью ее проявления. Начальные стадии характеризуются одиночными линиями скольжения, переходящими в плотный набор параллельных линий (пачек скольжения). При увеличении деформации на поверхности образуются полосы скольжения, характерные для микроструктуры объема, а также волны поверхностной деформации, что

проявляется в целом как деформационная активность поверхности материалов. Это приводит к изменению свойств поверхности: механических, оптических и электрических. Деформационная активность поверхности связана с процессом течения в приповерхностных слоях, даже если прикладываемое напряжение значительно меньше предела текучести, вследствие наличия на поверхности концентраторов напряжений технологического происхождения [10]. Для исследования деформационной активности поверхности нами разработаны несколько математических моделей.

Рассмотрим взаимодействие грубой поверхности с плоскостью. Представим образующиеся на поверхности неровности как совокупность сфер радиуса R . Предположим, что функция высоты неровностей подчиняется закону нормального распределения. Предположим также, что можно пренебречь упругим взаимодействием неровностей в области контакта. На основе контактной теории Герца получены следующие характеристики [11,12]:

- нормализованная площадь контакта:

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \pi n_0 R \int_{d_z}^{\infty} (h - d_z) p(h) dh, \quad (1)$$

- число контактирующих выступов на единице номинальной площади:

$$\frac{N}{S_0} = n_0 \int_{d_z}^{\infty} p(h) dh, \quad (2)$$

- величину прижимающего напряжения:

$$\sigma_{cl} = \frac{F}{S_0} = \frac{4E}{3(1-\nu^2)} n_0 \int_{d_z}^{\infty} (h - d_z)^{\frac{3}{2}} R^{\frac{1}{2}} p(h) dh, \quad (3)$$

где $d_p = (h - d_z)$; n_0 – число выступов на единичной площади;

h – высота неровностей;

d_z – величина зазора между взаимодействующими поверхностями;

$p(h)$ – плотность вероятности распределения выступов на поверхности;

E – модуль Юнга;

ν – коэффициент Пуассона.

В одномерном случае амплитуды волновых векторов волнистости и шероховатости изменяются в узкой области значений вблизи q_m , а «решеточная постоянная» $\lambda_m = 2\pi/q_m$. В этом случае теория Гринвуда-Вильямсона дает оценку n_0 [12]:

$$n_0 \approx 0.029 q_m^2, \quad (4)$$

и радиуса сфер неровностей:

$$R \approx \frac{1}{\sqrt{2} q_m^2 \sigma}, \quad (5)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение параметра шероховатости.

Для постановки диагнозов при диагностировании развивающихся поверхностных дефектов, а также зарождающихся приповерхностных трещин, нами разработано программное обеспечение.

Очевидно, что распределение шероховатости на площадке пятна контакта h_i в каждый конкретный момент времени t_i различно, поскольку под нагрузкой в материале непрерывно протекают деформационные процессы.

Для определения шероховатости с помощью диагностического сигнала будем использовать полученную нами эмпирическую зависимость, связывающую

интегральные значения диагностического сигнала $\Delta\varphi_i$ (на площадке пятна контакта) и h_i [13]:

$$\Delta\varphi_i = \frac{eh_i}{\varepsilon_r\varepsilon_0} \int_0^L \delta n(z) dz, \quad (6)$$

где e – заряд электрона,

ε_0 – электрическая постоянная,

ε_r – диэлектрическая проницаемость среды,

L – предел интегрирования, обычно имеет порядок $\sim 10^{-9}$ м [14].

Под интегралом в (6) стоит функция изменения электронной плотности $\delta n(z)$ от координаты, где ось z перпендикулярна поверхности контакта. Функция $\delta n(z)$ характеризует изменение плотности электронов (в общем случае носителей заряда) в зазоре, который представляет собой пространство между взаимодействующими поверхностями. Для определения количества пятен контакта используются экспериментальные методы и расчетные оценки.

Согласно (6) в любой момент времени можно определить значение шероховатости, соответствующее значению диагностического сигнала, и построить ее зависимость от времени для любого выбранного места контакта на исследуемой поверхности. Диагностический сигнал разности электрических потенциалов представляет собой интегральное значение по числу образующихся пятен контакта. Для металлов и сплавов возникающий электрический контакт обеспечивает прохождение электрического тока через поверхность контакта. При этом образуются взаимодействующие поверхности, являющиеся эффективными барьерами для электронов проводимости. Между атомами этих поверхностей возникают силы, приводящие к коррелированным изменениям их электронных оболочек, и зависящие от величины зазора между поверхностями. Для получения зависимости между электрическими характеристиками и шероховатостью необходимо решить проблему перехода границы электронами на высоком структурном уровне [14].

Волны упругой и пластической деформации изменяют поверхностный рельеф (динамическая волнистость и шероховатость), что влияет на двойной электрический слой, локальную электронную плотность и распределение электрического потенциала на поверхности. Вследствие малой энергии образующихся механических волн, полезный сигнал имеет малую амплитуду и экранируется шумовой составляющей. С целью уменьшения влияния данной составляющей применяются программы обработки сигналов (рисунок 1). В ряде случаев используется двойная фильтрация сигнала, однако при этом может быть утеряна и часть полезной информации. На рисунке 1 видно влияние стадий последовательного нагружения образца на характер изменения амплитуды диагностического сигнала (АДС).

Дифференциальная разность электрических потенциалов возникает в замкнутой электрической цепи, содержащей два или более электрофизических преобразователя. При использовании метода *СКП* появляется возможность исследовать локальные поверхностные явления и изменения морфологии поверхностного слоя путем механического сканирования всей исследуемой поверхности.

Информативными параметрами диагностического сигнала являются: амплитуда, длительность, время появления отдельных гармоник, условная мощность электрического сигнала и некоторые другие параметры. Электрические сигналы характеризуются спектральной плотностью, амплитудным, временным и амплитудно-временным распределением, а также средним значением и дисперсией. Указанные параметры связаны с порождающими их физическими процессами и содержат информацию о них или же о состоянии объекта контроля.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЛНИСТОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТОПЛИВНОГО СЕРДЕЧНИКА ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ

Рассмотрим вопрос об определении шероховатости поверхности и оценки локальной (точечной) деформации топливного сердечника с помощью экспериментально-расчетного метода. Оценка проведена с целью получения критической величины зазора между топливом и оболочкой в условиях распухания и радиационной ползучести. Для этого были использованы результаты внутриреакторных испытаний карбонитридного ядерного топлива на реакторе ИРТ МИФИ [15,16]. В указанных работах впервые были продемонстрированы возможности применения метода *СКП* во внутриреакторных условиях.

Методика проведения измерений и требования к выбору электрофизических преобразователей зависят от условий проведения испытаний и подробно описаны в работе [17].

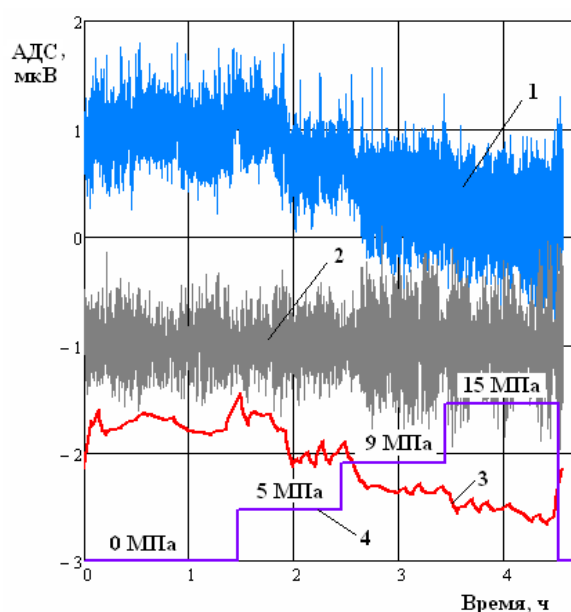


Рис. 1. – Обработка детектированного сигнала (1), полученного при одноосном растяжении алюминия технической чистоты, с помощью вейвлет-фильтра (график сдвинут вверх по оси ординат на 1,7 единиц). Шумовая составляющая сигнала (2) и полезный сигнал (3) сдвинуты вниз по оси ординат на одну единицу. В нижней части рисунка приведена диаграмма механического нагружения образца (4)

Моделирование поверхности топливного сердечника проводили на основе полученных результатов по радиационной температурно-силовой обработке нитридов и карбонитридов урана. Относительная деформация сердечника в результате температурно-силовых циклов имела высокое значение (до 0,3 и более), сопоставимое со значением деформации, при котором происходит контакт топлива с оболочкой.

Основная проблема моделирования поверхности с использованием электрофизической диагностики заключается в том, что функция распределение шероховатости, в выбранный момент времени, зависит от пространственных координат, а функция изменения диагностического сигнала – от времени. Связь временной функции и функции пространственных координат осуществлялась на основе разработанного нами подхода. Разложение диагностического сигнала в ряд Фурье выполнялось с целью определения частот гармоник, появляющихся на различных этапах эксперимента. Если предположить, что число пятен контакта в течение

эксперимента сохраняется, то должна изменяться площадь контактов, ее рост или уменьшение. Возможно, что в процессе эксперимента некоторые пятна контактов исчезают, но вследствие динамики процесса, образуются новые. Число гармоник, получавшееся при разложении в ряд Фурье диагностического сигнала, коррелировало с количеством взаимодействующих выступов и впадин на площадках пятен контактов, динамически изменяющихся во времени.

В соответствии с методикой измерений, одна из площадок контакта выбиралась максимально удаленной от места локализации деформации. В этом случае контактная разность потенциалов, возникающая между образцом и преобразователем на данной площадке, слабо изменялась во времени, поскольку число взаимодействующих выступов на ней во времени оставалось примерно постоянным.

В другой области контакта, где происходит активный процесс образования деформации, напротив, число пятен контакта во времени интенсивно изменялось. Если учитывать только большие по площади пятна контактов (с линейными размерами от десятых долей миллиметра и более), то их число можно определить на основе теории Гринвуда-Вильямсона, а изменяющуюся во времени шероховатость – по диагностическому сигналу, используя выражение (6).

Задача заключалась в построении распределения шероховатости (волнистости) на поверхности пятна контакта по значениям диагностического параметра и была разбита на несколько расчетных этапов:

- построение распределения шероховатости на поверхности образца перед проведением испытаний (проводилось на основе результатов профилометрии) и определение начального значения шероховатости h_0 ;
- статистическая обработка диагностических сигналов (определение среднего, среднеквадратического отклонения, дисперсии и др.) и построение гистограммы распределения амплитуды;
- расчет параметров шероховатости по значениям диагностического сигнала;
- моделирование шероховатости поверхности с помощью математических функций таким образом, чтобы полученное значение шероховатости по модели соответствовало расчетному значению по диагностическому сигналу.

На рисунке 2 приведены полученные результаты изменения шероховатости поверхности топливного сердечника под облучением.

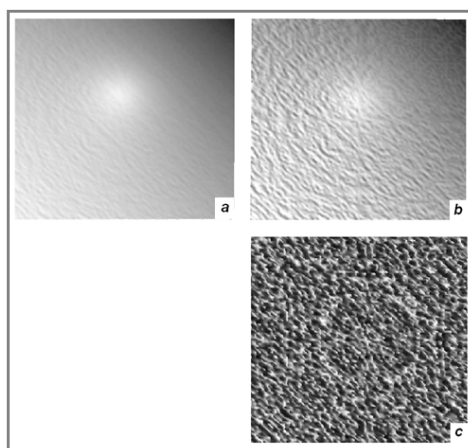


Рис. 2. – Моделирование волнистости и шероховатости поверхности карбонитрида урана на разных стадиях эксперимента: а - начальная шероховатость до облучения ($Ra = 5-10$ мкм). Поверхность построена по фоновому значению диагностического сигнала; б – увеличение параметра волнистости в результате радиационной температурно-силовой обработки; с – формирование кольцевого контура контакта преобразователя с поверхностью образца

Расчетное значение деформации $\varepsilon_{\text{расч}}$ определяли интегрированием квадрата функции диагностического сигнала в заданном временном интервале:

$$\varepsilon_{\text{расч}} = A \int_{t_1}^{t_2} (\Delta\varphi)^2 dt, \quad (7)$$

$$A = \frac{1}{\sigma \cdot V \cdot \rho},$$

где σ – приложенное механическое напряжение;
 V – объем образца;
 ρ – подгоночная функция, имеющая размерность Ом.

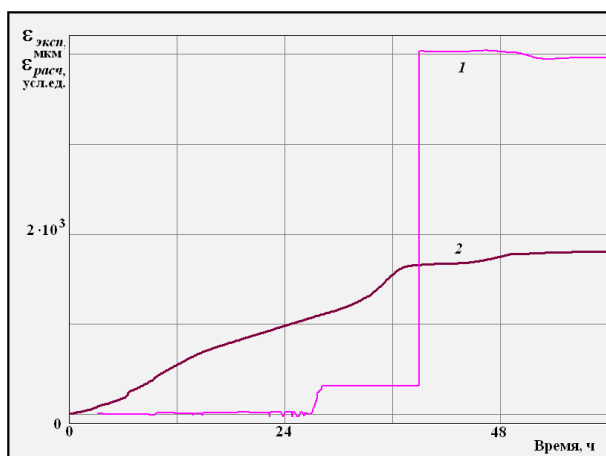


Рис. 3. – Изменение деформации карбонитрида урана в процессе внутриреакторных испытаний: кривая (1) – эксперимент ($\varepsilon_{\text{эксп}}$, в мкм); кривая (2) – расчет ($\varepsilon_{\text{расч}}$ в условных ед.) [13]

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Для количественной оценки технического состояния изделий (труба электросварная прямошовная круглая ГОСТ 10704-91, $\varnothing 219$ мм, толщина стенки 6 мм, сталь 20) трубопровода сжатого воздуха инженерного корпуса Московской печатной фабрики - филиала АО Гознак был применен метод СКП. При проведении работ была использована мобильная информационно-измерительная система (ИИС) на базе ноутбука Asus X554L и сертифицированного прибора ЭДСС-1 (рис. 4).

Программный комплекс, входящий в расчетно-программный модуль ИИС позволяет оперативно обрабатывать поступающую информацию, формировать базу данных и производить необходимые расчеты в среде *MathCAD*, а также содержит тестовые и диагностические программы, программы расчета и визуализации полученных результатов.

Электрофизический контроль трубопровода сжатого воздуха проводился при пуско-наладочных работах с целью определения качества сварных швов и выявления возможных нарушений и дефектов. При испытаниях использовались и стационарные электрофизические датчики неразрушающего контроля (рис.5).

Труба для подачи сжатого воздуха была сварена из шести частей, имела два изгиба и пять сварных швов. Все швы выполнены электродуговой сваркой.

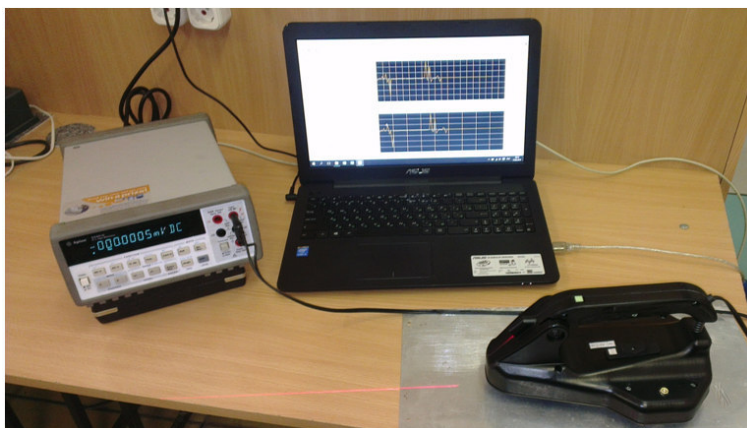


Рис. 4. – Переносной комплекс функциональной электрофизической диагностики с прибором ЭДСС-1 (внизу в правой части фото)

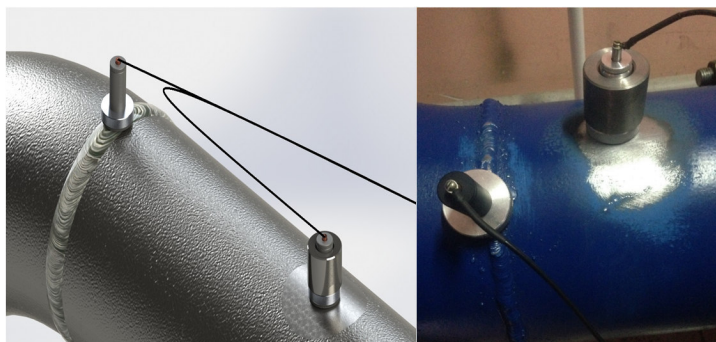


Рис. 5. – Монтаж стационарных электрофизических датчиков на объекте контроля

В работе использовались стационарные датчики с коническими преобразователями (угол конуса близок к 90 градусам), имеющими радиус скругления вершины 0,3 мм. Шероховатость поверхности (R_a) чувствительного элемента, измеренная цифровым портативным профилометром фирмы *Vogel*, приведены в таблице 1. Шероховатость поверхности определяет порог чувствительности. Преобразователи были изготовлены из сплавов Д16Т (ГОСТ 21488-97), Х18Н10Т (ГОСТ 14955-77), латуни ЛС 59-1 (ГОСТ 15527-2004) и меди М1 (ГОСТ 859-2001).

Таблица 1. – Шероховатость поверхности электрофизических преобразователей

Материал преобразователя	Шероховатость R_a , мкм
Д16Т	0,08
Х18Н10Т	0,15
ЛС 59-1	0,23
М1	0,10

Результаты диагностирования трубопровода сжатого воздуха для трех швов представлены в таблице 2, где указаны полученные средние значения диагностического сигнала для каждой выборки проведенных измерений. Характеристиками объекта сварного шва являются «наплыв», «загрязненный участок» и «очищенный участок».

Таблица 2. – Характеристика объекта сварного шва и средние значения диагностического сигнала для использованных преобразователей

Материал преобразователя	Характеристика объекта сварного шва		
	Наплыв	Загрязнённый участок	Очищенный участок
1 шов			
Д16Т	$2,390 \cdot 10^{-7}$	$1,119 \cdot 10^{-4}$	$1,586 \cdot 10^{-7}$
X18H10T	$1,835 \cdot 10^{-6}$	$1,827 \cdot 10^{-4}$	$3,484 \cdot 10^{-6}$
ЛС59-1	$4,671 \cdot 10^{-7}$	$1,527 \cdot 10^{-4}$	$6,915 \cdot 10^{-7}$
М1	$2,089 \cdot 10^{-6}$	$1,085 \cdot 10^{-4}$	$2,253 \cdot 10^{-6}$
2 шов			
Д16Т	$5,705 \cdot 10^{-6}$	$8,852 \cdot 10^{-6}$	$2,236 \cdot 10^{-6}$
X18H10T	$5,337 \cdot 10^{-6}$	–	$1,210 \cdot 10^{-5}$
ЛС59-1	$2,872 \cdot 10^{-6}$	$8,533 \cdot 10^{-5}$	$3,302 \cdot 10^{-6}$
М1	$9,543 \cdot 10^{-6}$	$1,146 \cdot 10^{-4}$	$8,061 \cdot 10^{-6}$
3 шов			
Д16Т	$2,416 \cdot 10^{-5}$	$2,316 \cdot 10^{-4}$	$3,201 \cdot 10^{-5}$
X18H10T	$3,169 \cdot 10^{-5}$	$2,037 \cdot 10^{-5}$	$2,963 \cdot 10^{-5}$
ЛС59-1	$4,450 \cdot 10^{-5}$	$2,400 \cdot 10^{-4}$	$3,005 \cdot 10^{-5}$
М1	$4,984 \cdot 10^{-5}$	$9,189 \cdot 10^{-5}$	$5,424 \cdot 10^{-5}$

Анализ результатов показывает, что для наплыва разность электрических потенциалов растет заметно от первого шва до четвертого, потом падает на пятом шве. Это связано с более высокой температурой окружающей среды для третьего и особенно четвертого швов, расположенных в верхней части помещения. Показания возрастают в результате появления дополнительной термо-эдс.

На основе выработанных критериев поставлен диагноз по результатам электрофизической диагностики, при этом использовались имеющиеся данные из архива электронной библиотеки лаборатории *ElphysLAB* НИЯУ МИФИ. Определены регламентирующие пороговые значения диагностического сигнала и соответствующие показатели разности электрических потенциалов для представления заключения о проведенной работе.

Полученные в работе показания лежат в допустимых пределах, характерных для сталей данного класса. При диагностировании не получено критических значений сигнала, влияющих на условия штатной эксплуатации трубопровода.

ВЫВОДЫ

Продемонстрированы перспективы использования методов функциональной электрофизической диагностики в атомной отрасли на примерах исследования радиационной стойкости ядерного топлива и оценки технического состояния трубопровода сжатого воздуха инженерного корпуса Московской печатной фабрики – филиала АО Гознак. Приведены теоретические аспекты метода сканирующей контактной потенциометрии, лежащего в основе функциональной электрофизической диагностики, а также основные положения математической модели для построения профиля диагностируемой поверхности. Использование переносного комплекса функциональной электрофизической диагностики позволит оперативно проводить неразрушающий контроль на технологическом оборудовании атомных станций. Разработан программный комплекс, входящий в расчетно-программный модуль *ИИС*, который обеспечивает обработку поступающей информации, формирует базу данных и

производит необходимые расчеты, содержит тестовые и диагностические программы, а также программы визуализации полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Казанцев, А. Как развиваются трещины? [Текст] / А.Казанцев // РЭА. – 2016. – №2. – С. 28–35.
2. Surin V.I., Evstyukhin N.A., Kapralov Yu.A., Morozov A.A. High-effective control system for reactor technological equipment. International Conference «Nuclear Energy for New Europe 2010», Nuclear Society of Slovenia, Book of Abstracts, pp. 58–59.
3. Арефинкина, С.Е. и др. Построение деформации и профиля поверхности ядерного топлива по результатам функциональной электрофизической диагностики [Текст] / С.Е. Арефинкина, А.М. Гладцин, Е.В. Рябиковская, В.И. Сурин // Препринт №IBRAE-2015-01.– М.: ИБРАЭ РАН, 2015. – С. 19–22.
4. Белова, В.С. и др. Информационно-измерительная система для внутриреакторных исследований материалов [Текст] / В.С. Белова, Н.А. Евстюхин, А.А. Морозов, В.И. Сурин // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – №1. – С. 39–47.
5. Сурин, В.И. и др. Диагностика образования и роста усталостных трещин в тонких металлических пластинах [Текст] / В.И. Сурин, В.И. Занько, А.П. Бирюков // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – №3. – С. 71–77.
6. Arefinkina S.E., Denisov R.A., Morozov A.A., Surin V.I. Relationship between deformational activity of the surface and electric properties of materials. Modern problems of theory machines. North Charleston, USA, 2016, №4, pp. 177–183.
7. Арефинкина, С.Е. и др. Результаты обработки диагностических сигналов при испытаниях материалов на прочность и усталость [Текст] / С.Е. Арефинкина, В.И. Сурин // Современные проблемы теории машин. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2016, №4, С. 26–30.
8. Тейбор, Д. Современное состояние представлений о механизме трения [Текст] / Д. Тейбор // Проблемы трения и смазки. – 1981. – Т.103. – №2. – С. 1–19.
9. Дроздов, Ю.Н. и др. Противозадирная стойкость трущихся тел [Текст] / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Арчegov, В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1981. – 140 с.
10. Штремель, М.А. Прочность сплавов [Текст] / М.А. Штремель. Часть II. – М.: МИСИС, 1997. – 527 с.
11. Persson B.N.J. Contact mechanics for randomly rough surfaces. Surface Science Reports, 2006, Vol. 61, pp. 201–227.
12. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1966, Vol. 295, pp. 300–319.
13. Ryabikovskaya E.V., Arefinkina S.E., Surin V.I. Modeling of fuel kernel surface profile based on results of functional electrophysical diagnostics. ICONE 23. The 23rd International Conference on Nuclear Engineering, Chiba, Japan, 2015.
14. Ferrante J., Smith J.R. Theory of bimetallic interface// Physical. Review. B. 1985, Vol.31, pp. 3427–3434.
15. Сурин, В.И. и др. Об использовании метода электросопротивления и термо-эдс в реакторных условиях [Текст] / В.И. Сурин, Н.А. Евстюхин, В.И. Князев, С.Н. Тарасов, К.Л. Писаренко // Техника реакторного эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 80–85.
16. Surin V.I., Evstyukhin N.A., Cheburkov V.I. Conductivity of fission-damaged uranium nitride. Journal of Nuclear Materials. 1995, Vol. 218, pp. 268–272.
17. Сурин В.И., Евстюхин Н.А. Электрофизические методы неразрушающего контроля и исследования реакторных материалов [Текст] / В.И. Сурин, Н.А. Евстюхин. – М.: МИФИ, 2008. – 168 с.

REFERENCES

- [1] Kazantsev A. Kak razvivayutsja treschiny [How to develop cracks?]. REA. 2016, №2, pp. 28-35. (in Russian).
- [2] Surin V.I., Evstyukhin N.A., Kapralov Yu.A., Morozov A.A. High-effective control system for reactor technological equipment//International Conference «Nuclear Energy for New Europe 2010», Nuclear Society of Slovenia, Book of Abstracts, pp. 58–59. (in English)
- [3] Arefinkina S.E. etc. Postroenie deformatsii i profilja poverkhnosti iadernogo topliva po rezultatam funktsionalnoi elektrofizicheskoi diagnostiki [Construction and profile deformation of nuclear fuel surface as a result of functional electrophysical diagnostics] Preprint № IBRAE-2015-01. Pub. Nuclear Safety Institute, 2015. pp. 19–22. (in Russian).
- [4] Belova V.S. etc. Informational-measuring system for in-core research materials [Information

- technology in the design and industrial]. 2010, ISSN 2073-2597, №1, pp.39-47. (in Russian).
- [5] Surin V.I. etc. Diagnosis of the formation and growth of fatigue cracks in the thin metal plates [Information technology in the design and industrial]. 2010, ISSN 2073-2597, №3, pp.71–77. (in English)
 - [6] Arefinkina S.E. etc. Relationship between deformational activity of the surface and electric properties of materials [Modern problems of theory machines]. Pub. North Charleston, USA, 2016, ISSN 2307-342X, № 4, pp. 177–183. (in English)
 - [7] Arefinkina S.E. etc. Rezultaty obrabotki diagnosticheskikh signalov pri ispytaniyakh materialov na prochnost i ustalost [The results of processing diagnostic signals when testing materials for durability and fatigue]. Sovremennye problemy teorii mashin [Modern Problems of Theory mashin]. Pub. Novokuznetsk: SIC MS, 2016, №4, pp. 26–30. (in Russian).
 - [8] Tabor D. Sovremennoe sostoyanie predstavlenii o mekhanizme treniya [Current state ideas about the mechanism of friction and friction]. Problemy smazky [Problems smazki], 1981, Vol. 103, №2, pp.1–19. (in Russian).
 - [9] Drozdov Y.N., Arhegov V.G., Smirnov V.I. Protivozadiraia stoikost trushchikhsia tel [Extreme pressure resistance of rubbing bodies]. Pub. Nauka, 198, 140 p. (in Russian).
 - [10] Shtremel M.A. Prochnost splavov [The strength of the alloys]. Part II. Pub. MISA, 1997, 527 p. (in Russian).
 - [11] Persson B.N.J. Contact mechanics for randomly rough surfaces. Surface Science Reports. 2006, ISSN 0167-5729, Vol.61, pp. 201-227. (in English)
 - [12] Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces. Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1966, Vol. 295, pp. 300–319. (in English)
 - [13] Ryabikovskaya E.V., Arefinkina S.E., Surin V.I. Modeling of fuel kernel surface profile based on results of functional electrophysical diagnostics. ICONE23-1163. The 23rd International Conference on Nuclear Engineering, Pub. Chiba, Japan, 2015. (in English)
 - [14] Ferrante J., Smith J.R. Theory of bimetallic interface. Physical. Review. B. 1985, ISSN 1098-0121, Vol.31, pp. 3427–3434. (in English)
 - [15] Surin V.I. etc. Ob ispolzovanii metoda elektrosoprotivleniya i termo-eds v reaktornykh usloviyakh [The use of the method of electrical resistivity and thermoelectric power in the reactor conditions]. Tekhnika reaktornogo eksperimenta [Technique reactor experiment]. Pub. Energoatomisdat, 1987, pp. 80–85. (in Russian).
 - [16] Surin V.I., Evstyukhin N.A., Cheburkov V.I. Conductivity of fission-damaged uranium nitride. Journal of Nuclear Materials. 1995, ISSN 0022-3115, Vol. 218, pp. 268–272. (in English)
 - [17] Surin V.I., Evstyukhin N.A. Elektrofizicheskie metody nerazrushaiushchego kontrolya i issledovaniya reaktornykh materialov [Electrophysical methods of nondestructive testing and materials research reactor]. Pub. Moscow Engineering Physics Institute, 2008, 168 p. (in Russian).

The Electrophysical Diagnosis Methods and Reactor Equipment Control

V.I. Surin*, Z.S. Volkova, R.A. Denisov, V.D. Motovilin, N.V. Rhine**

National Research Nuclear University «MEPhI»,

Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, Russia 115409

**e-mail: VIsurin@mephi.ru; **e-mail: volkovazs@rambler.ru*

Abstract – The detect corrosion cracks at an early stage of formation and determination of their causes is important. For example, PWR-1000 corrosion cracking occurs in the welding unit coolant reservoir to the body of the steam generator (welded joint zone № 111). It is known to cause cracking of the deposits are iron and copper compounds in the form of sludge that accumulates with time in the pockets welding assembly. Objectives: The theoretical aspects of the method of scanning contact potentiometry underlying functional electrophysical diagnostics are discussed, and a summary of the mathematical model to build the profile of the surface diagnosed is given. Using portable electrophysical complex functional diagnostics will allow us to carry out non-destructive testing on the process equipment of nuclear power plants. A software package included in the settlement and software module that provides processing of incoming information creates the database and make the necessary calculations, contains test and diagnostic programs, as well as visualization of the results.

Keywords: electrophysical diagnostics and non-destructive testing, scanning the contact potentiometry, a mathematical model for the construction of the surface profile according to the electric potential difference function, NPP.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ
НАСТРОЕК АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ
РЕАКТОРА ВВЭР-1000**

© 2016 Х.Ф. Альмасри

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Задача качества регулирования мощности реактора является одной из актуальных в ядерной энергетике. В связи с этим постоянно проводятся исследования систем управления для улучшения качества регулирования мощности реактора. В этом ключе важным представляется исследование моделей интеллектуальных регуляторов мощности в АСУТП ядерных реакторов на многофункциональном компьютерном анализаторе ВВЭР-1000. В данной работе представлена структурная схема для оценки качества регулирования и оптимизации настроек автоматического регулятора мощности реактора ВВЭР-1000, построенная на базе интеллектуальных алгоритмов управления вида нечеткой логики. Задача этой работы заключается в том, чтобы найти оптимальные настройки регулятора и оценить качество регулирования при различных характерах возмущений, где минимальные ошибки регулирования σ и ϵ . В работе показывается, что перспективными вариантами для оптимизации настроек автоматического регулятора мощности являются интеллектуальные алгоритмы управления на базе нечеткой логики.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нечеткая логика, оптимизация, ядерный реактор, автоматический регулятор мощности.

Поступила в редакцию 20.11.2016

Достаточно высокая сложность систем регулирования и контроля АСУТП АЭС, а также сложное описание тепловых объектов не позволяют эффективно получать прогнозы качества и настроек системы управления, что определяет целесообразность для рассмотрения нового способа повышения качества управления [1, 2].

Важными задачами проектирования и эксплуатации АСУТП АЭС является оценка качества регулирования и оптимизация настроек автоматического регулятора мощности (АРМ) ядерного реактора. К трудностям решения относится необходимость учета наличия в АСУТП разнообразных управляющих и возмущающих воздействий, которые достаточно сложно предугадать заранее. Кроме того, имеется ряд частных критериев качества и оптимизации, которые связаны между собой и учитываются одновременно. Интеллектуальное, или, по-другому, нечеткое управление, может помочь решить данную задачу для подсистем АРМ [3].

Ниже будет рассмотрен общий подход к решению многокритериальной задачи для выбора оптимальной настройки АРМ и приведены решения частных задач. Для проведения исследований по вопросам показателей качества для регулирования мощности реактора использовался многофункциональный компьютерный анализатор ВВЭР 1000 расположенный в лаборатории управления и контроля кафедры «Автоматика» НИЯУ МИФИ [2]. Компьютерный многофункциональный анализатор реакторной установки АЭС с ВВЭР полностью имитирует работу автоматического регулятора мощности реактора. Это стало основанием для последующего управления мощностью. В связи с этим, все тестирования и эксперименты работы АРМ проводились на данном компьютерном анализаторе, и полученные выходные данные

использовались, в качестве информационной базы, и проверки на соответствие процесса регулирования.

На рисунке 1 представлен интерфейс автоматического регулятора мощности реактора на компьютерном многофункциональном анализаторе реакторной установки исследования АЭС с ВВЭР. На рисунке видны все функциональные параметры регулятора, подлежащие настройке, а так же в этом имитаторе есть возможность ввести различные типы и амплитуды возмущений. Имитатор обладает возможностью визуализировать динамическое состояние системы регулирования в виде графика. На графическом представлении можно наблюдать мгновенное изменение мощности реактора и текущих параметров регулирования.

Следует отметить что, так как имитатор используется для различных целей, таких как научные исследования и проведения учебных работ и практик, есть возможность менять и настраивать множество параметров регулятора, что дает большую возможность проводить разнообразные опыты и испытать нестандартные ситуации.



Рис. 1. – Интерфейс автоматического регулятора мощности реактора на компьютерном многофункциональном анализаторе реакторной установки АЭС с ВВЭР

Автоматический регулятор мощности, используемый в исследуемом анализаторе, позволяет менять настройки следующих параметров:

- K – коэффициент пропорциональности (усиления) АРМ;
- Z – зона нечувствительности АРМ;
- A – тип и характер возмущающего воздействия на ядерный реактор (прирост реактивности).

В таблице 1 представлены значения статической ошибки *Epsilon* и абсолютные значения величины выброса перерегулирования *Sigma* для различных допустимых значений параметров настройки регулятора мощности K и Z при различных характерах возмущений ядерного реактора. Из таблицы видно, что при различных типах возмущений по знаку и амплитуде имеют место свои оптимальные, с точки зрения качества регулирования, коэффициенты настройки регулятора K и Z .

Таблица 1. – Результаты оценки качества работы АРМ

К	Z	A ³⁺		A ³⁻	
		<i>sigma</i>	<i>epsilon</i>	<i>sigma</i>	<i>epsilon</i>
0.1	0.1	3.1245	-0.0373	-2.9813	-2.0295
0.1	0.5	3.1689	2.4757	-2.8945	-2.0579
0.1	1	3.1585	2.45	-3.0982	-2.0799
0.1	2	3.1168	1.8589	-3.1753	-2.5982
0.1	3	3.1119	2.4398	-2.809	-2.5305
0.5	0.5	2.8671	0.2226	-2.81	-2.0875
0.5	0.8	2.9187	-0.2512	-2.7019	-2.0427
0.5	1	2.93	-0.2294	-2.6229	-2.068
0.5	1.1	2.9148	0.2969	-2.8585	-2.0418
0.5	1.2	2.9894	0.3255	-2.8949	-2.0098
0.5	1.4	2.8896	0.7209	-2.8401	-2.0971
0.5	1.5	2.9268	0.705	-2.7645	-2.0264
0.5	1.6	2.8698	0.7557	-2.936	-2.5272
0.5	1.8	2.8765	1.1608	-2.8438	-2.0614
0.5	2	2.9266	1.1658	-2.7382	-2.0592
1	0.5	2.5667	0.2537	-2.7085	-2.1162
1	0.8	2.5371	0.2338	-2.561	-2.0879
1	1	2.5369	0.2262	-2.6361	-2.0634
1	1.1	2.525	0.2472	-2.7118	-2.1009
1	1.2	2.583	0.263	-2.6313	-2.0882
1	1.4	2.5863	0.2777	-2.5984	-2.0658
1	1.5	2.5376	0.2355	-2.5112	-2.0496
1	1.6	2.6301	0.3265	-2.6201	-2.0343
1	1.8	2.5163	1.147	-2.5306	-2.0679
1	2	2.5806	1.1514	-2.6874	-2.0945
1.5	0.5	НУ	НУ	НУ	НУ
1.5	0.8	2.3055	0.3227	-2.652	-1.9685
1.5	1	2.102	0.2061	-2.4301	-2.0635
1.5	1.1	2.2134	0.2418	-2.6119	-2.0691
1.5	1.2	2.1846	0.2503	-2.5322	-2.0531
1.5	1.4	2.2276	0.2788	-2.5922	-2.0425
1.5	1.5	2.2355	0.2856	-2.5005	-1.9799
1.5	1.6	2.2972	0.3097	-2.6648	-1.9592
1.5	1.8	2.1464	0.2253	-2.3277	-2.0687
1.5	2	2.1516	0.2407	-2.6218	-2.0571
2	0.5	НУ	НУ	НУ	НУ
2	0.8	НУ	НУ	НУ	НУ
2	1	НУ	НУ	НУ	НУ
2	1.1	2.0448	-1.8507	-2.2268	-2.0485
2	1.2	1.7578	-0.8284	-2.3778	-2.0139
2	1.4	1.873	-0.81	-2.4308	-2.0119
2	1.5	1.8872	-0.7891	-2.4127	-1.9846
2	1.6	2.1222	-0.7674	-2.4686	-1.994
2	1.8	2.0373	-0.8575	-2.4151	-2.0721
2	2	2.0482	-0.8376	-2.4705	-2.054
5	0.1	НУ	НУ	-2.4857	-2.0737
5	0.5	НУ	НУ	-2.4857	-2.0622
5	1	НУ	НУ	-2.2958	-2.0444
5	2	НУ	НУ	-2.4156	-2.838
5	3	2.8925	-2.1259	-2.4212	-2.0983

Более наглядно представлены результаты эксперимента из таблицы 1, которые отражены на рисунке 2 (а, б, в и г) погрешностей работы АРМ (*Epsilon* и *Sigma*) при разных возмущениях A^{3-} и A^{3+}

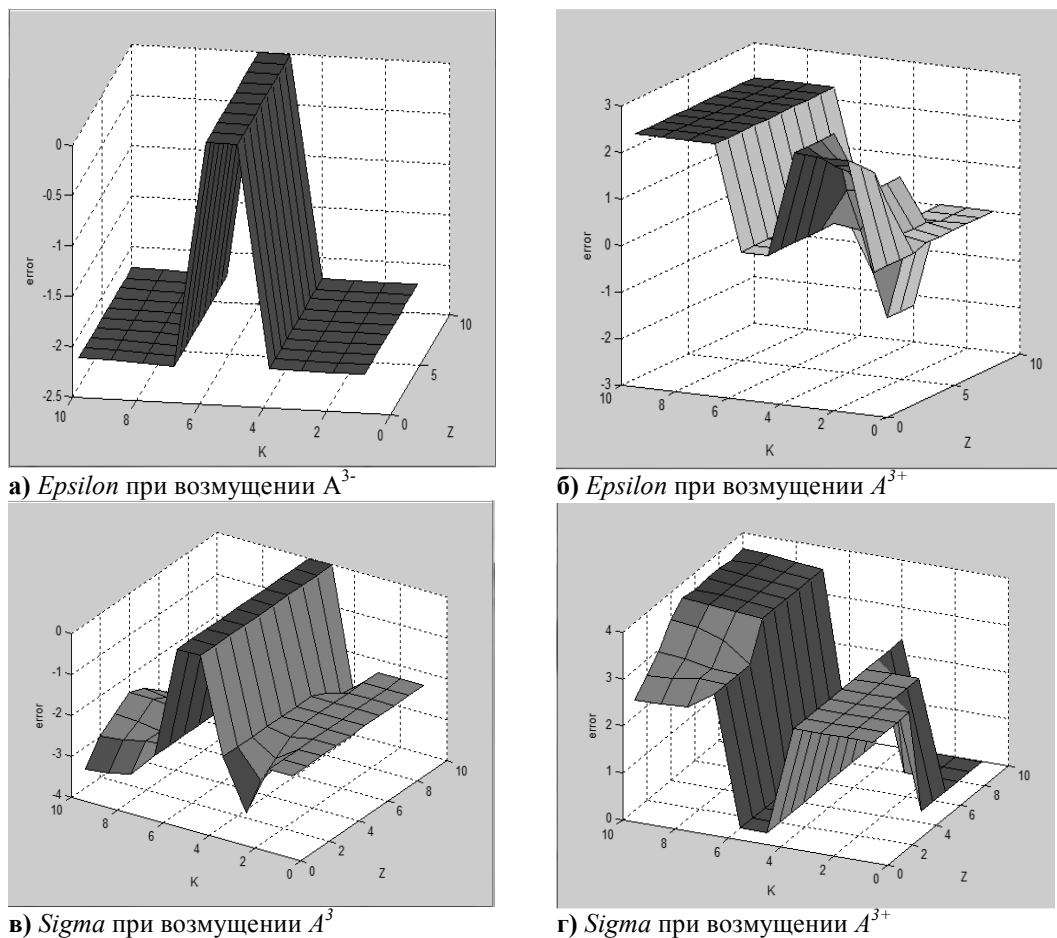


Рис. 2. – Представление погрешностей работы АРМ (*Epsilon* и *Sigma*) при разных возмущениях

В частности из таблицы 1 видна область, где границы устойчивости работы регулятора мощности ЯР. Разумеется, что при штатной работе ЯР практически не удастся достичь границ устойчивости системы регулирования. Но, при нештатных ситуациях, возможны случаи неустойчивой работы системы управления на исследуемом компьютерном анализаторе реактора ВВЭР 1000. На рисунке 3 можно увидеть эту границу.

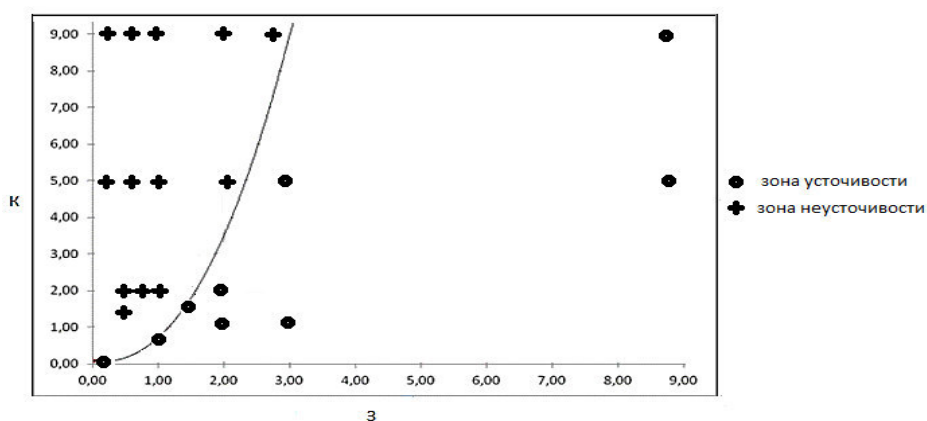


Рис. 3. – Области устойчивой работы АРМ компьютерного анализатора реактора ВВЭР 1000

Из результатов проведенного эксперимента можно сделать вывод, что выбор настроек автоматического регулятора мощности является многокритериальной задачей при учете различных типов возмущений для достижения наилучших показателей *Epsilon* и *Sigma* одновременно.

Перейдем к предлагаемому использованию нечетких оценок для решения многокритериальной задачи выбора оптимальных параметров в регуляторе мощности для достижения наилучших значений *Epsilon* и *Sigma* одновременно при различных типах возмущения. Для этого сформируем предлагаемую нечеткую технологию (метод Fuzzy) ранжирования и оптимизации полученных экспериментальных данных.

Нечеткая технология оптимизации включает выполнение следующих этапов [4]:

- 1) подготовка вариантов схем и исходных данных для оценок надежности вариантов;
- 2) оценка частных критериев оптимизации (ранжирования);
- 3) фазификация частных критериев;
- 4) установление логических правил предпочтения (например, с помощью таблиц правил);
- 5) задание дефазификации;
- 6) нечеткая оценка глобального критерия оптимизации для *Epsilon* и *Sigma*;
- 7) ранжирование вариантов по глобальному критерию оптимизации;
- 8) определение оптимального и запасных вариантов на основе ранжирования;
- 9) окончательный выбор с учетом реализуемости, дополнительных требований и неформальных предпочтений.

Структурная схема нечеткого алгоритма, реализованного с использованием пакета MATLAB, представлена на рисунке 4 и 5. Схема состоит из трех входов, на которые подаются *K*, *Z*, *A* – некоторые известные частные критерии. Эти данные обрабатываются при помощи нечеткого алгоритма Mamdani, который позволяет оценить вклад каждой входной переменной с учетом его веса и накопленного опыта, на этапе создания правил для функционирования многокритериального алгоритма.

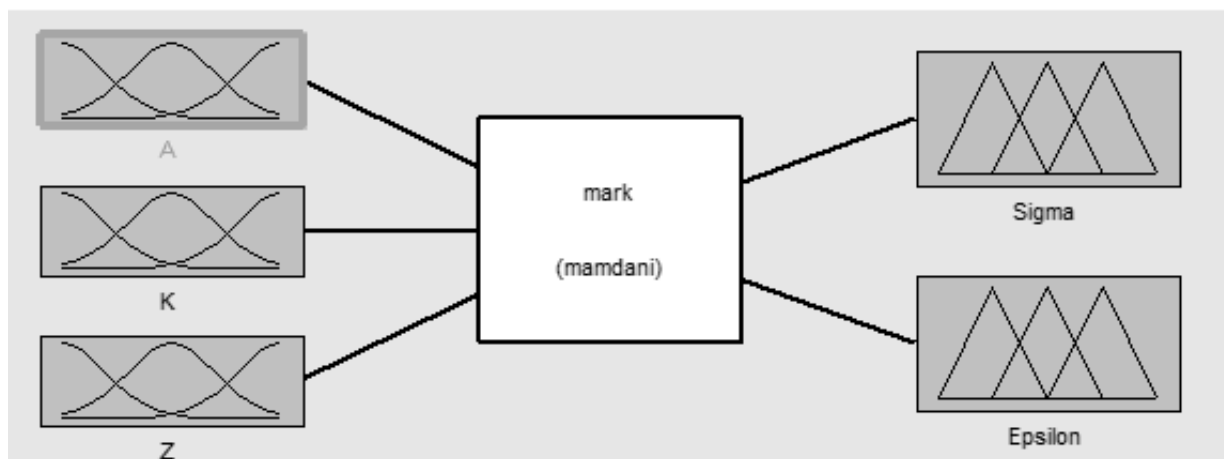


Рис. 4. – Общая схема предлагаемый подход нечеткой логики

Выходы схемы содержат результаты работы алгоритма в виде оценки величин *Epsilon* и *Sigma*. Учитывая, что алгоритм «Mamdani» предлагает всегда положительно определенные оценки, то имеет смысл, в общем случае, для нахождения суммарной оценки использовать среднее арифметическое от оценок *Epsilon* и *Sigma*. В частных случаях интеллектуальный алгоритм позволяет отдавать предпочтение одной из наиболее важных из совокупности оценок.

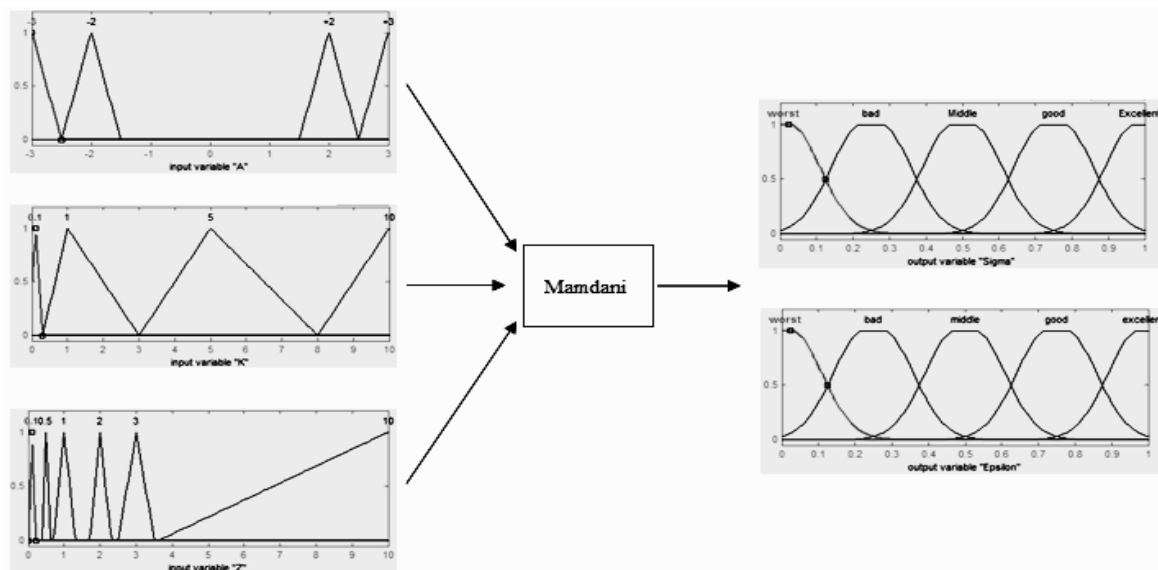


Рис. 5. – Структура нечеткого оценивания и ранжирования с алгоритмом Mamdani

Правила нечеткого алгоритма представлены в таблице.2. Представленные правила содержат в себе набор условий, которые охватывают всевозможные варианты всех возможных событий.

Таблица 2. – Логические правила вывода для нечеткого алгоритма

1. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is excellent)	29. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
2. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	30. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
3. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 1) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	31. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
4. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 2) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	32. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 0.5) then (Sigma is Middle)(Epsilon is excellent) (1)
5. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	33. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 1) then (Sigma is Middle)(Epsilon is excellent) (1)
6. If (A is +3) and (K is 0.1) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	34. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is good) (1)
7. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 0.1) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	35. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 3) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
8. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 0.5) then (Sigma is bad)(Epsilon is excellent) (1)	36. If (A is +2) and (K is 1) and (Z is 10) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
9. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 1) then (Sigma is bad)(Epsilon is excellent) (1)	37. If (A is -3) and (K is 1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
10. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	38. If (A is -3) and (K is 1) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
11. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 3) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	39. If (A is -3) and (K is 1) and (Z is 2) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
12. If (A is +2) and (K is 0.1) and (Z is 10) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	40. If (A is -3) and (K is 1) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
13. If (A is -3) and (K is 0.1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	41. If (A is -3) and (K is 1) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
14. If (A is -3) and (K is 0.1) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	42. If (A is -2) and (K is 1) and (Z is 0.1) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
15. If (A is -3) and (K is 0.1) and (Z is 1) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	43. If (A is -2) and (K is 1) and (Z is 0.5) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
16. If (A is -3) and (K is 0.1) and (Z is 2) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	44. If (A is -2) and (K is 1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
17. If (A is -3) and (K is 0.1) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)	45. If (A is -2) and (K is 1) and (Z is 3) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)
18. If (A is -3) and (K is 0.1) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)	46. If (A is -2) and (K is 1) and (Z is 10) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)
19. If (A is -2) and (K is 0.1) and (Z is 0.1) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	47. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
20. If (A is -2) and (K is 0.1) and (Z is 0.5) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	48. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
21. If (A is -2) and (K is 0.1) and (Z is 1) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	49. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
22. If (A is -2) and (K is 0.1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	50. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 2) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
23. If (A is -2) and (K is 0.1) and (Z is 3) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	51. If (A is +3) and (K is 5) and (Z is 3) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
24. If (A is -2) and (K is 0.1) and (Z is 10) then (Sigma is bad)(Epsilon is bad) (1)	52. If (A is -3) and (K is 5) and (Z is 10) then (Sigma is worst)(Epsilon is bad) (1)
25. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)	53. If (A is +2) and (K is 5) and (Z is 0.1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
26. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 0.5) then (Sigma is bad)(Epsilon is excellent) (1)	54. If (A is +2) and (K is 5) and (Z is 0.5) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
27. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 1) then (Sigma is bad)(Epsilon is excellent) (1)	55. If (A is +2) and (K is 5) and (Z is 1) then (Sigma is worst)(Epsilon is worst) (1)
28. If (A is +3) and (K is 1) and (Z is 2) then (Sigma is bad)(Epsilon is middle) (1)	

Реализованные, на основе правил в таблице 2, алгоритмы учитывают вес каждой входной величины, иными словами каждого входного фактора, тем самым они передают опыт специалиста для выбора наилучшего варианта. В этом заключается преимущества использования интеллектуальных алгоритмов перед традиционными алгоритмами настройки параметрических регуляторов.

На рисунке 6 и в таблице 3 представлены результаты оценки настраиваемых параметров регулятора при различных по величине и типу возмущениях реактивности ЯР. Каждый рассмотренный случай имеет свою индивидуальную оценку, что позволяет

найти оптимальную настройку параметрического регулятора мощности для каждого из типов возмущения.

Таблица 3. – Логические правила вывода для нечеткого алгоритма

		A^{3+}		A^{3-}		
K	z	σ	ϵ	σ	ϵ	средние значения оценок
1	0.5	0.251	0.754	0.5	0.754	0.5647
1	0.8	0.251	0.754	0.754	0.87	0.6572
1	1	0.251	0.9254	0.754	0.87	0.70005
1	1.1	0.251	0.754	0.5	0.87	0.5937
1	1.2	0.251	0.754	0.754	0.87	0.6572
1	1.4	0.251	0.87	0.754	0.87	0.6862
1	1.5	0.251	0.9254	0.9254	0.87	0.7429
1	1.6	0.251	0.2508	0.754	0.9254	0.54525
1	1.8	0.251	0.2508	0.754	0.87	0.5314
1	2	0.251	0.2508	0.5	0.87	0.4679

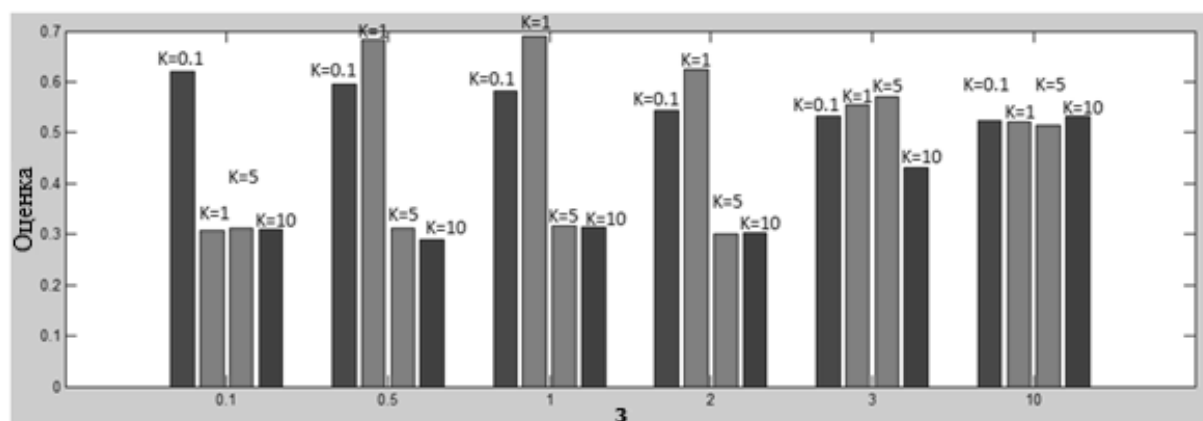


Рис. 6. – Оценка показателей качества АРМ на основе нечеткого подхода

ВЫВОДЫ

В процессе исследования были выявлены основные преимущества использования алгоритмов нечеткой логики с целью оценки качества регулирования и оптимизации настроек автоматического регулятора мощности (АРМ) ядерного реактора. В результате были получены оптимальные настройки АРМ для различных режимов работы ЯЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилова, Т.А. и др. Базы знаний интеллектуальных систем [Текст] / Т.А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – СПб.: «Питер», 2000. – 384 с.
2. Выговский, С.Б. и др. Учебная лаборатория на базе многофункционального анализатора реакторной установки АЭС с ВВЭР [Текст] / С.Б. Выговский, С.А. Королев, Е.В. Чернов // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2012. – Т.1. – №1. – С. 104–110.

3. Жучков А.А. Игровые и интеллектуальные подходы к выбору настроек регулятора мощности в АСУТП АЭС [Текст] / А.А. Жучков // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ – 2010. – Т.1. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 137–140.
4. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику [Электронный ресурс] // Консультационный центр Matlab компании SoftLine. Раздел «Проектирование систем управления Fuzzy Logic Toolbox». – Режим доступа: URL: <http://www.matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/bookl/index.php> – 01.11.2016.

REFERENCES

- [1] Gavrilova T.A., Khoroshevskii V.F. Bazy znaniy intellektualnykh system [Knowledge bases of intellectual systems]. Sankt-Peterburg. Pub. «Piter» [Piter], 2000. 384 p. (in Russian)
- [2] Vygovskii S.B., Korolev S.A., Chernov E.V. Uchebnaia laboratoriia na baze mnogofunktsionalnogo analizatora reaktornoй ustanovki AES s VVER [Educational laboratory on the basis of the multipurpose analyzer of reactor installation of the NPP with PWR]. Vestnik Natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI» [Bulletin of National research nuclear university "MEPhI"]. 2012, Vol. 1, №1, ISSN 2304-487X, pp. 104–110. (in Russian)
- [3] Zhuchkov A.A. Igrovye i intellektualnye podkhody k vyboru nastroyek regulatora moshchnosti v ASUTP AES [Game and intellectual approaches to the choice of settings of the power regulator in the NPP PCS]. Trudy nauchnoi sessii NIYaU MIFI [Works of a scientific session of National research nuclear university MEPhI], 2010. Vol. 1. M. Pub. NIYaU MIFI [NRNU MEPhI], 2010, pp. 137–140. (in Russian)
- [4] Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuiu logiku. [Introduction to the theory of indistinct sets and fuzzy logic.] Konsultatsionnyi tsentr Matlab kompanii SoftLine. Razdel «Proektirovanie sistem upravleniia Fuzzy Logic Toolbox» [Matlab advice center of the SoftLine company. Section "Design of Control Systems of Fuzzy Logic Toolbox".]. Available at: <http://www.matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/bookl/index.php> (in Russian)

Quality Assessment of Regulation and Optimization of the Power Automatic Regulator Settings of PWR-1000 Reactor

H.F. Almasri

*National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, Russia 115409
e-mail: husam_almasri@hotmail.com*

Abstract – The problem of power regulation quality of the reactor is one of urgent in nuclear power. Researches of control systems for improvement of quality of the reactor power regulation are constantly conducted. In this way the research of models of intelligent power regulators in the PCS of nuclear reactors on the multipurpose computer PWR-1000 analyzer is represented important. In this work the block diagram for quality assessment of regulation and optimization of settings of the automatic power regulator of the PWR-1000 reactor constructed on the basis of intellectual control algorithms of fuzzy logic type is submitted. The purpose of this work is to find optimum settings of the regulator and to estimate quality of regulation at various natures of indignations where the minimum errors of regulation of sigma and epsilon. In work it is shown that perspective options for optimization of settings of the automatic power regulator are intellectual control algorithms on the basis of fuzzy logic.

Keywords: artificial intelligence, fuzzy logic, optimization, nuclear reactor, automatic power regulator.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДНОЙ АРМАТУРЫ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНТРОПИЙНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ****© 2016 Е.А. Абидова, Л.С. Хегай, А.В. Чернов, О.Е. Драка, О.Ю. Пугачёва***Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

Диагностирование электромеханического оборудования АЭС требует разработки методов, направленных на контроль степени износа по сигналу тока двигателя. Показано, что износ влияет на стохастические параметры сигнала, которые не оцениваются штатными методами. Целью работы явилась разработка методов, направленных на определение стохастических параметров сигнала тока электромеханического оборудования. В рамках работы решены следующие задачи: теоретически показана связь энтропии Шеннона с состоянием электроприводной арматуры; диагностические сигналы оборудования АЭС обработаны с использованием предлагаемых и штатных методов, и показана большая чувствительность энтропии Шеннона по отношению к отдельным видам дефектов.

Ключевые слова: техническая диагностика, токово-временные параметры, спектральный анализ, энтропия Шеннона, АЭС.

Поступила в редакцию 11.12.2016

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика электроприводного оборудования по току двигателя получает всё большее распространение благодаря упрощению, большей оперативности процедуры диагностирования по сравнению с вибрационными, виброакустическими методами [1]. Например, диагностика более тысячи единиц электроприводной арматуры (кранов, клапанов, вентилей, задвижек) стандартного блока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 осуществляется в течение месяца в период планово-предупредительного ремонта. За это время регистрируются сигналы тока электроприводной арматуры при совершении ею операций открытия и закрытия, сигналы подвергаются анализу согласно методике; по результатам анализа формируются протоколы. По результатам диагностирования арматура допускается к дальнейшей эксплуатации, либо подвергается ремонту с использованием ресурсов – механического или электрического цеха в зависимости от обнаруженной неисправности.

В настоящее время отделами технической диагностики АЭС и организациями, ежегодно осуществляющими диагностирование оборудования АЭС, накоплены базы данных диагностических сигналов тока и соответствующих протоколов. Согласно методике, зарегистрированной в госкорпорации "Росатом", по сигналу тока регистрируются токово-временные и спектральные параметры [2]. Одним из важнейших параметров, зарегистрированных по огибающей сигнала тока, является плавность хода, определяемая по формуле:

$$Y_{\%} = \left(1 - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\text{median}}}\right) 100\%, \quad (1)$$

где $I_{\max}$, $I_{\min}$, I_{median} – наибольшее, наименьшее и медианное среднее значения в огибающей сигнала тока (см. рис. 1).

Значение $Y_{\%}$ менее 75% трактуется как неисправное состояние, убывание $Y_{\%}$ как ухудшение.

Использование токово-временных и спектральных показателей удобно на практике, однако данные показатели отражают только детерминированные и отчасти стохастические особенности диагностических сигналов. При этом известно, что диагностические сигналы формируются под влиянием как детерминированных, стохастических, так и хаотических факторов.

В исследованиях [3-6] показано, что развитие дефекта как электрической, так и механической части привода, приводит к отклонениям положения ротора относительно статора. При этом центр масс ротора двигается по траектории, характер которой определяется состоянием машины. С использованием бифуркационных диаграмм показано [6], что по мере развития дефекта наблюдается усложнение траектории. Например, ротор совершает квазипериодические, двух-, трех- и более периодические вращения, переходит к хаотическим движениям, возвращается к упорядоченному восьми-, десятипериодическому вращению, снова переходит к хаотическим движениям. Отклонение ротора от соосности со статором, его сложные движения отражаются в токе статора. В токе статора при наличии дефектов наблюдаются отклонения от синусоидальности, на чем и основан принцип диагностики электроприводного оборудования по току двигателя.

Из-за мгновенных изменений трения, демпфирования или условий нагружения, диагностические сигналы электро-механических систем часто характеризуются нелинейным поведением. Таким образом, методы оценки нелинейного параметра обеспечивают хорошую альтернативу выделения признаков дефектов, скрытых в измеренных сигналах, которые не могут быть эффективно идентифицированы с использованием других методов. Наиболее адекватными в данной ситуации являются методы анализа сигнала, основанные на исследовании информационных характеристик, в частности на оценке энтропийных параметров.

Известен ряд работ по оценке энтропийных параметров – шенноновской, перестановочной и аппроксимационной энтропии [3-5] – рассчитанных по сигналам вибрации диагностируемого оборудования. Однако оценка энтропийных параметров по сигналам тока, потребляемого электромеханическим оборудованием в процессе работы, до сих пор не проводилась. Данная работа представляет определенную трудность ввиду сложности отображения диагностических параметров в сигнале тока. Тем не менее, такая работа актуальна, поскольку диагностика электроприводного оборудования по току двигателя получает всё большее распространение благодаря большей простоте и оперативности диагностирования по сравнению с вибрационными, методам.

Целью настоящей работы является разработка метода, предназначенного для анализа диагностических сигналов тока двигателя электроприводного оборудования, содержащего детерминированные, стохастические и хаотические компоненты. В настоящей работе приводятся результаты вычисления энтропийных показателей сигналов тока электроприводной арматуры, измеренных в промышленных условиях в сравнении с тестовыми сигналами, характеризующими различные состояния объекта.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНТРОПИЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Настоящая работа изучает целесообразность использования Шенноновской энтропии для обнаружения динамических изменений в сигналах тока. Шенноновская энтропия характеризует отклонения данного распределения амплитуд от равномерного распределения по уровням. Если все уровни заполнены равномерно, вероятность

попадания на каждый из уровней одинакова, в этом случае информационная энтропия максимальна. С другой стороны, если значения находятся на одном уровне, то $H_{sh}=0$ [7].

Шенноновская энтропия рассматривается как мера неопределенности в физическом процессе. Переупорядочивание не будет менять значение H_{sh} , поэтому Шенноновская энтропия считается глобальной мерой, отличной от локальных.

Рассматривая дискретный источник, для каждого возможного состояния I устанавливается вероятность. Для нахождения вероятностей p_i был использован следующий алгоритм: в рассматриваемой выборке, состоящей из N значений $\{x_k\}$, находим минимальное (x_{min}) и максимальное (x_{max}) значение. Затем интервал между максимальным и минимальным значением делим на n уровней.

$$\Delta x = \frac{x_{max} - x_{min}}{n}$$

Далее находим число $\{x_k\}$, попавшее в каждый из уровней. После чего рассчитываем вероятность попадания значения из выборки в i -ый уровень.

$$p_i = \frac{\Delta N_i}{N}$$

Для расчёта энтропии используется формула Шеннона (1).

$$H_{sh} = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНТРОПИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Электромеханическая система (которой является электроприводная арматура) состоит из многих деталей, которые взаимодействуют друг с другом, когда машина функционирует. Измеренный сигнал тока, полученный при данном состоянии, сложен из-за отклонения от синусоидальности и шумов [1,8]. Получающийся сигнал становится более сложным при наличии неисправностей [3-5,8].

Было проведено множество измерений для обнаружения неисправностей в электроприводной арматуре. Вычислялись токово-временные и спектральные параметры. С целью исследования целесообразности нетрадиционных статистических методов вычислялась также энтропия Шеннона. Было обнаружено, что диагностические сигналы, кроме сигналов абсолютно исправных состояний, формируют два класса состояний: "отклонения в редукторе и ходовой части" и "отклонения в работе двигателя". Следует отметить, что данная классификация удобна с точки зрения разделения ремонтных работ между электрическим и механическим цехами.

Для того чтобы количественно охарактеризовать состояние электромеханической системы и её деградацию (как рост её дефектов), необходимы тестовые сигналы для обеспечения справочной базы данных. Такие тестовые сигналы были сформированы для представленного исследования, на основании сигналов тока, измеренных на обмотке статора двигателя. В качестве математической модели диагностического сигнала оборудования с разными стадиями дефекта можно рассматривать временной ряд, заданный последовательностью дискретных отсчетов, в котором степень регулярности находится в прямой зависимости от состояния оборудования.

На основании анализа сигналов тока двигателя арматуры при наличии механических дефектов в приводе или ходовом узле был сформирован тестовый сигнал с модуляцией [8]:

$$I = I_T(1 + I_p \sin \omega_p t + I_d \sin \omega_d t) \sin \omega_T t + \delta, \quad (3)$$

где I_T, ω_T – амплитуда и частота рабочего тока ($\omega_T \sim 50$ Гц, I_T – 10 А ради определенности);

I_p, ω_p – характеризуют амплитуду и частоту гармоники ротора, при чем I_p с развитием дефекта растет, а $\omega_p \sim 24$ Гц для определенности;

I_d и ω_d – амплитуда и частота срабатывания дефектного узла, I_d растет с развитием дефекта, а ω_d соответствует частоте срабатывания дефектного узла;

δ – шумовая составляющая, которая моделируется гаусовским шумом и растет при развитии дефекта.

Результаты моделирования механического дефекта представлены в таблице 1: параметры моделирования, вид сигнала спектр и энтропия Шеннона. Видно, что развитие дефекта в сигнале сопровождается увеличением глубины модуляции, а в спектре ростом боковых относительно гармоники тока составляющих гармоник ротора и дефекта. Также видно, что отклонение от синусоидальности резко (более чем в два раза) меняют показатели энтропии Шеннона, однако дальнейшее усугубление специфических признаков дефекта (рост I_p и I_d) не приводит к существенному росту H_{sh} ; дальнейшее возрастание показателя энтропии определяется ростом шумовой составляющей.

Другой тестовый сигнал связан с имитацией класса неисправностей, связанных с работой двигателя. Ряд неисправностей (перекос фаз, короткое замыкание витков) можно описать тестовым сигналом со сложением [8]:

$$I = I_T(1 + I_p \sin \omega_p t) \sin \omega_T t + I_s \sin \omega_s t + \delta \quad (4)$$

здесь I_s и ω_s – амплитуда и частота гармоники скольжения двигателя.

Наличие дефекта характеризуется специфической, отличной от предыдущего представления формой временного сигнала (см. Таблица 1). В спектре данный класс дефектов не всегда сопровождается диагностическими признаками. Также, как в предыдущих представлениях, видно, что отклонение от синусоидальности резко меняют показатели энтропии, однако дальнейшее усугубление специфических признаков дефекта (рост I_p и I_s) не приводит к росту H_{sh} ; дальнейшее возрастание показателя энтропии определяется ростом шумовой составляющей. Даже незначительный (менее 1% относительно амплитуды сигнала) рост шумовой составляющей, практически не определимый по сигналу и спектру, заметно влияет на показатель H_{sh} .

Результат подтверждает, что моделирование значения H_{sh} обеспечивает количественную меру деградации динамического сигнала, который характеризует ухудшение состояния всего механизма.

Таблица 1. – Результаты обработки тестовых сигналов с модуляцией

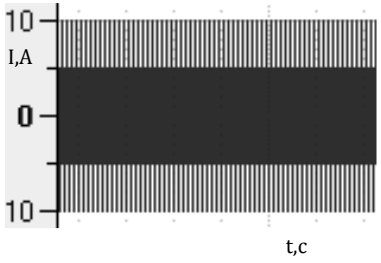
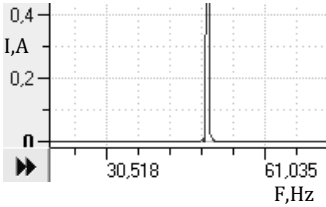
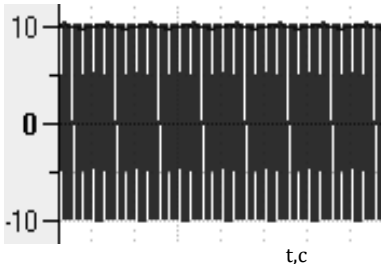
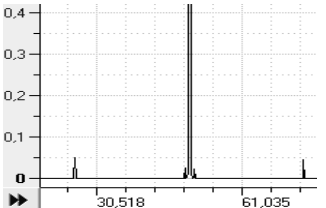
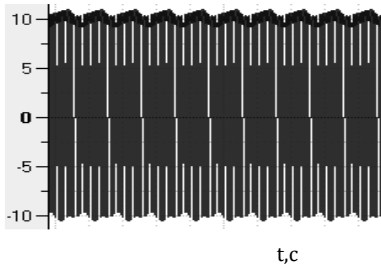
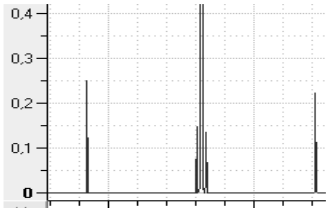
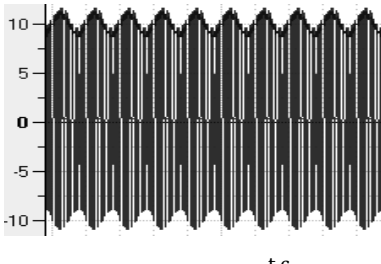
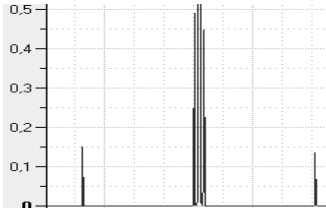
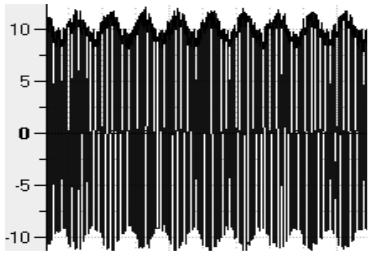
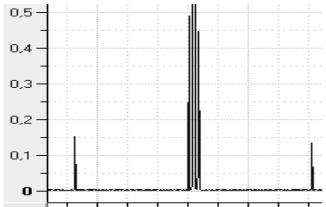
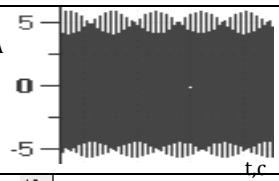
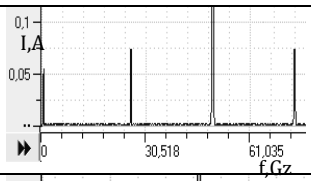
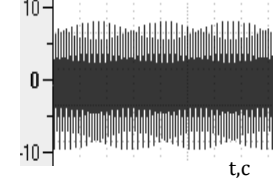
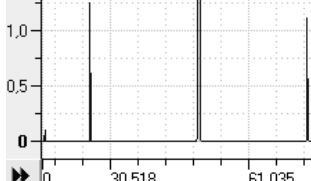
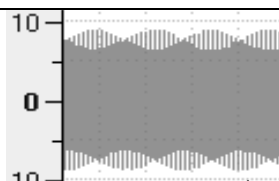
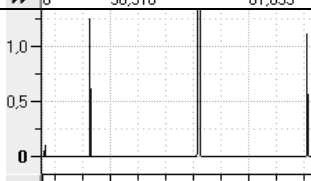
№ п/п	Параметры	Сигнал: изменение тока со временем	Спектр: распределение амплитуд тока по частоте	H_{sh}
1	$I_p = 0$ $I_d = 0$ $\delta = 0$ плавность 100%			4,2
2	$I_p = 0,01$ $I_d = 0,01$ $\delta = 0$ плавность 97%			8,9 (+53%)
3	$I_p = 0,05$ $I_d = 0,03$ $\delta = 0$ плавность 84%			9,3 (+4%)
4	$I_p = 0,03$ $I_d = 0,1$ $\delta = 0$ плавность 74%			9,4 (+1%)
5	$I_p = 0,03$ $I_d = 0,1$ $\delta = 0,03$ плавность 53%			11,1 (+15%)

Таблица 2. – Результаты обработки тестовых сигналов со сложением

№ п/п	Параметры	Сигнал: изменение тока со временем	Спектр: распределение амплитуд тока по частоте	H_{sh}
1	$I_p = 0,07$ $I_s = 0,07$ $\delta = 0$ плавность 80%			10,8
2	$I_p = 0,1$ $I_s = 0,1$ $\delta = 0$ плавность 66%			10,8 (0%)
3	$I_p = 0,1$ $I_s = 0,1$ $\delta = 0,1$ плавность 65%			11,9 (+9%)

ПОКАЗАТЕЛИ ЭНТРОПИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ

Наконец были исследованы показатели энтропии сигналов электроприводной арматуры, эксплуатируемой на производстве. В первую группу были отобраны сигналы оборудования с механическим дефектом (отклонение в работе ходового узла), характеризующиеся модуляцией. Некоторые результаты представлены в таблице 3. Приведены традиционный показатель плавность хода, вид сигнала, спектр и H_{sh} . Первая арматура 1ВК-2 имеет незначительные признаки дефекта в сигнале и спектре и характеризуется самой низкой энтропией. В сигнале второй арматуры 13ГО-01 наблюдаются выраженные диагностические признаки, её состояние близко к модели, описанной в пункте 4 таблицы 1, а показатель энтропии вырос на 37%. Третья арматура по своим диагностическим параметрам признается частично работоспособной, а её показатель энтропии наибольший в выборке.

Во вторую группу были отобраны сигналы оборудования с дефектами электрической части. Некоторые результаты представлены в таблице 4. Сигналы тока искажаются из-за сложения с низкочастотной составляющей в соответствии с формулой 4. Состояние 13ПЭ-01 соответствует модели дефекта в пункте 2 таблицы 2, показатель H_{sh} у тестового и реального сигнала практически одинаков. Арматуры 13ВК-95 и 14ГО-09 находятся в практически одинаковом частично работоспособном состоянии, модель которого приводится в пункте 3 таблицы 2. Показатель H_{sh} у тестового сигнала и сигналов 13ВК-95 и 14ГО-09 практически одинаков.

Можно сказать, что результаты диагностирования электрических и механических дефектов традиционными методами в целом согласуются с тенденцией изменения энтропийного показателя. Преимуществом использования показателя H_{sh} является то, что он чувствителен к изменениям шумовой составляющей, не выявляемым традиционными методами. Другим важным преимуществом показателя H_{sh} является то, что он рассчитывается непосредственно по диагностическому сигналу, не подвергнутому никакой предварительной обработке с целью получения огибающей или спектра.

Таблица 3. – Результаты обработки диагностических сигналов с модуляцией

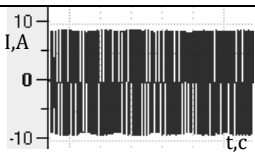
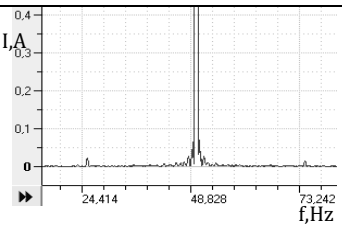
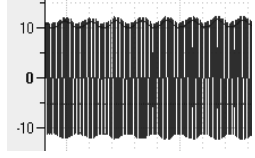
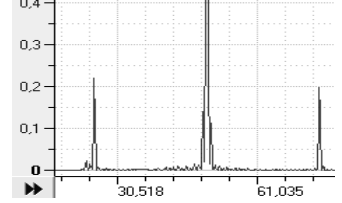
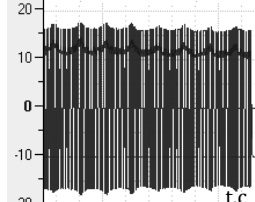
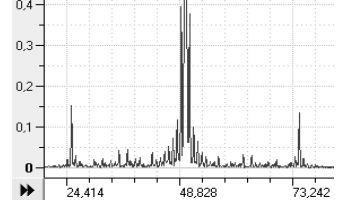
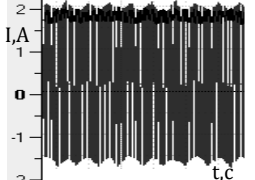
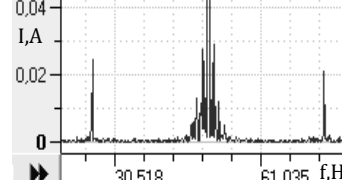
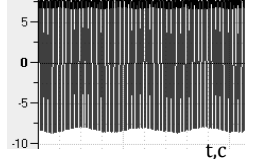
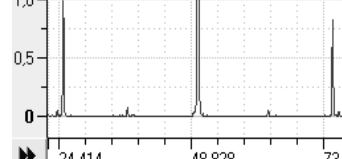
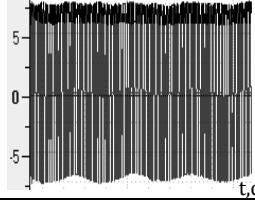
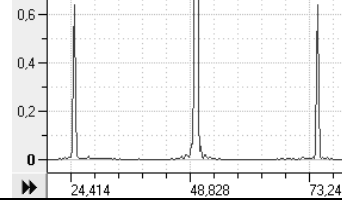
№ п/п	Номер/ плавность	Сигнал: изменение тока со временем	Спектр: распределение амплитуд тока по частоте	H_{sh}
1	1ВК-2 89%			6,6
2	13ГО-01 79%			10,4 (+37%)
3	14КГП-03 57%			11,9 (+13%)

Таблица 4. – Результаты обработки диагностических сигналов со сложением

№ п/п	Номер/ плавность	Сигнал: изменение тока со временем	Спектр: распределение амплитуд тока по частоте	H_{sh}
1	13ПЭ-01 76%			10,9
2	13ВК-95 73%			11,6 (+6%)
3	14ГО-09 70%			11,5 (-1%)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Энтропия Шеннона оказалась эффективной мерой для индикации состояния электромеханической системы. Исследования диагностических сигналов тока электроприводной арматуры показали, что ухудшение состояния оборудования может

быть эффективно идентифицировано по увеличению значений H_{sh} (например, увеличение, на 45% при наличии развитого дефекта по сравнению с незначительным дефектом). Значения H_{sh} оказались чувствительны как к механическим, так и к электрическим дефектам.

Продолжаются исследования по анализу сигналов тока при различных типах дефектов и на различных типах двигателей и приводов с целью дальнейшей проверки широкой применимости этого метода для мониторинга работоспособности и диагностики электроприводного оборудования. Кроме того, исследуется возможность использования энтропии Шеннона и других энтропийных параметров с целью реализации прогноза остаточного ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаменков, А.К. и др. Опыт разработки стационарных систем диагностики арматуры. [Текст] / А.К. Адаменков, А.В. Матвеев, В.В. Головлев, М.Г. Рязанова, А.Б. Ярышев, С.М. Иванов // Арматуростроение. – 2009. – №1(58). – С. 77–80.
2. Слепов, М.Т. и др. Технологии анализа диагностических параметров электроприводной арматуры на действующих энергоблоках Нововоронежской АЭС. [Текст] / Е.А. Абидова, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева, М.Т. Слепов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – №4. – С. 16–22.
3. Lei, Y., Z. He, and Y. Zi, A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. Expert Systems with Applications, 2008. 35(4): p. 1593-1600.
4. Zhang, L., et al., Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference. Expert Systems with Applications, 2010. 37(8): p. 6077-6085.
5. P. Thota, H. Dankowicz, Tc-hat: a novel toolbox for the continuation of periodic trajectories in hybrid dynamical systems, SIAM Journal of Applied Dynamical Systems 7(2008) 1283-1322.
6. He, Q., Wang, L. and Liu, B. 2007. Parameter estimation for chaotic systems by particle swarm optimization. Chaos, Solitons and Fractals 34: 654-61.
7. Чумак, О.В. Энтропия и фракталы в анализе данных [Текст] / О.В. Чумак. – М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с.
8. Абидова, Е.А. Идентификация информационных процессов в системе диагностики электроприводной арматуры атомных станций: автореф. дис. канд. техн. наук [Текст] / Е.А. Абидова. – Волгоград, 2011. – 18 с.

REFERENCES

- [1] Adamenkov A.K., Matveev A.V., Golovlev V.V., Ryazanova M.G., Yaryshev A.B., Ivanov S.M. Opyt razrabotki stacionarnykh sistem diagnostiki armatury [Experience of stationary systems development of fitting diagnostics]. Armaturostroenie [Armature Engineering], 2009, №1(58), pp. 77–80. (in Russian)
- [2] Slepov M.T., E.A. Abidova, V.N. Nikiforov, O.Yu. Pugacheva. Tekhnologii analiza diagnosticheskikh parametrov elektropivodnoy armatury na deystvuyushhih energobloках Novovoronezhskoy AES [Technologies of the analysis of diagnostic parameters of electrodriving fittings at the New Voronezh NPP]. Elektrotexnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya [Electrotechnical complexes and control systems], 2014, №4, ISSN 1990-5246, pp. 16–22. (in Russian)
- [3] Lei, Y., Z. He, and Y. Zi, A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. Expert Systems with Applications, 2008. 35(4): p. 1593-1600. DOI: 10.1016/j.eswa.2007.08.072 (in English)
- [4] Zhang, L., et al., Bearing fault diagnosis using multi-scale entropy and adaptive neuro-fuzzy inference. Expert Systems with Applications, 2010. 37(8): p. 6077-6085. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.02.118 (in English)
- [5] P. Thota, H. Dankowicz, Tc-hat: a novel toolbox for the continuation of periodic trajectories in hybrid dynamical systems, SIAM Journal of Applied Dynamical Systems 7(2008) 1283-1322. DOI:10.1137/070703028 (in English)
- [6] He, Q., Wang, L. and Liu, B. 2007. Parameter estimation for chaotic systems by particle swarm optimization. Chaos, Solitons and Fractals 34: 654-661. DOI: 10.1155/2016/3795961 (in English)
- [7] Chumak O.V. Entropiya i fraktaly v analize dannykh [Entropy and fractals in the data analysis]. M. Izhevsk: Pub. NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika» [SIC "Regular and chaotic

- dynamics"], Institut kompyuternyh issledovanij [Institute of Computer Science], 2011, ISBN 978-5-93972-852-2, 164 p. (in Russian)
- [8] Abidova E.A. Identifikaciya informacionnyh processov v sisteme diagnostiki elektroprivodnoj armatury atomnyh stancij [Identification of information processes in the motorized valve diagnostic system of nuclear power plants]: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk [Thesis abstract of PhD in Engineering]. – Volgograd, 2011. – 18 p. (in Russian)

Diagnosis of Valves Using Entropy Indicators

E.A. Abidova, L.S. Hegay, A.V. Chernov, O.E. Draka, O.J. Pugachyova

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 34736
e-mail: nii_energomash@mail.ru*

Abstract – Diagnosing of the NPP electromechanical equipment demands development of the methods directed to control of wear degree in engine current signal. It is shown that wear influences stochastic signal parameters which aren't estimated by regular methods. The objective of work is development of the methods directed to determination of stochastic parameters of current signal. The following problems are solved: the Shannon's entropy connection with a condition of electrodriving fittings is theoretically shown; diagnostic signals of the NPP equipment are processed with use of offered and regular methods, and big sensitivity of the Shannon's entropy in relation to separate types of defects is shown.

Ключевые слова: technical diagnostics, current and time parameters, spectral analysis, Shannon's entropy, NPP.

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ
ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 159.9:62

**МИНИМИЗАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА
НА НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗАВАРИЙНОСТЬ РАБОТЫ АЭС И
ДРУГИХ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ЗА СЧЕТ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ ЗАНЯТИЙ¹**

© 2016 М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина, А.М. Алюшин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Работа посвящена влиянию человеческого фактора на надежность и безаварийность работы атомных электростанций. Рассматривается образовательная технология проведения учебно-тренировочных занятий всех видов подготовки персонала к работе на АЭС, использующая адаптацию учебной нагрузки к текущему функциональному и психоэмоциональному состоянию обучающихся непосредственно в процессе занятий. Предлагаемая технология основывается на объективной информации, получаемой в автоматическом режиме с помощью дистанционных неконтактных технологий регистрации биопараметров человека в сугубо пассивном режиме.

Ключевые слова: образовательная технология, АЭС, мониторинг текущего состояния, неконтактные дистанционные технологии, биологическая обратная связь.

Поступила в редакцию 10.12.2016

Глубокое владение теоретическими, методическими и практическими знаниями, а также умение воспользоваться ими в реальной рабочей обстановке эксплуатации АЭС, либо других опасных объектов, особенно в аварийных и нештатных ситуациях, во многом обуславливает надежность и безаварийность эксплуатации таких объектов. Особое значение в этом плане приобретают современные образовательные технологии, основанные на контроле текущего психоэмоционального состояния обучающихся [1-10].

Учебно-тренировочные занятия на полномасштабных тренажерах дают возможность отработать навыки управления во всех штатных и наиболее вероятных нештатных режимах эксплуатации вышеупомянутых объектов. Мониторинг динамики изменения текущего функционального и психоэмоционального состояния оперативного персонала в этом случае является инструментом, дающим возможность оценить степень его готовности к действиям в аварийных и нештатных ситуациях [11]. Показательным в этом плане является такой важный и информативный параметр, как время реакции [12, 13]. На практике технологии мониторинга текущего состояния человека используются также для решения задач профессионального отбора [14] и тренировки стрессоустойчивости [15], в первую очередь, для работников «критических» профессий.

Применительно к таким видам плановых учебных занятий, как лекции, семинары, лабораторные и практические занятия, мониторинг текущего функционального и

¹ Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) № 16-18-00069 «Снижение риска возникновения и уменьшение последствий катастроф техногенного происхождения за счет минимизации влияния человеческого фактора на надежность и безаварийность работы АЭС и других опасных объектов».

психоэмоционального состояния обучающихся является инструментом, позволяющим осуществить так называемую биологическую обратную связь (БОС) между обучающимися и преподавателем. Реализация такой связи на практике дает возможность преподавателю, в первую очередь, правильно планировать и перераспределять в течение занятий учебную нагрузку, что позволяет повысить усвояемость учебного материала, а значит - повысить эффективность учебных занятий. Особое значение данное обстоятельство имеет при проведении учебных занятий в вечернее время после трудового дня, а также при повышении квалификации работников с жестким учебным временным графиком.

В нашем исследовании была разработана технология проведения учебных занятий, основывающаяся на непрерывном мониторинге текущего функционального и психоэмоционального состояния каждого из обучающихся с последующим получением интегральной оценки для текущего состояния всей учебной группы. Получаемые оценки текущего состояния обучающихся основываются на объективной информации, получаемой при непрерывной регистрации их основных биопараметров [16, 17] в оптическом [18] и акустическом [19-20] спектрах излучения в полностью пассивном режиме. Данная информация обрабатывается автоматически с помощью специализированного программно-аппаратного комплекса на базе персонального компьютера.

Преподаватель получает обработанную таким образом информацию в виде графика, отображающего временную зависимость интегральной оценки $G(t)$, характеризующей состояние всей учебной группы. Данная характеристика интегрирует в себе индивидуальные оценки $G_i(t)$ каждого обучающегося:

$$G(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G_i(t),$$

где $G_i(t)$ – интегральный показатель текущего состояния для i -го студента;
 N – общее число студентов в учебной группе.

На рисунке 1 показан типичный вид рабочего окна программы, отображающего данную временную зависимость. Для устранения шумов, обусловленных двигательной активностью обучающихся, одновременно отображается профильтрованная (сглаженная на временном участке) зависимость $GM(t)$:

$$GM(t) = \frac{1}{T_M} \int_{t=0}^{T_M} G(t) dt,$$

где T_M – временной интервал усреднения.

Временной интервал усреднения T_M обычно выбирается из диапазона 30-200 с, что, с одной стороны, обеспечивает достаточно эффективное устранение шумов в исходной зависимости $G(t)$, и, с другой стороны, не маскирует измеряемые временные изменения текущего состояния обучающихся. Использование меньших временных интервалов усреднения $T_M < 30$ С приводит к менее эффективному подавлению шумов, обусловленных двигательной активностью обучающихся. Применение больших временных интервалов сглаживания $T_M > 200$ С позволяет улучшить подавление шумов, но при этом ухудшается временная разрешающая способность по выявлению быстрых временных изменений психоэмоционального состояния группы.

Представленные на рисунке 1 зависимости отражают изменение состояния учебной группы в течение 4-часовых занятий (1, 2, 3 и 4 – занятия продолжительностью по 45 минут; 5, 6, 7 – перерывы для отдыха длительностью, соответственно, 5, 10 и 5 минут).

Весь диапазон возможных значений интегральной функции $G(t)$ разделен на 4 участка, соответствующих сильно напряженному состоянию – 8; напряженному

состоянию – 9; нормальному рабочему состоянию – 10; расслабленному сонному состоянию – 11.

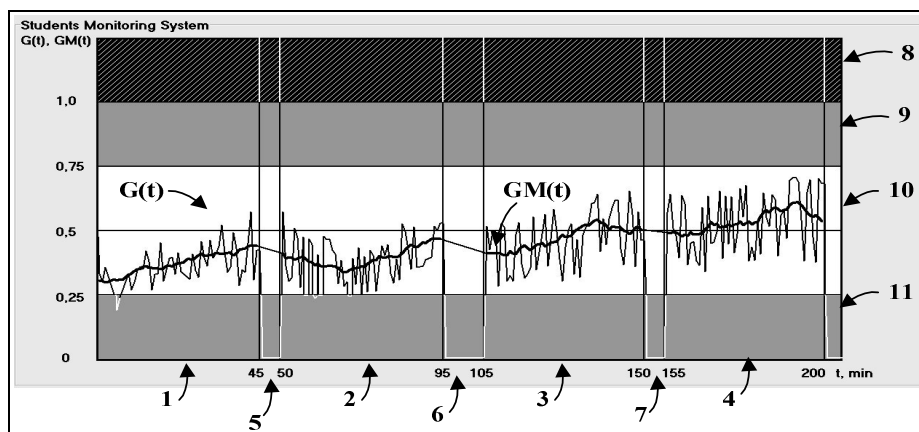


Рис. 1. – Результаты мониторинга текущего состояния учебной группы

В случае квалификации текущего состояния учебной группы как сильно напряженного, либо расслабленного, система сообщает преподавателю о необходимости изменения режима занятий. В первом случае появляется условный графический знак – вентилятор, во втором случае – будильник. Для нормального рабочего состояния учебной группы отображается условный знак – зеленая лампочка.

Разработанные методические, а также программно-аппаратные средства мониторинга текущего психоэмоционального и функционального состояния обучающихся могут быть применены для решения следующих основных задач:

- организации учебно-тренировочных занятий с БОС на основе непрерывного мониторинга текущего психоэмоционального и функционального состояния обучающихся с целью обеспечения высокого уровня восприимчивости и усвояемости новых знаний;

- оценки степени профессиональной подготовки при проведении практических занятий и контрольных мероприятий фиксированной сложности;

- повышению стрессоустойчивости и умения правильно действовать в нештатных и аварийных ситуациях, в том числе, в условиях постоянно изменяющейся обстановки, а также при воздействии различных мешающих и отвлекающих факторов.

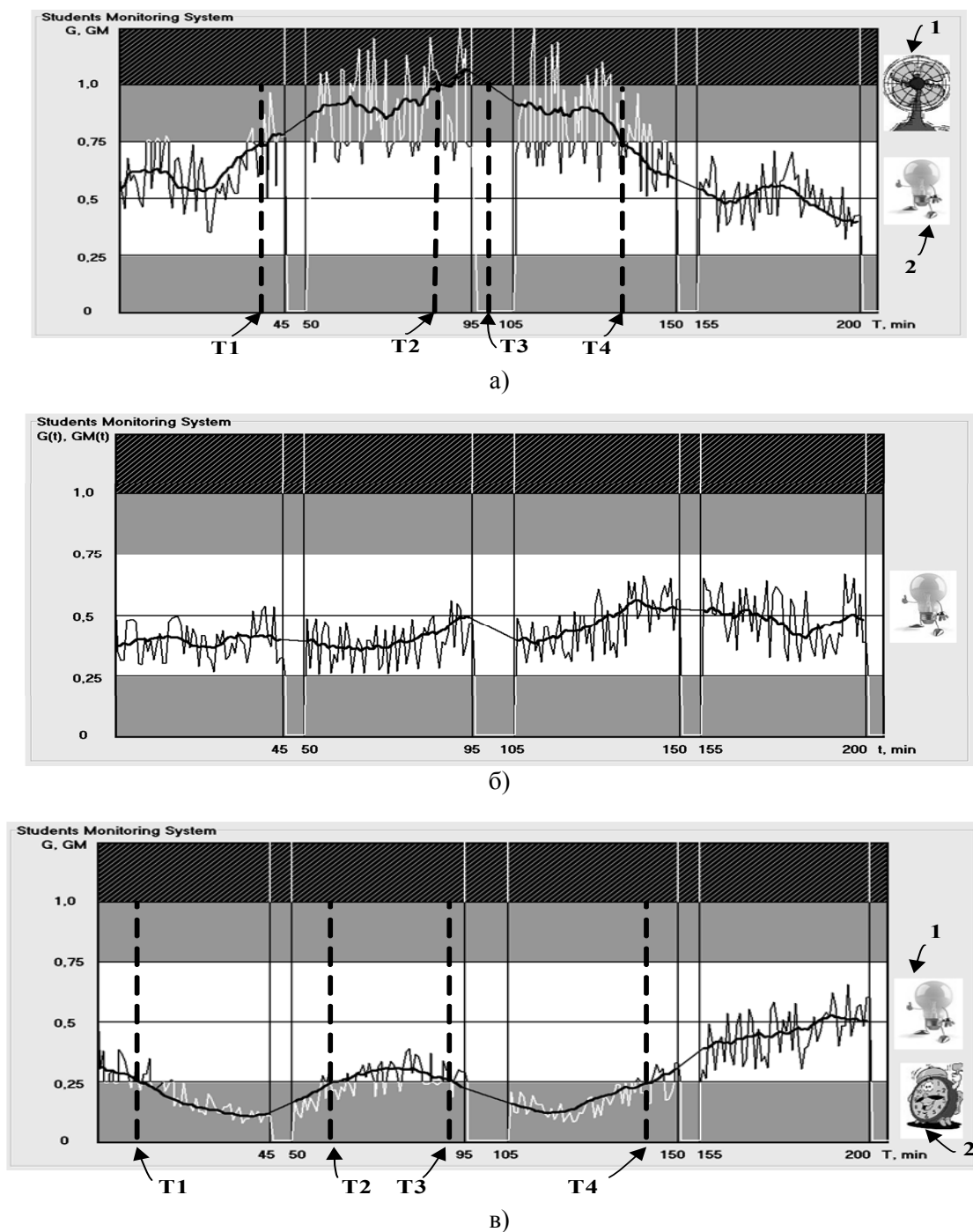
В таблице 1 показан достигаемый положительный эффект от применения разработанных средств мониторинга для различных решаемых задач профессиональной подготовки.

Таблица 1. – Достигаемый положительный эффект при использовании разработанных средств

№ пп	Тип учебно-тренировочного занятия	Достигаемый положительный эффект
1.	Лекции, семинары, лабораторные работы и практические занятия планового характера	Повышение эффективности плановых учебно-тренировочных занятий за счет обеспечения нормального рабочего состояния обучающихся. Повышение мастерства преподавателя.
2.	Практические занятия, контрольные мероприятия с фиксированной сложностью	Объективная оценка приобретенных базовых знаний и профессиональных навыков
3.	Практические занятия, контрольные мероприятия с изменяемой сложностью решаемых задач в условиях действия стрессоров различного характера	Объективная оценка уровня стрессовой нагрузки, объективная оценка умения правильно действовать в нештатных ситуациях

Типичными примерами учебно-тренировочных занятий с БОС могут являться лекционные, семинарские и практические занятия с преподавателем (консультантом, специалистом, тренером), при проведении которых преподаватель контролирует текущий уровень усталости, возбуждения, расслабленности учебной группы и предпринимает необходимые действия по обеспечению нормального рабочего психоэмоционального и функционального состояния обучающихся.

На рисунке 2 показаны наиболее типичные примеры возможных сценариев проведения учебно-тренировочных занятия с БОС.



а – учебно-тренировочные занятия высокой интенсивности;
б – занятия нормальной интенсивности; в – занятия низкой интенсивности

Рис. 2. – Типичные сценарии организации учебно-тренировочных занятий с БОС

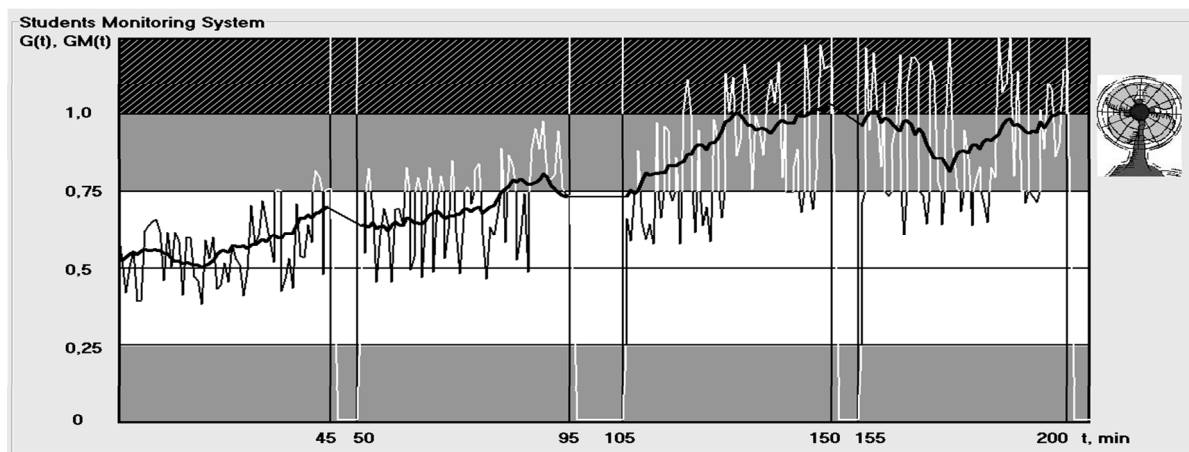
Так, на рисунке 2а представлен пример проведения учебно-тренировочных занятий высокой интенсивности. С начала проведения занятий до момента времени T1 текущее психоэмоциональное и функциональное состояние учебной группы являлось нормальным рабочим. В силу, скорее всего, высокого темпа изложения нового и, судя по всему, сложного материала в промежутки времени от T1 до T2 состояние группы изменилось и стало напряженным. В силу того, что характер учебного процесса не изменился, начиная с момента времени T2 напряжение еще более возросло, о чем преподаватель был проинформирован с помощью условного знака 1 (вентилятор - рис. 2а). Принимая этот факт во внимание, преподаватель изменил тактику и стиль изложения материала. В результате чего, начиная с момента времени T3, напряжение в группе стало спадать и, начиная с момента времени T4, ситуация в группе полностью нормализовалась, о чем преподаватель был проинформирован с помощью условного знака 2 (лампочка).

Рисунок 2б иллюстрирует пример проведения учебно-тренировочных занятий с нормальным рабочим состоянием группы в течение всего времени занятий. Это, в частности, является следствием повышения мастерства преподавателя по планированию учебной нагрузки в течение занятий, для совершенствования которого крайне важны занятия с БОС.

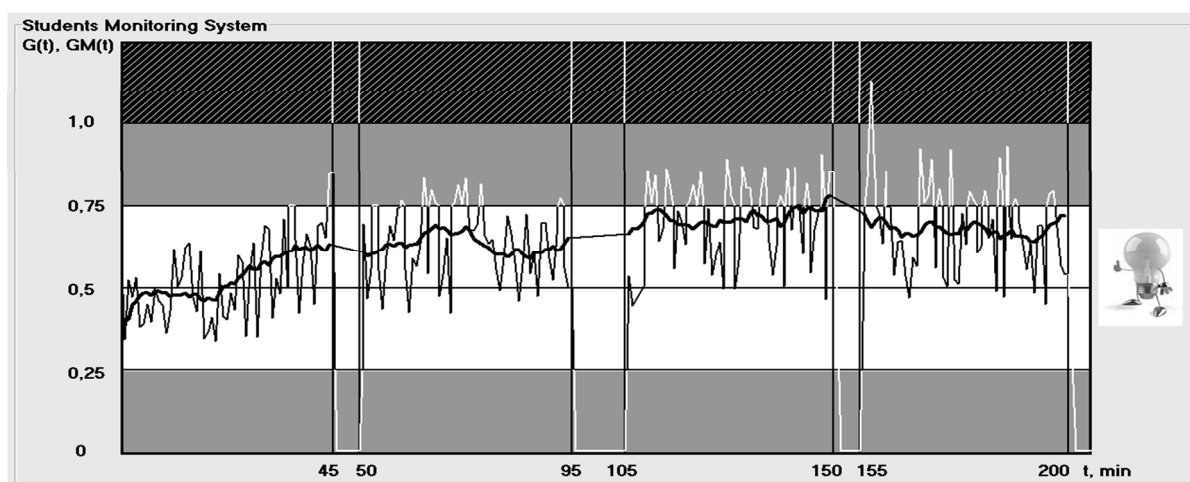
На рисунке 2в представлен пример проведения учебно-тренировочных занятий либо с плохой организацией учебного процесса, либо типичный пример занятий в послеобеденное время. До момента времени T1 текущее состояние группы оценивалось как нормальное (система мониторинга отображала условный знак 1 (лампочку)). В промежутках времени T1-T2 и T3-T4 система мониторинга оценивала текущее состояние группы как сильно расслабленное, либо сонное, о чем преподаватель был извещен с помощью условного знака 2 (будильник). Изменив стиль и темп изложения материала, преподавателю удалось нормализовать состояние группы в течение четвертого часа занятий.

Типичными примерами практических занятий либо контрольных мероприятий с фиксированной сложностью могут быть задачи по осуществлению функций управления опасным объектом для поддержания штатных режимов работы объекта (запуск, остановка, повышение мощности, снижение мощности). Применительно к обычному образовательному процессу типичными примерами лабораторных либо контрольных работ с фиксированной сложностью являются учебные либо аттестационные задания по проектированию электронного устройства заданного класса с помощью изучаемой системы автоматизированного проектирования. Анализ динамики изменения состояния обучающихся как в периодически повторяемом процессе выполнения практических, так и контрольных заданий дает возможность объективно оценить уровень владения профессиональными знаниями и практическими навыками.

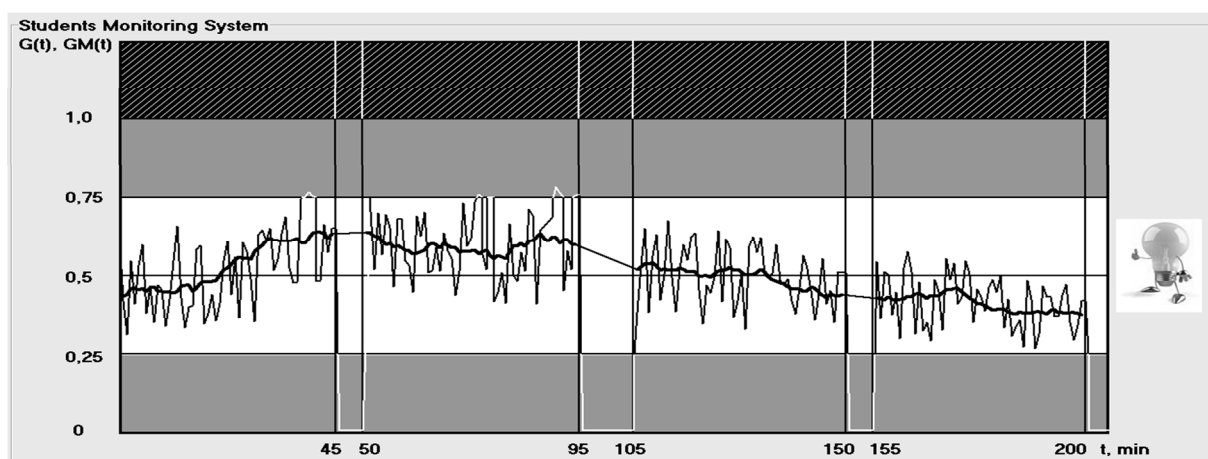
На рисунке 3 представлены наиболее типичные примеры проведения практических занятий либо контрольных мероприятий фиксированной сложности. Так, на рис. 3а представлен пример изменения текущего состояния учебной группы при выполнении задания в первый раз. Постоянный рост психоэмоционального напряжения свидетельствует об определенном уровне испуга, неготовности к решению такого рода заданий, а также о недостаточном умении применять полученные теоретические и методические знания на практике. На рис. 3б и рис. 3в представлены типичные примеры изменения состояния группы при повторных выполнениях аналогичных по сложности заданий. Примеры, представленные на рис. 3б и рис. 3в дают возможность оценить уровень профессиональной подготовки соответственно как хороший и отличный.



а)



б)

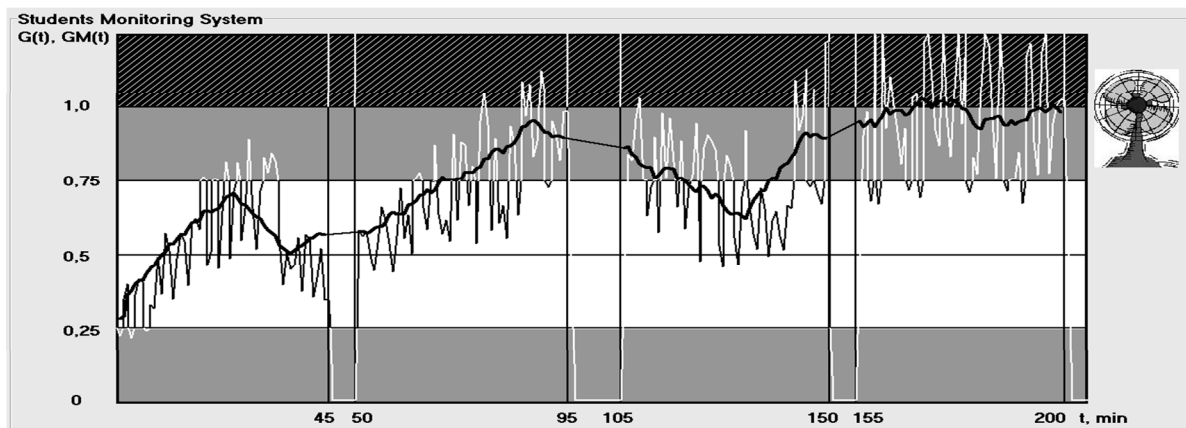


в)

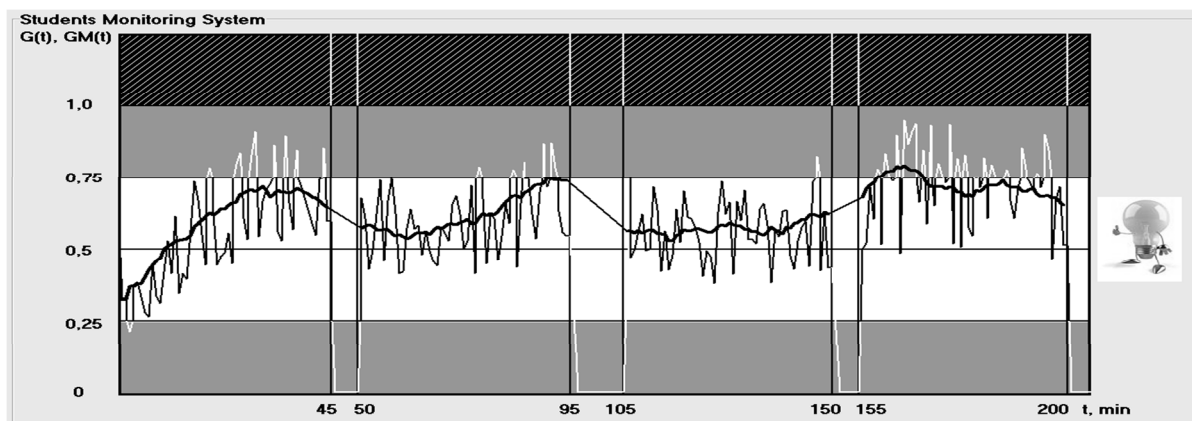
а – недостаточный уровень профессиональной подготовки; б – удовлетворительный уровень подготовки;
в – хороший уровень подготовки

Рис. 3. – Занятия и контрольные мероприятия фиксированной сложности:

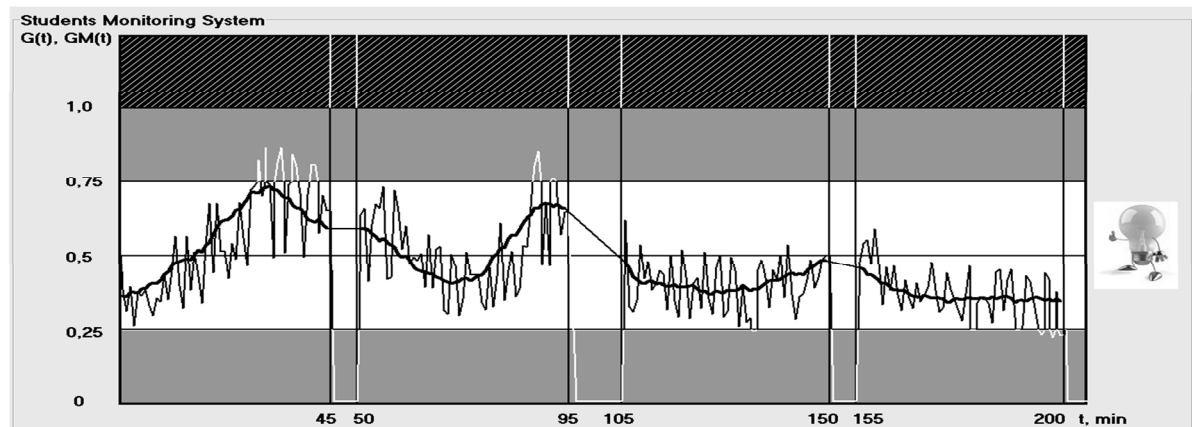
На рисунке 4 представлены примеры использования системы мониторинга текущего психоэмоционального и функционального состояния учебной группы для оценки и тренировки стрессоустойчивости.



а)



б)



в)

а – низкий уровень стрессоустойчивости; б – удовлетворительный уровень стрессоустойчивости;
в – высокий уровень стрессоустойчивости

Рис. 4. – Практические занятия и контрольные мероприятия с изменяемой сложностью решаемых задач в условиях действия стрессоров различного характера

Данный вид учебно-тренировочных занятий обычно предполагает выполнение заданий с изменяемой сложностью в условиях действия стрессоров различного характера. Изменение сложности выполняемых заданий, а также появление мешающих и отвлекающих факторов может происходить неожиданно. Так, например, применительно к выполнению практических работ по управлению опасным объектом

моменты времени появления одиночных, либо множественных сбоев и отказов в работе агрегатов объекта заранее неизвестны. В качестве мешающих и отвлекающих факторов при проведении учебно-тренировочных занятий, в первую очередь на тренажерах, обычно используются акустические и оптические сигналы различного уровня мощности [12]. Так, на приведенных на рисунке 4 графиках отображено изменение текущего состояния учебной группы при появлении стрессоров в начале первого и второго часов занятий, а также в середине третьего часа занятий в виде неожиданного усложнения выполняемого задания с одновременным воздействием акустических и оптических помех. Типичные примеры зарегистрированной динамики изменения текущего психоэмоционального состояния группы, представленные на рис. 4а, рис. 4б и рис. 4в свидетельствуют соответственно о достаточно низком, удовлетворительном и высоком уровне стрессоустойчивости. Последний пример отчетливо свидетельствует не только о высоком уровне владения профессиональными знаниями, но также об умении группы использовать на практике технологии самоконтроля и саморегуляции, что позволило ей нормализовать свое психоэмоциональное состояние, несмотря на воздействие трех факторов, вызывающих стресс. В результате – к концу четвертого часа занятий группа готова к дальнейшим адекватным действиям по управлению опасным объектом.

В этом плане пример, показанный на рисунке 4а свидетельствует как о низком уровне владения профессиональными знаниями, так и о низкой стрессоустойчивости. В результате к концу четвертого часа занятий группа в своей массе, судя по всему, практически утратила способность предпринимать правильные и своевременные действия по управлению опасным объектом. Вывод – необходимы дополнительные учебно-тренировочные занятия как по повышению уровня профессиональных знаний и практических навыков, так и специальных тренировочных занятий по развитию навыков самоконтроля и саморегуляции с целью повышения стрессоустойчивости.

Таким образом, реализация предлагаемой образовательной технологии на практике позволяет повысить эффективность учебно-тренировочных занятий, а значит – минимизировать влияние человеческого фактора на надежность и безаварийность работы АЭС и других опасных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мельникова, И.А. и др. Биологическая обратная связь (БОС): терапевтические возможности метода и перспективы его использования в психиатрии (аналитический обзор) [Текст] / И.А. Мельникова, А.В. Низова // Российский психиатрический журнал. – 2003. – №1. – С. 68–72.
2. Frank D.L., Khorshid L., Kiffer J.F., Moravec C.S., McKee M.G. Biofeedback in Medicine: Who, When, Why and How? *Ment. Health in Fam. Med.*, 2010, Vol. 7(2), pp. 85–91.
3. Зотов, М.В. и др. Физиологические показатели устойчивости человека к воздействию информационного стресса [Текст] / М.В. Зотов, В.М. Петрукович, В.И. Шостак. – 2009. – Вып. 4. – С. 255–261.
4. Barcala L., Grecco L.A., Colella F., Lucareli P.R., Salgado A.S., Oliveira C.S. Visual Biofeedback Balance Training Using Wii Fit after Stroke: A Randomized Controlled Trial. *J. Phys. Ther. Sci.*, 2013, Vol. 25, №8, pp. 1027–1032.
5. Bouchard S., Bernier F., Boivin E., Morin B., Robillard G. Using Biofeedback While Immersed in a Stressful Videogame Increases the Effectiveness of Stress Management Skills in Soldiers. *PLoS One*, 2012, Vol. 7, №4, pp. 361–369.
6. Caldwell J.A., Caldwell J.L. Fatigue in Military Aviation: an Overview of US Military-Approved Pharmacological Countermeasures. *Aviat. Space Environ. Med.*, 2005, Vol. 76, Suppl. 7, pp. 39–51.
7. McLay R.N., Spira J.L. Use of a Portable Biofeedback Device to Improve Insomnia in a Combat Zone, a Case Report. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*, 2009, Vol. 34, №4, pp. 319–321.
8. Nishimura, C. Model of Learning Process for Biofeedback and its Relation to the Neural Network. *Biobehavioral Self-regulation*. Tokyo: Pub. Springer-Verlag, 1995, pp. 115–119.
9. Pollock S., Lee D., Keall P., Kim T. Audiovisual Biofeedback Improves Motion Prediction Accuracy. *Med. Phys.* 2013, Vol. 40, No 4. P. 1705.

10. Зарипов, А.А. и др. Современные представления об использовании принципа биологической обратной связи в коррекции функционального состояния организма у сотрудников силовых ведомств при сменном режиме деятельности [Текст] / А.А. Зарипов, Р.В. Потапов, Е.Н. Ашанина // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2015. – №2. – С. 86–99.
11. Алюшин, М.В. и др. Методологические аспекты автоматизированного прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного происхождения [Текст] / М.В. Алюшин, В.М. Алюшин, Л.В. Колобашкина // Вопросы психологии. – 2016. – №2. – С. 83–90.
12. Алюшин, М.В. и др. Экспериментальное исследование времени реакции человека в условиях действия акустических помех [Текст] / М.В. Алюшин, В.М. Алюшин // Вопросы психологии. – 2016. – №1. – С. 163–168.
13. Алюшин, М.В. и др. Методика измерения времени реакции оператора управления [Текст] / М.В. Алюшин, В.М. Алюшин // Вопросы психологии. – 2015. – №5. – С. 157–165.
14. Алюшин, М.В. и др. Профессиональный отбор персонала по психологическим качествам на основе методов, разработанных в рамках теории принятия решений [Текст] / М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина, А.В. Хазов // Вопросы психологии. – 2015. – №2. – С. 88–94.
15. Алюшин, М.В. и др. Психологический тренинг стрессоустойчивости на основе дистанционных неконтактных технологий регистрации биопараметров [Текст] / М.В. Алюшин, В.Н. Абрамова, Л.В. Колобашкина // Вопросы психологии. – 2014. – №6. – С. 144–152.
16. Алюшин, М.В. и др. Мониторинг биопараметров человека на основе дистанционных технологий [Текст] / М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина // Вопросы психологии. – 2014. – №6. – С. 135–144.
17. Алюшин, М.В. и др. Дистанционные и неконтактные технологии регистрации биопараметров оперативного персонала как средство управления человеческим фактором и повышения безопасности АЭС [Текст] / М.В. Алюшин, А.В. Алюшин, Л.О. Андрияшина, Л.В. Колобашкина, В.В. Пшенин // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №3(8). – С. 69–77.
18. Алюшин, М.В. и др. Оптические технологии для систем мониторинга текущего функционального состояния оперативного состава управления объектами атомной энергетики [Текст] / М.В. Алюшин, А.В. Алюшин, В.М. Белопольский, Л.В. Колобашкина, В.Д. Ушаков // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №2(7). – С. 69–77.
19. Алюшин, В.М. Диагностика психоэмоционального состояния на основе современных акустических технологий [Текст] / В.М. Алюшин // Вопросы психологии. – 2015. – №3. – С. 145–152.
20. Алюшин, М.В. и др. Акустические технологии для «интеллектуальных» систем мониторинга функционального состояния оперативного состава управления объектами атомной энергетики [Текст] / М.В. Алюшин, В.М. Алюшин, С.В. Дворянкин, Л.В. Колобашкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №4(9). – С. 63–71.

REFERENCES

- [1] Melnikova I.A., Nizova A.V. Biologicheskaya obratnaya svyaz (BOS): terapevticheskie vozmozhnosti metoda i perspektivy ego ispolzovaniya v psikhiiatrii (analiticheskiy obzor) [Biological Feedback (BF): therapeutic opportunities of a method and the prospect of its use in psychiatry (analytical review)]. Rosciyskiy psikhiiatricheskiy zhurnal [Russian psychiatric journal], 2003, №1, ISSN 1560-957X, pp. 68–72. (in Russian)
- [2] Frank D.L., Khorshid L., Kiffer J.F., Moravec C.S., McKee M.G. Biofeedback in Medicine: Who, When, Why and How? Ment. Health in Fam. Med., 2010, Vol. 7(2), pp. 85–91. (in English)
- [3] Zotov M.V., Petrukovich V.M., Shostak V.I. Fiziologicheskies pokazateli ustoychivosti cheloveka k vozdeystviyu informatsionnogo stressa [Physiological indicators of resistance of the person to influence of information stress]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta: Seriya 12: Psikhologiya. Sotsiologiya. Pedagogika [Bulletin of the St. Petersburg university: Ser. 12: Psychology. Sociology. Pedagogics], 2009, Vol. 4, ISSN 1995-0047, pp. 255–261. (in Russian)
- [4] Barcala L., Grecco L.A., Colella F., Lucareli P.R., Salgado A.S., Oliveira C.S. Visual Biofeedback Balance Training Using Wii Fit after Stroke: A Randomized Controlled Trial. J. Phys. Ther. Sci., 2013, Vol. 25, №8, pp. 1027–1032. (in English)
- [5] Bouchard S., Bernier F., Boivin E., Morin B., Robillard G. Using Biofeedback While Immersed in a Stressful Videogame Increases the Effectiveness of Stress Management Skills in Soldiers. PLoS One, 2012, Vol. 7, №4, pp. 361–369. (in English)
- [6] Caldwell J.A., Caldwell J.L. Fatigue in Military Aviation: an Overview of US Military-Approved Pharmacological Countermeasures. Aviat. Space Environ. Med., 2005, Vol. 76, Suppl. 7, pp. 39–51. (in English)

- [7] McLay R.N., Spira J.L. Use of a Portable Biofeedback Device to Improve Insomnia in a Combat Zone, a Case Report. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*, 2009, Vol. 34, №4, pp. 319–321. (in English)
- [8] Nishimura, C. Model of Learning Process for Biofeedback and its Relation to the Neural Network. *Biobehavioral Self-regulation*. Tokio: Pub. Springer-Verlag, 1995, pp. 115–119. (in English)
- [9] Pollock S., Lee D., Keall P., Kim T. Audiovisual Biofeedback Improves Motion Prediction Accuracy. *Med. Phys.* 2013. Vol. 40, No 4. P. 1705. (in English)
- [10] Zaripov A.A., Potapov R.V., Ashanina E.N. Sovremennye predstavleniya ob ispolzovanii printsipa biologicheskoy obratnoy svyazi v korrektsii funktsionalnogo sostoyaniya organizma u sotrudnikov silovykh vedomstv pri smennom rezhime deyatel'nosti [Modern ideas of use of the principle of biological feedback in correction of a functional condition of an organism at the staff of security agencies at the replaceable mode of activity]. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*, 2015, №2, ISSN 1995-4441, pp. 86–99. (in Russian)
- [11] Alyushin M.V., Alyushin V.M., Kolobashkina L.V. Metodologicheskie aspekty avtomatizirovannogo prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy tekhnogenno proiskhozhdeniya [Methodological aspects of the automated forecasting of emergency situations of technogenic origin]. *Voprosy psikhologii* [Psychology issues], 2016, №2, ISSN 0042-8841, pp. 83–90. (in Russian)
- [12] Alyushin M.V., Alyushin V.M. Eksperimentalnoe issledovanie vremeni reaktsii cheloveka v usloviyakh deystviya akusticheskikh pomekh [Pilot study of time of person reaction in the conditions of action of acoustic hindrances]. *Voprosy psikhologii* [перевод], 2016, №1. ISSN 0042-8841, pp. 163–168. (in Russian)
- [13] Alyushin M.V., Alyushin V.M. Metodika izmereniya vremeni reaktsii operatora upravleniya [Technique of measurement of time of operator reaction]. *Voprosy psikhologii* [Psychology issues], 2015, №5, ISSN 0042-8841, pp. 157–165. (in Russian)
- [14] Alyushin M.V., Kolobashkina L.V., Khazov A.V. Professionalnyy otbor personala po psikhologicheskim kachestvam na osnove metodov, razrabotannykh v ramkakh teorii prinyatiya resheniy [Professional selection of personnel on psychological qualities according to the methods developed within the of decision-making theory]. *Voprosy psikhologii* [Psychology issues], 2015, №2, ISSN 0042-8841, pp. 88–94. (in Russian)
- [15] Alyushin M.V., Abramova V.N., Kolobashkina L.V. Psikhologicheskiy trening stressoustoychivosti na osnove distantsionnykh nekontaktnykh tekhnologiy registratsii bioparametrov [Psychological training of resistance to stress on the basis of remote non-contact technologies of bioparameter registration.]. *Voprosy psikhologii* [Psychology issues], 2014, №6, ISSN 0042-8841, pp. 144–152. (in Russian)
- [16] Alyushin M.V., Kolobashkina L.V. Monitoring bioparametrov cheloveka na osnove distantsionnykh tekhnologiy [Monitoring of person bioparameters of the on the basis of remote technologies]. *Voprosy psikhologii* [Psychology issues], 2014, №6, ISSN 0042-8841, pp. 135–144. (in Russian)
- [17] Alyushin M.V., Alyushin A.V., Andryushina L.O., Kolobashkina L.V., Pshenin V.V. Distantsionnye i nekontaktnye tekhnologii registratsii bioparametrov operativnogo personala kak sredstvo upravleniya chelovecheskim faktorom i povysheniya bezopasnosti AES [Remote and non-contact technologies of registration of bioparameters of operation personnel as control facility human factor and increases in safety of the NPP]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global nuclear safety], 2013, №3(8), ISSN 2305-414X, pp. 69–77. (in Russian)
- [18] Alyushin M.V., Alyushin A.V., Belopolskiy V.M., Kolobashkina L.V., Ushakov V.D. Opticheskie tekhnologii dlya sistem monitoringa tekushchego funktsionalnogo sostoyaniya operativnogo sostava upravleniya obektami atomnoy energetiki [Optical technologies for systems of monitoring of the current functional state of management of nuclear power objects]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost*, 2013, №2(7), ISSN 2305-414X, pp. 69–77. (in Russian)
- [19] Alyushin V.M. Diagnostika psikhooemotsionalnogo sostoyaniya na osnove sovremennykh akusticheskikh tekhnologiy [Diagnostics of a psychoemotional state on the basis of modern acoustic technologies]. *Voprosy psikhologii* [Psychology issues], 2015, №3, ISSN 0042-8841, pp. 145–152. (in Russian)
- [20] Alyushin M.V., Alyushin V.M., Dvoryankin S.V., Kolobashkina L.V. Akusticheskie tekhnologii dlya «intellektualnykh» sistem monitoringa funktsionalnogo sostoyaniya operativnogo sostava upravleniya oektami atomnoy energetiki [Acoustic technologies for "intellectual" systems of monitoring of a functional condition of management of nuclear power objects]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global nuclear safety], 2013, №4(9), ISSN 2305-414X, pp. 63–71. (in Russian)

Minimizing of the Human Factor Impact on the Reliability and Safety of the NPP and other Dangerous Objects by Improving the Effectiveness of Training Sessions

M.V. Alyushin¹, L.V. Kolobashkina², A.M. Alyushin³

National Research Nuclear University «MEPhI»,

Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, Russia 115409

¹ e-mail: *MVAlyushin@mephi.ru* ; ² e-mail: *LVKolobashkina@mephi.ru* ;

³ e-mail: *amalyushin@mephi.ru*

Abstract – The article is devoted the human factor impact on the reliability and safety of the NPP. We consider the educational technology of the training sessions of all kinds, using the adaptation of the training load to the current functional and psycho-emotional students' state directly in the process of training. The proposed technology is based on the objective information obtained automatically using the remote non-contact detection technologies of person bioparameters in a purely passive mode.

Keywords: educational technology, NPP, health monitoring, remote non-contact technology, biofeedback.

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И
СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ
ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 378.016:621.039

**РОЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ В ФОРМИРОВАНИИ
ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ ВЫПУСКНИКОВ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

© 2016 Г.Б. Беляева, А.Г. Сироткина, А.Б. Макарец, Г.А. Федоренко

Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Саров, Нижегородская обл., Россия

В статье рассматриваются проблемы повышения качества профессиональной подготовки студентов научных и инженерно-технических направлений подготовки, обосновывается необходимость усиления роли экономической подготовки и формирования компетенций, отвечающих требованиям предприятий – работодателей атомной отрасли. Также обосновывается необходимость включения в вариативную часть учебных планов дополнительного образовательного модуля. Предложена структура модуля, включающая учебные дисциплины, изучение которых будет способствовать развитию у будущих молодых специалистов навыков инновационной и организационной экономической деятельности.

Ключевые слова: научное, инженерно-техническое образование, экономическая подготовка, формирование дополнительных профессиональных компетенций, образовательный модуль.

Поступила в редакцию 15.12.2016

Серьезным вызовом, который стоит перед экономикой нашей страны, является риск нарастания технологического отставания. Его преодоление связано с последовательным переходом на инновационное развитие, восстановлением роста производительности труда, проведением реформ, направленных на развитие человеческого капитала. Высокие показатели экономического роста не могут быть достигнуты без подготовки квалифицированных специалистов, способных разрабатывать и менять технологии, адаптироваться к новым условиям труда, уметь быстро обучаться.

Научно-производственным комплексам атомной отрасли (НПК) РФ, выполняющим государственный оборонный заказ, требуются исследователи, инженерно-технические специалисты в области ядерной науки, атомной энергетики, информационных технологий, инжиниринга и реинжиниринга бизнес-процессов. В отрасли определена потребность в конкурентоспособных научных и инженерных кадрах, готовых к развитию новых идей, решению исследовательских, производственных задач, способных к инновационной инженерной деятельности и к принятию нестандартных решений. Сегодня выпускники инженерных профессий должны владеть знаниями в прорывных направлениях науки и техники, уметь системно, критически и креативно мыслить, быть готовыми к инновационной и предпринимательской деятельности.

Особая острота задачи подготовки и квалификационного отбора кадров для атомной отрасли вызвана чрезвычайно высокой степенью ответственности работников, занятых в этой отрасли, что требует не только соответствующего уровня их

первоначальной подготовки, но и способности к самообразованию, саморазвитию, совершенствованию имеющихся и приобретению новых профессиональных умений и навыков [1].

В процессе подготовки научных инженерных кадров в отечественных вузах приоритет отдается углубленному естественно-научному и математическому образованию, а также практико-ориентированной целевой подготовке. При этом акцент делается на развитие таких профессиональных компетенций выпускников, как способность к проведению научных исследований и освоению современных технологий [2].

Однако, нельзя не отметить некоторую оторванность образовательной среды от реального сектора, разрыв между фундаментальным образованием и необходимыми профессиональными компетенциями и навыками, требуемыми работодателями.

Проведенные нами интервью с представителями Российского Федерального Ядерного Центра – Всесоюзного научно-исследовательского института экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») позволяют выделить следующие проблемы в качестве подготовки выпускников научных и инженерных направлений:

- отсутствие навыков самостоятельного анализа научно-исследовательских проектов, производственных ситуаций, выбора в пользу рациональных решений, прогнозирования их возможных последствий;
- недостаточный уровень знаний экономических факторов при планировании деятельности и ее обосновании;
- отсутствие способности вести переговоры, убеждать, презентовать достигнутые результаты.

Коллективы ученых и специалистов атомной отрасли, в которые приходят выпускники, ставят перед собой, прежде всего, исследовательские цели, стремятся своими силами осуществлять разработку и продвижение наукоемкой продукции, как объекта интеллектуальной собственности. Однако, отсутствие должной подготовки в области технологического предпринимательства, непонимание того, что потребителям необходимы новые возможности и новые выгоды, блокируют процесс эффективного вовлечения новых технологий в хозяйственный оборот. Большинство проблем с внедрением инноваций на рынок объясняется тем, что у выпускников естественно-научных и технических направлений подготовки отсутствуют предпринимательские компетенции. Они не могут грамотно провести генерацию, отбор и реализацию инновационных идей на основе портфельных матриц и дисконтированного денежного потока, проанализировать конкурентоспособность и жизненный цикл продукта, создать бизнес-структуру способную реализовать современные высокие технологии в производстве новых товаров и услуг, с последующим выходом с ними на рынки [3].

Очевидно, что изменение целей и содержания профессиональной подготовки инженеров-исследователей, инженеров-конструкторов, инженеров-технологов и т.д. требует формирования качественно новых компетенций, позволяющих анализировать востребованность инновационных идей и проектов с точки зрения их социально-экономических и организационно-экономических возможностей их реализации. Таким образом, роль экономического образования в формировании будущего специалиста должна быть усилена.

Именно экономическая подготовка позволяет сформировать особые компетенции по оценке перспектив научно-технического развития ядерно-оружейного комплекса (ЯОК) и направлений конверсионной деятельности предприятий, по управлению инновационными проектами, развитию навыков предпринимательства и командной работы, способностей к межличностным коммуникациям, воспитанию лидерских

качеств и ответственности [4].

Саровский физико-технический институт – филиал Национального-исследовательского ядерного университета «МИФИ» (СарФТИ НИЯУ МИФИ) осуществляет подготовку бакалавров и магистров по следующим направлениям:

- прикладная математика и информатика;
- прикладная математика и физика;
- информатика и вычислительная техника;
- информационные системы и технологии;
- электроника и нанoeлектроника;
- прикладная механика;
- конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Обобщим важнейшие компетенции выпускников по данным направлениям подготовки, утвержденные в образовательных стандартах высшего образования НИЯУ МИФИ, которые должны быть сформированы, в первую очередь, на основе изучения социально-экономических дисциплин:

- способность использовать основы экономических знаний в различных сферах деятельности;
- способность демонстрировать осведомленность в сфере проектного бизнеса, знание и понимание влияния рисков и изменяющихся условий;
- способность участвовать в проведении предварительного технико-экономического анализа проектных расчетов;
- способность проводить расчет экономической эффективности;
- способность участвовать в работах по поиску оптимальных решений отдельных видов продукции с учетом требований динамики и прочности, долговечности, безопасности жизнедеятельности, качества, стоимости, сроков исполнения и конкурентоспособности;
- использование на практике умений и навыков в организации исследовательских и проектных работ и работе в составе коллектива;
- готовность к внедрению результатов научно-технических исследований в реальный сектор экономики и коммерциализации разработок [5].

Учебные планы подготовки бакалавров включают базовую дисциплину «Экономика» (2 кр.ед.). В результате ее изучения студенты получают знания о категорийном аппарате микро – и макроэкономики, современных экономических концепциях и экономических моделях, закономерностях функционирования экономической системы в целом, основах поведения потребителя и производителя. В состав дисциплин по выбору вариативной части планов включены дисциплины «Менеджмент» (2 кр.ед.) или «Маркетинг» (2 кр.ед.), в результате освоения которых выпускники должны владеть методами и приемами анализа управленческих процессов с помощью стандартных теоретических моделей менеджмента, методами разработки и реализации маркетинговых программ, технологиями позиционирования и репозиционирования продукта и т.д.

В образовательные программы подготовки магистров вошли два курса по выбору: «Управление проектами» (4 кр.ед.) или «Бизнес-планирование научной деятельности» (4 кр.ед.). Магистры по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» изучают дисциплину «Инноватика организации и управления в производстве» (4 кр.ед.). Цель обучения – развитие нестандартного мышления, формирование социальной ответственности за принимаемые научно-технические решения, формирование компетенций лидерства и предпринимательства.

Таким образом, количество кредитных единиц на экономические дисциплины по

направлениям подготовки бакалавров и магистров технических направлений составляет по 4 кредита (144 час.).

Практика экономической подготовки позволяет сделать вывод о том, что, реализовать эти цели и обеспечить требуемый образовательными стандартами уровень сложно в силу следующих причин:

- политики выпускающих кафедр, ориентирующихся исключительно на узко профессиональную подготовку, в результате которой из учебных планов «исчез» ряд конкретных экономических дисциплин, отражающих специфику отраслевой экономики;

- значительного уменьшения числа часов на изучение экономических дисциплин;

- слабых междисциплинарных связей и отсутствия системности в обучении, которое «рассыпано» по отдельным дисциплинам;

- отказа от включения в выпускные квалификационные работы бакалавров и магистерские диссертации экономической составляющей (технико-экономического обоснования, расчета экономической эффективности, затрат и т.д.) по ряду технических направлений подготовки.

Мы полагаем, что инновационные преобразования в подготовке инженерно-технических кадров без выполнения экономической подготовки таких функций, как развивающая (подготовка к экономической деятельности с определенным уровнем знаний и умений), социальная (экономическая социализация выпускников вуза, включение в экономические отношения через экономическую деятельность), воспитательная (формирование экономического мышления и востребованных рынком деловых качеств экономически воспитанной личности) [6], не смогут обеспечить формирование у выпускников инженерного вуза компетенций, соответствующих требованиям разработанных профессиональных стандартов для специалистов научно-производственных комплексов и предприятий Госкорпорации «Росатом».

Современный этап развития высшего инженерного образования характеризуют макроуровневые интеграционные процессы, усиление роли обобщающих знаний, синтез идей и понятий из разных учебных дисциплин. Образовательные стандарты высшего образования НИЯУ МИФИ обеспечивают расширение возможностей, обогащения, динамичного обновления содержаний и структуры направлений подготовки. В них предусматривается академическая свобода вуза и возможность для студентов формировать индивидуальную образовательную траекторию с целью профессиональной подготовки, которая необходима для их дальнейшего профессионального и личностного роста. Особое внимание уделяется формированию исследовательской компетенции студентов.

Это дает возможность разрабатывать и внедрять образовательные программы подготовки акцентированные, в том числе, на изучении основ предпринимательства, процессах создания инноваций, методах организации бизнеса в высокотехнологичных отраслях, защите интеллектуальной собственности, коммерциализации научных разработок. Процесс обучения, на наш взгляд, необходимо строить в направлении целесообразного сочетания базовых и вариативных частей учебных планов, включения в них дисциплин, являющихся основой для подготовки к инновационной деятельности. Новая информация, новые знания, навыки, способности творческого мышления, способности руководить и работать в командах взаимосвязаны. Они формируют новые компетенции, включающие способности практически преобразовывать знания и внутренний потенциал личности в умения решать общие и профессиональные задачи, а также способности практически преобразовывать знания и внутренний потенциал личности в целях создания инновационных научных продуктов, инновационного

развития социальной сферы.

Построение гибкого, широко и глубоко дифференцированного вариативного компонента обучения нового поколения научных и инженерных кадров для атомной отрасли связано с необходимостью усилить роль экономической подготовки, которая создаст условия для многопрофильной дифференциации содержания обучения и повысит конкурентоспособность выпускников на рынке труда.

В сложившихся условиях для повышения эффективности экономической подготовки будущих специалистов для наукоемких, высокотехнологичных сфер деятельности и производств ядерно-оружейного комплекса (ЯОК) ГК «Росатом» необходимо усиление в образовательном процессе роли вариативного компонента, включающего специальные дисциплины, ориентированные на формирование ранее перечисленных компетенций и требования работодателей. Принципиальным является его модульное построение, как одного из ключевых принципов, заложенных в стандартах высшего образования третьего поколения. Модуль мы рассматриваем как самостоятельную, дополнительную единицу учебного плана по направлению подготовки, представляющую набор учебных дисциплин, включенных в него по содержательно-тематическому принципу и отвечающих требованиям квалификационных характеристик.

В рамках дополнительного образовательного модуля должны решаться следующие задачи подготовки выпускников:

- развитие прогностически ориентированного экономического мышления;
- формирование профессиональных компетенций, выходящих за рамки образовательных стандартов, по определенным направлениям подготовки;
- формирование дополнительных профессиональных компетенций междисциплинарного характера;
- формирование готовности и способности к созданию инновационной продукции и управлению инновациями;
- развитие способностей к профессиональному и личностному совершенствованию, к работе в команде.

Предлагаемая структура дополнительного образовательного модуля представлена на рисунке 1.

Компоновка учебных дисциплин в модуле не случайна. Они посвящены либо углублению знаний, либо новым направлениям, выходящим за рамки дисциплин базовой части, либо комплексу проблем, решение которых требует синтеза знаний из различных предметных областей. Дополнительный образовательный модуль формировался с учетом следующих требований к рабочим программам дисциплин:

- соответствие образовательным стандартам направлений подготовки и направленность на формирование и развитие общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций;
- программа должна содержать новые знания, методы и приемы, не входящие в программу дисциплины базовой части;
- в программу должны быть включены современные научные достижения и практические разработки;
- программа должна отражать практическую направленность подготовки, позволяющей изучить современные приемы и методы, используемые в экономической и управленческой деятельности;
- изучаемый материал курса должен активизировать познавательный интерес к организационно-экономическим проблемам, мотивировать к исследовательской, проектной деятельности и её обоснованию, к самореализации в профессии;
- изучаемый материал курса должен способствовать развитию экономической

компетентности выпускников, расширять возможности их специализации с учетом потребностей реального сектора экономики и существующего рынка труда;

– программа должна быть обеспечена преподавателями с квалификацией должного уровня.

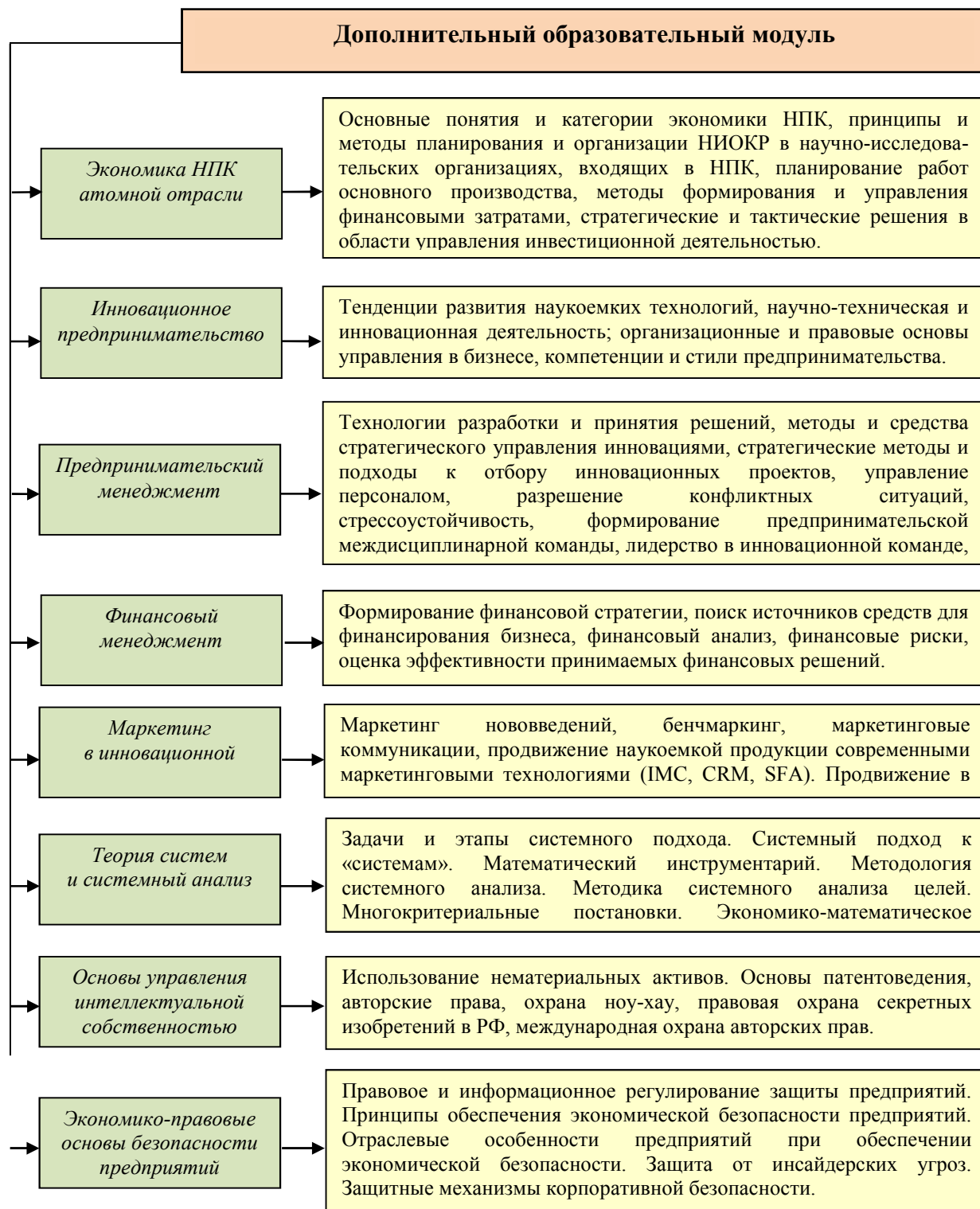


Рис. 1. – Структура дополнительного образовательного модуля

Таким образом, при формировании структуры дополнительного образовательного модуля оценивалось образовательное, профориентированное, развивающее и воспитательное значение каждой учебной дисциплины, входящей в его состав.

Реализация образовательного модуля будет способствовать изучению будущими специалистами формирования потребностей общества в новой технике и технологиях, освоению способов их удовлетворения, развитию навыков изучения рынков современной технической продукции, овладению методами и инструментами мониторинга конкурентной среды, методами управления интеллектуальной собственностью. Они приобретут знания в области системного планирования на всех фазах жизненного цикла проекта, овладеют навыками решения комплекса экономических задач и проведения вариативных расчетов при выборе управленческих решений, оценке эффективности и поиску источников финансирования научно-технических разработок, формированию бюджетов.

Состав дисциплин в модуле может рассматриваться как примерный и меняться при адаптации его к требованиям профилей базовой подготовки.

Положение экономических, как и других гуманитарных дисциплин в вузах технического профиля достаточно спорно. Руководители выпускающихся кафедр не всегда должным образом воспринимают тот факт, что выпускники должны владеть приемами не только научного, технического, но и организационно-экономического и инновационного обеспечения целей и задач научных и производственных организаций атомной отрасли.

Как для вуза, так и для работодателей принципиально важным становится содержательное обновление образовательных программ с включением в них дисциплин предлагаемого модуля. Но реализовать эту задачу без партнерства экономических кафедр с выпускающими невозможно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руденко, В.А. и др. Основные проблемы организации подготовки специалистов для атомной отрасли в условиях внедрения профессиональных стандартов [Текст] / В.А. Руденко, С.А. Томилин, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №3. – С. 80–87.
2. Чубик, П.С. и др. Подготовка элитных специалистов в области техники и технологий [Текст] / П.С. Чубик, А.И. Чучалин, М.А. Соловьев, О.М. Замятина // Вопросы образования. – 2013. – №2. – С. 188–208.
3. Беляева, Г.Д. и др. Подготовка кадров для инновационной экономики в условиях модернизации системы высшего профессионального образования [Электронный ресурс] / Г.Д. Беляева, А.Б. Макарец, Г.А. Федоренко // Современные проблемы науки и образования – 2012. – №6. – Режим доступа: URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7572> – 10.12.2016.
4. Беляева, Г.Д. и др. Становление системы подготовки кадров для высокотехнологического инновационного предпринимательства [Текст] / Г.Д. Беляева, А.Б. Макарец // Институционализация связей вузов с инновационным сектором экономики: Сборник научных трудов научно-практической конференции 18-19 октября 2007 г. / редкол.: Н.П. Макаркин (отв. ред.) [и др.]. – Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2007. – С. 41–45.
5. Образовательные стандарты направлений подготовки СарФТИ НИЯУ МИФИ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://sarfti.ru/?page_id=2458 – 10.12.2016.
6. Шайдуллина, Р.М. и др. Экономическая подготовка как средство экономической социализации студентов технического вуза [Электронный ресурс] / Р.М. Шайдуллина, Л.Т. Бахтигареева, Р.Р. Степанова // Современные проблемы науки и образования – 2015. – №2 (часть 2) – Режим доступа: URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22325> – 10.12.2016.

REFERENCES

- [1] Rudenko V.A., Tomilin S.A., Vasilenko N.P. Osnovnye problemy organizatsii podgotovki spetsialistov dlia atomnoi otrasli v usloviiakh vnedreniia professionalnykh standartov [The main

- problems of the organization of specialist training for nuclear industry in the conditions of professional standards introduction]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global nuclear safety], 2016, №3, ISSN 2305-414X, pp. 80–87. (in Russian)
- [2] Chubik P.S., Chuchalin A.I., Solov'ev M.A., Zamiatina O.M. Podgotovka elitnykh spetsialistov v oblasti tekhniki i tekhnologii [Training of elite experts in the field of the equipment and technologies]. *Voprosy obrazovaniia* [Problems of education], 2013, №2, ISSN 1814-9545, pp. 188–208. (in Russian)
- [3] Beliaeva G.D., Makarets A.B., Fedorenko G.A. Podgotovka kadrov dlia innovatsionnoi ekonomiki v usloviakh modernizatsii sistemy vysshego professionalnogo obrazovaniia [Training for innovative economy in the conditions of modernization of higher education system]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Modern problems of science and education], 2012, №6, ISSN 2070-7428. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7572> (in Russian)
- [4] Beliaeva G.D., Makarets A.B. Stanovlenie sistemy podgotovki kadrov dlia vysokotekhnologicheskogo innovatsionnogo predprinimatelstva [Formation of training system for high-tech innovative business]. *Institutsionalizatsiia svyazi vuzov s innovatsionnym sektorom ekonomiki: Sbornik nauchnykh trudov nauchno-prakticheskoi konferentsii 18-19 oktiabria 2007 g.* [Institutionalization of communications of higher education institutions with innovative sector of economy: Collection of scientific works of a scientific and practical conference, October 18-19, 2007.] Saransk: Pub. Mordovskogo universiteta [Mordovian university], 2007. pp. 41–45. (in Russian)
- [5] Obrazovatelnye standarty napravlenii podgotovki SarFTI NIaU MIFI [Educational standards of the directions of training of SARFTI NRNU MEPhI]. Available at: http://sarfti.ru/?page_id=2458 (in Russian)
- [6] Shaidullina R.M., Bakhtigareeva L.T., Stepanova R.R. Ekonomicheskaya podgotovka kak sredstvo ekonomicheskoi sotsializatsii studentov tekhnicheskogo vuza [перевод]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia* [Economic training as means of economic socialization of technical university students], 2015, №2(Vol. 2), ISSN 2070-7428, Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22325> (in Russian)

Role of Economic Training in Professional Competences Formation of Technical Higher Education Institutions Graduates for Nuclear Industry

G.B. Belyaeva, A.G. Sirotkina, A.B. Makarets, G.A. Fedorenko

*Sarov State Physics and Technical Institute
the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
6 Duhov St., Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia 607186
e-mail: sarfti@mephi.ru*

Abstract – In article problems of improvement of vocational training quality of students of technical specializations are considered. Need of strengthening of economic training role and competence formation in nuclear industry is proved. Need of additional educational module in curricula variable part is proved. The structure of the module including subject matters which studying will promote development in future young specialists of innovative and organizational economic activity skills is offered.

Keywords: scientific education, engineering education, economic training, formation of additional professional competences, educational module.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Абидова Е.А.	69	Макарец А.Б.	89
Альмасри Х.Ф.	62	Мотовилин В.Д.	50
Алюшин А.М.	78	Нгуен Данг Тао	32
Алюшин М.В.	78	Подрезов Н.Н.	22
Беляева Г.Б.	89	Пугачёва О.Ю.	69
Бурдаков С.М.	16	Рейн Н.В.	50
Волкова З.С.	50	Рыбачук А.М.	27
Губеладзе А.Р.	16	Сироткина А.Г.	89
Губеладзе О.А.	16	Сурин В.И.	50
Денисов Р.А.	50	Томилин С.А.	22
Доронин А.Ю.	43	Ульянов В.Ю.	7
Доронин Ю.В.	43	Федоренко Г.А.	89
Драка О.Е.	69	Хегай Л.С.	69
Елохин А.П.	7	Чернов А.В.	69
Колобашкина Л.В.	78	Шишов В.В.	21
Крысько Н.В.	27		

AUTHOR INDEX OF VOL. 4, 2016

Abidova E.A.	69	Kolobashkina L.V.	78
Almasri H.F.	62	Krysko N.V.	27
Alyushin A.M.	78	Makarets A.B.	89
Alyushin M.V.	78	Motovilin V.D.	50
Belyaeva G.B.	89	Nguyen Dang Thao	32
Burdakov S.M.	16	Podrezov N.N.	22
Chernov A.V.	69	Pugachyova O.J.	69
Denisov R.A.	50	Rhine N.V.	50
Doronin A.Yu.	43	Rybachuk A.M.	27
Doronin Yu.V.	43	Shishov V.V.	22
Draka O.E.	69	Sirotkina A.G.	89
Elokhin A.P.	7	Surin V.I.	50
Fedorenko G.A.	89	Tomilin S.A.	22
Gubeladze A.R.	16	Ulyanov V.Yu.	7
Gubeladze O.A.	16	Volkova Z.S.	50
Hegay L.S.	69		

NOTES FOR AUTHORS

1) The full text of article intended for publication has to be followed by representation of establishment in which work is made, and is signed by authors.

2) The file has to contain the expert resolution on publication possibility.

3) Information attached:

- A file with information about the authors in Russian and English (a surname, a name, a middle name, a work place, a position, an academic degree, a rank, postal address, and E-mail address, contact phone . If there are some authors, specify who to be corresponded with);

- A file with information about place of employment in Russian and English, including the postal address with an index. If there are several authors, to specify the place of employment of each author);

- the title of article and initials of authors in Russian and English;

- the abstract in Russian and English;

- UDC index;

- keywords in Russian and English.

4) The volume of article has to be no more than 12 pages of the typewritten text, including tables, the list of references (15–25 sources) and drawings (no more than 10).

5) Article has to be typed according to rules of a computer typing. Only one article is located in one file (in case of submission of two articles and more). Information of point 3 are a part of the article and have to be also submitted in electronic form.

Article should be issued in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Page parameters: all sides are 2,5 cm. Use of any other fonts is possible only by way of exception if they are entered to a file code. Please do not use signs of forced transfer and additional gaps. Vectorial values are selected with a bold-face type.

The equation editor of Equation 3.0 is only used to record the formulas. Large formulas need to be broken on some lines, and each new line is a new object. It is forbidden to scale formulas. Typing formulas it is necessary to use the following sizes: the text – 11 pf, a large index – 8 pf, a small-sized index – 6 pf, the large character – 12 pf, the small-sized character – 10 pf. Formulas shouldn't include signs of a punctuation and numbering in composition.

The article should contain only the most necessary formulas; it is desirable to refuse the intermediate calculations. Only those formulas which have references are numbered. Numbering of formulas should be shown through the whole article. Tables should have titles and numbering, only the standard abbreviations are allowed. The tables are desirable not to exceed one page of the text. The number of tables shouldn't exceed the number of pages.

Figures and diagrams must be black-and-white, 800x600 in size, with signatures. Diagrams should be issued in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format and only in the separate file (each diagram on a new page, or in the new file).

Units of measure should be given according to the International system (SI).

6) References are given at the end of article in order they mention. References are highlighted with square brackets in the text only to the published materials. References to foreign sources are given in original language.

7) The Publication Ethics.

The editors of the “Global Nuclear Safety” Journal work in accordance with the international publication ethics principles, including but not limited to privacy policy, vigilance over the scholarly publications, consideration of possible conflict of interests, etc. The editorial board follows the recommendations of the Committee on Publication Ethics (<http://publicationethics.org/>) and valuable practice of world-leading journals and publishers.

Authorship. All persons designed as “authors” should meet the criteria of the concept. Each author should have participated sufficiently in the work to take responsibility for its content. Authorship credit should be based on the following facts:

a) substantial contribution to conception and design, acquisition of data, or analysis and interpretation of data;

b) drafting the article or reviewing and introducing fundamental changes in it;

c) final approval of the version to be published.

Acquisition of funding or collection of data, as well as general supervision of the research group alone does not constitute authorship.

Editors of the “Global Nuclear Safety” journal has the right to request and publish information about the contributions of each person in writing the article.

All contributors who do not meet the criteria for authorship should be listed in the section “Acknowledgements”. The group of authors/contributors should jointly make the decision about the order in which their names are given.

The authors are responsible for the contents of their paper or short communication and its publication fact. The editorial staff reserves the right to shorten and review the articles submitted.

Reviewing. “Global Nuclear Safety” is peer-reviewed journal. Submitted papers and short communications are evaluated by editorial board members or specialized in the article field referees. Article review covers submitted material currency, scientific novelty degree, define its accordance to general journal profile, fixes facts of plagiarism. After the refereeing process is complete, the paper may be rejected, or returned to the authors for revisions, or accepted for publication.

Conflict of Interests. Conflict of interest concerning a particular manuscript exists when one of the participants of reviewing or publication process – an author, reviewer, or editor – has obligations that can influence his or her action (even if it is not really so). Financial relationships (such as, employment, consultancies, stock ownership, honoraria, and paid expert testimony) are the most easily identifiable conflicts of interest. However, conflicts can occur for other reasons, such as personal relationship, academic competition, and intellectual passion.

All participants in the peer-review and publication process must disclose all conflicts of interests.

When authors submit a manuscript, they are responsible for disclosing all financial and other relationship that might bias their work. Authors should identify all individuals and institutions, who provided financial assistance, as well as other financial and personal support. Authors should describe the role of the study sponsor(s), in study design; collection, analysis, and interpretation of data.

Authors should provide editors with the names of persons they feel should not be asked to review a manuscript because of potential, usually professional, conflicts of interest.

Reviewers must disclose to editors any conflicts of interests that could bias their opinions of the manuscript; they should recuse themselves from reviewing specific manuscripts if the potential for bias exists. In return, the editorial staff should have the possibility to judge the objectiveness of the review and decide whether to refuse the reviewer’s service.

Editorial staff may use information disclosed in conflict-of-interest and financial-interest statements as a basis for editorial decisions.

Editors who make final decisions about manuscripts must have no personal, professional, or financial interest/involvement in any of the issues they might judge. Other members of the editorial staff, if they participate in editorial decisions, must provide editors

with a current description of their financial interests (as they might relate to editorial judgment) and recuse themselves from any decisions in which a conflict of interest exists.

Publication of Negative Findings. Many studies with negative results are actually indecisive. The possibility of indecisive results publication is specially considered by the editorial staff.

Redundant Publications. The editorial staff will not consider manuscripts that are simultaneously being considered by other journals, as well as the papers on work that has already been reported in large part in a published article or is contained in another paper that has been submitted or accepted for publication elsewhere, in print or in electronic media. This policy does not preclude the journal from considering a paper that has been rejected by another journal, or a complete report that follows publication of a preliminary report, such as an abstract or poster displayed at a professional meeting.

Correspondence. If necessary the readers can send their comments, questions and pointed remarks for the published articles and their comments will be published. The corresponding authors can respond to the remarks if they wish.

The article should be checked in the system of the «anti-plagiarism» (<http://www.antiplagiat.ru>) to determine the percentage of the originality and identify possible sources of borrowing.

8) Each author submitting article for consideration to the journal has to be registered previously on the websites: <http://orcid.org> and <http://www.researcherid.com> (if he has no ORCiD and ResearcherID yet). The author's ORCiD (Open Researcher and Contributor ID) and ResearcherID identifiers as an integral part of information about the author, will be placed in the corresponding structural block of the published article.

ATTENTION! In case of a divergence of paper and electronic versions the Editorial staff is guided by the paper version.

The bibliography has to be issued according to **Scopus** standard specification:

THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH:

For journals:

- [1] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie sredy deystviya v sisteme proektirovaniya tehnologii demontazha oborudovaniya pri vyvode iz ekspluatatsii bloka AES [The analysis and representation of the action environment in system of technology design of equipment dismantle during NPP unit taking out of operation] [Global nuclear safety], 2014, №1(10), ISSN 2305-414X, p. 25-31. (in Russian)

Indicate article DOI if it in the presence.

For books:

- [2] Mogilev V.A., Novikov S.A. Faykov Yu.I. Tekhnika vzryvnogo eksperimenta dlya issledovaniya mekhanicheskoy stoykosti konstruktsy. [Explosive experiment techniques for research of mechanical firmness of designs]. Sarov. FGUP "RFYaTs-VNIIEF" [Russian Federal Nuclear Center - The All-Russian Research Institute of Experimental Physics], 2007, ISBN 5-9515-0072-9, 215 p. (in Russian)

For web-resources:

- [3] Strategia razvitiya transportnogo kompleksa Rostovskoj oblasti do 2030 goda [Development strategy of a transport complex of the Rostov region till 2030]. Officialnij sait Ministerstva transporta Rostovskoj oblasti [Official site of the Transport Ministry of Rostov region], 2015. Available at: <http://mindortrans.donland.ru/Default.aspx?pageid=107384>. (in Russian)

For foreign references:

- [4] Gulyaev M., Bogorovskaia S., Shapkina T. The Atmospheric air condition in Rostov Oblast and its effect on the population health // Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. CA, USA, B&M Publishing, 2014. – p. 56-60.

For materials of conferences:

- [5] Gerasimov S.I., Kuzmin V.A. Issledovaniye osobennostey initsirovaniya svetochuvstvitelny vzryvchatykh sostavov nekogerentnym izlucheniym [Research of features of initiation are photosensitive explosive structures incoherent radiation] [Works of the International conference "16 Haritonov's scientific readings"]. Sarov. FGUP "RFYaTs-VNIIEF" [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics], 2014, p. 90–93. (in Russian)

For materials of conferences (foreign references):

- [6] Ishikawa M. et al. Reactor decommissioning in Japan: Philosophy and first programme. – «N power performance and safety. Conference proceedings. Vienna, 28 September – 2 october 1987, v. 5. Nuclear Fuel Cycle». IAEA, Vienna. 1988. P. 121–124.

All documents should be sent to the journal postal address:
347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94
Editorial office of "Global Nuclear Safety" journal
E-mail: oni-viti@mephi.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1) Полный текст статьи, предназначенной для опубликования, должен сопровождаться представлением от учреждения, в котором выполнена работа, и подписан авторами.

2) Комплект должен содержать экспертное заключение о возможности опубликования.

3) К статье прилагаются:

- сведения об авторах на русском и английском языках (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, телефоны. Если авторов несколько, указать, с кем вести переписку);

- сведения об организации авторов на русском и английском языках, включая почтовый адрес с индексом. Если авторов несколько, указать данные об организации каждого автора);

- название статьи и инициалы авторов на русском и английском языке;
- аннотация на русском и английском языках;
- индекс УДК;
- ключевые слова на русском и английском языках.

4) Объем статьи должен быть не более 12 страниц машинописного текста, включая таблицы, список литературы (15–25 источников) и рисунки (не более 10).

5) Статья должна быть набрана в соответствии с правилами компьютерного набора. В одном файле помещается только одна статья (в случае подачи двух статей и более). Сведения из пункта 3 являются частью статьи и должны быть также представлены в электронном виде.

Статья должна быть оформлена в формате Microsoft Office 97-2003 Word 7.0, через 1 интервал, шрифтом Times New Roman размером 12 пт. Поля со всех сторон – 2,5 см. Использование любых других шрифтов возможно только в виде исключения, если они внесены в код файла. Не следует использовать знаки принудительного переноса и дополнительных пробелов. Векторные величины выделяются полужирным шрифтом.

Для записи формул применять только редактор формул Equation 3.0. Большие формулы необходимо разбить на несколько строк, причем каждая новая строка – новый объект. Запрещается масштабировать формулы. При наборе формул необходимо придерживаться следующих размеров: текст – 11 пт, крупный индекс – 8 пт, мелкий индекс – 6 пт, крупный символ – 12 пт, мелкий символ – 10 пт. Формулы не должны включать в состав знаки пунктуации и нумерацию.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. Нумеруются только те формулы, на которые имеются ссылки. Нумерация формул должна быть сквозная по всей статье. Таблицы должны иметь заголовки и нумерацию, в них допускаются только общепринятые сокращения.

Желательно, чтобы таблицы не превышали одной страницы текста. Количество таблиц не должно превышать количество страниц.

Рисунки и схемы должны быть черно-белыми, размером 800x600, с подписями. Графики должны быть оформлены в формате Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 и только отдельным файлом (каждый график на новом листе, либо в новом файле).

Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой (СИ).

6) Литература приводится в порядке упоминания в конце статьи. В тексте должны быть ссылки в квадратных скобках только на опубликованные материалы.

Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала и сопровождаются, в случае перевода на русский язык, с указанием на перевод.

Рекомендуется проверка статей через программу Антиплагиат на сайте <http://www.antiplagiat.ru>

Библиография должна быть оформлена согласно ГОСТу 7.1-2003 «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления». **References** предоставляются отдельно (правила оформления см. ниже в разделе **The list of references standard in English**).

ВНИМАНИЕ! В случае расхождения бумажной и электронной версий Издательство руководствуется бумажной версией.

7) Этика публикаций.

Редакционная коллегия научного журнала «Глобальная ядерная безопасность» руководствуется в своей работе международными этическими правилами научных публикаций, включающими правила порядочности, конфиденциальности, надзора за публикациями, учет возможных конфликтов интересов и др. В своей деятельности редакция следует рекомендациям Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics (<http://publicationethics.org/>)), а также опирается на ценный опыт авторитетных международных журналов и издательств.

Авторство. Все лица, обозначенные как «авторы», должны соответствовать критериям этого понятия. Участие каждого автора в работе должно быть достаточным для того, чтобы принять на себя ответственность за ее содержание. Право называться автором основывается на следующих фактах:

а) значительном вкладе в концепцию и дизайн исследования или в анализ и интерпретации данных;

б) подготовке текста статьи или внесении принципиальных изменений;

в) окончательном утверждении версии, которая сдается в печать.

Участие, заключающееся только в обеспечении финансирования или подборе материала для статьи, не оправдывает включения в состав авторской группы. Общее руководство исследовательским коллективом также не признается достаточным для авторства.

Редакторы журнала «Глобальная ядерная безопасность» вправе спросить у авторов, каков вклад каждого из них в написание статьи; эта информация может быть опубликована.

Все члены коллектива, не отвечающие критериям авторства, должны быть перечислены с их согласия в специальном разделе «Выражение признательности».

Порядок, в котором будут указаны авторы, определяется их совместным решением.

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала оставляет за собой право на сокращение и редактирование присланных статей.

Рецензирование. Журнал «Глобальная ядерная безопасность» является рецензируемым журналом. Поступающие в редакцию журнала статьи и краткие сообщения проходят обязательное рецензирование членами редколлегии или специалистами по профилю данной статьи. Рецензия статьи раскрывает актуальность предоставленного материала, степень научной новизны, определяет соответствие предоставляемого текста общему профилю издания, фиксирует наличие плагиата. По результатам рецензирования статья может быть либо отклонена, либо отослана автору на доработку, либо принята к публикации.

Конфликт интересов. Конфликт интересов, касающийся конкретной рукописи, возникает в том случае, если один из участников процесса рецензирования или

публикации – автор, рецензент или редактор – имеет обязательства, которые могли бы повлиять на его или ее мнение (даже если это и не происходит на самом деле). Наиболее частая причина возникновения конфликта интересов – финансовые отношения (например, связанные с приемом на работу, консультациями, владением акциями, выплатой гонораров и платными заключениями экспертов), прямые или через близких родственников. Возможны и другие причины – личные отношения, научное соперничество и интеллектуальные пристрастия.

Участники процесса рецензирования и публикации должны сообщать о наличии конфликта интересов.

Авторы при представлении рукописи несут ответственность за раскрытие своих финансовых и других конфликтных интересов, способных оказать влияние на их работу. В рукописи должны быть упомянуты все лица и организации, оказавшие финансовую поддержку, а также другое финансовое или личное участие. Должна быть описана роль спонсора/спонсоров в структуре исследования, в сборе, анализе и интерпретации данных.

Авторы должны указывать имена тех, кому, по их мнению, не следует направлять рукопись на рецензию в связи с возможным, как правило профессиональным, конфликтом интересов.

Рецензенты должны сообщать редакции обо всех конфликтах интересов, которые могут повлиять на их мнение о рукописи; они должны отказаться от рецензирования конкретной статьи, если считают это оправданным. В свою очередь редакция должна иметь возможность оценить объективность рецензии и решить, не стоит ли отказаться от услуг данного рецензента.

Редколлегия может использовать информацию, представленную в сообщениях о наличии конфликта интересов и о финансовом интересе, как основу для принятия редакционных решений.

Редакторы, которые принимают решения о рукописи, не должны иметь личного, профессионального или финансового интереса/участия в любом вопросе, который они могут решать. Другие члены редакционного коллектива, если они участвуют в принятии решений, должны предоставить редакторам описание их финансовой заинтересованности (так как она может иметь влияние на редакторские решения) и отказаться от участия в принятии решения, если имеет место конфликт интересов.

Публикация отрицательных результатов. Многие исследования, показывающие отрицательные результаты, в действительности являются нерешающими/неокончательными. Возможность публикации неокончательных результатов исследований рассматривается редколlegией в особом порядке.

Множественные публикации. Редакция не рассматривает рукописи, одновременно представленные для публикации в другие журналы, а также работы, которые в большей части уже были опубликованы в виде статьи или стали частью другой работы, представленной или принятой для публикации каким-либо другим печатным изданием или электронными средствами массовой информации. Эта политика не исключает рассмотрение статьи, не принятой к публикации другим журналом, или полного описания, представленного после публикации предварительных результатов, т.е. тезисов или постерных сообщений, представленных на профессиональных конференциях.

Переписка. Читатели в случае необходимости могут направлять свои комментарии, вопросы или критические замечания к опубликованным статьям, которые будут напечатаны в журнале. При желании авторы статей могут ответить на замечания.

8) Каждый автор, подающий статью на рассмотрение в журнал, должен предварительно зарегистрироваться на сайтах: <http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com> (если у него еще нет ORCID и ResearcherID). Авторские идентификаторы ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и ResearcherID, как неотъемлемая часть сведений об авторе, будет размещаться в соответствующем структурном блоке опубликованной статьи.

Ответственность за достоверность данных в публикуемой в журнале рекламе несет рекламодатель. Публикуемая реклама не является частью авторских произведений.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ:

Для книг: Энджел, Д. Поведение потребителей [Текст] / Д. Энджел. – М. : Физматлит, 1972. – 272 с.

Для журналов: Петров, Н.Н. Принципы построения образовательных программ и личностное развитие учащихся [Текст] / Н.Н. Петров // Вопросы психологии. – 1999. – №3. – С. 39.

Для диссертаций: Дзякович, Е.В. Стилистический аспект современной пунктуации : автореф. дис. канд. филол. наук [Текст] / Е.В. Дзякович – М., 1984. – 30 с.

Для депонированных работ: Кондраш, А.Н. Пропаганда книг [Текст] / А.Н. Кондраш. – М., 1984. – 21 с. – Деп. в НИЦ «Информпечать» 25.07.84. ФН 176.

Описание архивных материалов: Гуцин, Б.П. Журнальный ключ [Текст] // НРЛИ. Ф. 209. Оп. 1. Д. 460. Л. 9.

Материалы конференций: Шишков, Ю. Россия и мировой рынок: структурный аспект [Текст] / Ю. Шишков // Социальные приоритеты и механизмы преобразований в России : материалы междунар. конф. Москва, 12-13 мая 1998 г. – М. : Мagma, 1993. – С. 19-25.

Для патентов: Пат. 2187888 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 В 1/38, Н 04 J 13/00. Приемопередающее устройство [Текст] / Чугаева В. И. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. науч.-исслед. ин-т связи. – № 2000131736/09 ; заявл. 18.12.00 ; опубл. 20.08.02, Бюл. № 23 (II ч.). – 3 с. : ил.

Для авторских свидетельств: А. с. 1007970 СССР, МКИ³ В 25 J 15/00. Устройство для захвата неориентированных деталей типа валов / В. С. Ваулин, В. Г. Кемайкин (СССР). – № 3360585/25–08; заявл. 23.11.81; опубл. 30.03.83, Бюл. № 12. – 2 с.

Для электронных ресурсов: Дирина, А.И. Право военнослужащих РФ на свободу ассоциаций [Электронный ресурс] / А.И. Дирина // Военное право: сетевой журн. – 2010. – Режим доступа: URL: <http://voennoepravo.ru/node/2149> – 19.02.2011.

Комплект документов отправляется в редакцию журнала по адресу:
347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94. Редакция
журнала «Глобальная ядерная безопасность».

E-mail: oni-viti@mephi.ru

Тел.: 8(8639)222717.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2016, 4(21)

Главный редактор – **М.Н. Стриханов, доктор физико-математических наук, профессор**

Сдано в набор 22.12.2016 г.

Компьютерная верстка Вишнева М.М.

Подписано к печати 23.09.2016 г.

Бумага «SvetoCory» 80 г/м². Объем 11,66 усл.печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ(ф) НИЯУ МИФИ