ISSN 2305-414X

2017, 4

GLOBAL NUCLEAR SAFETY



ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

http://gns.mephi.ru

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPHI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2017, 4(25)

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 Andrzhej (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)),

A.V. Chernov (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

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2017, 4(25)

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 (№504) Группы научных специальностей:

05.14.00 - Энергетика;

05.26.00 - Безопасность деятельности человека;

05.04.00 - Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение; 05.13.00 - Информатика, вычислительная техника и управление.

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 Андржей (д-р техн.наук, проф. (Польша)),

M.К. Скаков (д-р физ.-мат. наук, проф. (Казахстан)),

А.Д. Маляренко (д-р техн. наук, проф. (Беларусь)),

C.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. Пимиин (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)),

A.B. Паламарчук (к-т техн. наук (*Россия*)),

В.Е. Шукшунов (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)),

A.В. Жук (к-т ист. наук, доц. (Россия))

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31; Адрес редакции:

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

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY Radon Monitoring as an Indicator of Seismotectonic Events at the Bushehr-1 NPP site and Bushehr Province Adjoining Territory of the Islamic Republic of Iran	
V.Y. Ulyanov	7
Practical Recommendations for the Institutions of Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the Rationale of Prolonging of Sealed Radionuclide Sources Life Time	
A.A. Serebryakov, V.N. Fedoseev, L.I. Yakovlev, A.A. Portnov, Ye.M. Tyurin,	
M.I. Pisarevskij	18
Meteorological Conditions of the Bushehr NPP area, Iran A.P. Elokhin, E.A. Alalem, A.I. Ksenofontov	
RESEARCH, DESIGN, CONSTRUCTION AND INSTALLATION OF NUCLEAR FACILITIES MANUFACTURING EQUIPMENT	
The Research of Selected Operational Properties of Sorbing Matrix Material Laboratory Samples on the Base of Natural Zeolite for Radionuclide Immobilization	
J.A. Ubaskina, P.A. Paraguzov, N.V. Sharova, E.V. Pankratova	48
Hypothesis Substantiation of Laminar Current Transition to Turbulent during Mixed Liquid Convection in Vertical Channels	
V.K. Semenov, A.A. Beliakov	61
External Magnetic Field Deformation in Arc Welding of Magnetic Metals	
Jieren Gu, A.M. Rybachuk	70
Application of LMS Imagine.Lab Amesim Package for Simulation the Propagation of Pressure Waves	
Liquid in Pipeline K.N. Proskuryakov, A.I. Fedorov, M.V. Zaporozhets	78
Influence of Structural Heredity on Strength of the Reactor Cr-Ni-Mo-V Steel	
N.N. Podrezov, I.S. Podrezova	91
NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION	
Physical Share of Delayed Neutrons in Reactor Active Zone with Low-enriched Fuel at the First Physical Start-up	
P.A. Ponomarenko, S.S. Bezotosny, M.A. Frolova, V.A. Morozova	97
Geometric Parameter Monitoring of Nuclear Power Plant Protective Shell During Prestressing, Testing and Its Technical State Determining	
Yu.I. Pimshin, G.A. Naumenko, S.M. Burdakov, Yu.S. Zabaznov	102
Experimental Determination of Vibration Characteristics of Vertical Steam Generator Involute Screens for WWER Reactor	
A.M. Besedin, V.M. Kovalenko, S.Yu. Chesnakova, A.Yu. Smolin	.113
SAFETY CULTURE, SOCIO AND LEGAL ASPECTS OF TERRITORIAL DEVELOPMENT OF	
NUCLEAR FACILITIES LOCATION	
Pedagogical Model of Forming Safety Culture of Graduating Students Oriented to Work in Atomic Industry	
Y.A. Evdoshkina, V.A. Rudenko	122
Copying Strategies for Forming Proper Behavior of Students Intended to Work in the Nuclear Industry within the Framework of the "Safety Culture" Course	
I.S. Vasilenko	130
REVIEWS, ANNOUNCEMENTS	
Nuclear Heritage: New Book about the Impact of Nuclear Production on Environmental Situation in the Ural Region	
D.V. Gavrilov_	137
A . A . A . A . A . A . A . A . A . A .	1
Author Index of vol. 4, 2017	141

СОДЕРЖАНИЕ

Номер	4,	2017
-------	----	------

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	
Мониторинг радона как индикатора сейсмотектонических событий на площадке АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории провинции Бушер Исламской Республики Иран В.Ю. Ульянов	7
Практические рекомендации для учреждений Минобрнауки России по обоснованию продления срока службы закрытых радионуклидных источников А.А. Серебряков, В.Н Федосеев, Л.И. Яковлев, А.А. Портнов, Е.М. Тюрин, М.И. Писаревский	18
Метеорологические характеристики района АЭС «Бушер» в Иране А.П. Елохин, Е.А. Алалем, А.И. Ксенофонтов	23
ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛ	И
Исследование отдельных эксплуатационных свойств лабораторных образцов сорбирующего матричного материала на основе природного цеолита для иммобилизации радионуклидов <i>Ю.А. Убаськина, П.А. Парагузов, Н.В. Шарова, Е.В. Панкратова</i>	48
Обоснование гипотезы перехода ламинарного течения в турбулентное при смешанной конвекции жидкости в вертикальных каналах В.К. Семенов, А.А. Беляков	61
Деформация внешнего магнитного поля при дуговой сварке магнитных металлов	70

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

К вопросу о запаздывающих нейтронах в реакторах с урановым ядерным топливом

Моделирование распространения волн давления жидкости в трубопроводах АЭС

Влияние структурной наследственности на прочность реакторной Cr - Ni - Mo -

с использованием пакета LMS Imagine.lab Amesim

V стали

П.А. Пономаренко, С.С. Безотосный, М.А. Фролова, В.А. Морозова 97

К.Н. Проскуряков, А.И. Фёдоров, М.В. Запорожец 78

Н.Н. Подрезов, И.С. Подрезова 91

Контроль геометрических параметров защитной оболочки АЭС при	
преднапряжнии, испытании и определении ее технического состояния Ю.И. Пимиин, Г.А. Науменко, С.М. Бурдаков, Ю.С. Забазнов 102	
Экспериментальное определение вибрационных характеристик эвольвентных ширм вертикального парогенератора к реактору ВВЭР А.М. Беседин, В.М. Коваленко, С.Ю. Чеснакова, А.Ю. Смолин 113	
КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ И СОЦИАЛЬНО-ПРАВОВЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ	
Практико-ориентированная технология формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в атомной отрасли <i>Ю.А. Евдошкина, В.А. Руденко</i> 122	
Копинг-стратегии в формировании должного поведения студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли в рамках курса «Культура безопасности»	
И.С. Василенко130	
РЕЦЕНЗИИ, ОБЪЯВЛЕНИЯ	
Ядерное наследие: новая книга о воздействии ядерного производства на экологическую ситуацию в уральском регионе	
Авторский указатель номера 4, 2017	

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 550.34: 551.243: 550.835.2

МОНИТОРИНГ РАДОНА КАК ИНДИКАТОРА СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ПЛОЩАДКЕ АЭС «БУШЕР-1» И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ ПРОВИНЦИИ БУШЕР ИСЛАМСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ИРАН

© 2017 В.Ю. Ульянов

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

В работе дано обоснование применения на площадке действующей АЭС «Бушер-1», расположенной в Исламской Республике Иран, инновационной для данных условий системы предупреждения о сейсмической опасности. Предлагаемая система предупреждения базируется на основе комплексного мониторинга радона с целью повышения безопасности при эксплуатации объектов и оборудования АЭС. Положение о применении данной системы в рамках проведения мониторинга недр на АЭС «Бушер-1» должно быть закреплено в должностных инструкциях. Данная система может быть использована в рамках сейсмомониторинга прочих площадок АЭС, расположенных в зонах с повышенной сейсмичностью.

Ключевые слова: Исламская Республика Иран, АЭС «Бушер-1», комплексный мониторинг радона, радоновая сейсмостанция, радон-монитор.

Поступила в редакцию: 07.12.2017

ВВЕДЕНИЕ

В составе потока газов, свободно разгружающегося в атмосферу Земли в зонах тектонических разломов земной коры, наряду с метаном, углекислым газом, водородом и гелием, повсеместно присутствует также инертный газ — радон (222Rn). Его физические и радиометрические свойства: инертность, малый период полураспада (3,82 сут), наличие дочерних продуктов распада послужили основанием для его изучения и использования в качестве одного из индикаторов при установлении степени активности таких зон [1]. Постоянное наблюдение за зонами разломов особенно важно, т.к. в них часто наблюдаются деформации земной поверхности, приводящие к нарушениям целостности зданий, сооружений, дорог, трубопроводов в т.ч. и особо важных объектов, таких как АЭС [2].

Формирование аномалий радиоактивного газа радона в покровных отложениях над зонами разломов в своё время послужило теоретической основой применения эманационной (радоновой) съемки для картирования разрывных нарушений на закрытых площадях. В 70-е годы прошлого столетия была установлена прямая связь между интенсивностью радоновых аномалий и геодинамическими процессами в зонах разломов. Это явление послужило основой новому направлению исследований в геологии — т.н. структурно-геодинамическому картированию [3]. Исходя из вышесказанного, особенности поведения ²²²Rn в геологическом пространстве создают условия для непрерывного мониторинга за ним в качестве индикатора напряженного

8 УЛЬЯНОВ

состояния литосферы. Это подтверждается и аномально высокими концентрациями ²²²Rn в периоды, предшествующие землетрясениям [4].

Значимость мониторинга радона для целей сейсмопрогноза подтверждается известными событиями в итальянской Л'Аквиле (Абруццо), происшедшими в апреле 2009г, которые были предсказаны за несколько месяцев сейсмологом Джампаоло Джулиани (Giampaolo Giuliani) по наблюдениям почвенного радона [5]. Актуальность проведения подобных исследований на территории Ирана подтверждается и последними сейсмическими событиями в провинции Керманшах, произошедшими в ночь на 12 ноября 2017г. с М=7.3, и в провинции Керман 1 декабря 2017г. с М=6.3, приведшими к многочисленным разрушениям и человеческим жертвам.

Но всё же, несмотря на всё вышесказанное, радону как возможному индикатору тектонического события уделяется совершенно недостаточное внимание, особенно это касается радона в подземных водах. И это несмотря на повсеместно создаваемые вокруг АЭС РФ и других стран СНГ геодинамические полигоны, где начаты и активно проводятся высокоточные геодезические и сейсмологические исследования, дополненные комплексами специальных наблюдений, отвечающих требованиям нормативных документов, особенно разработанным в последние годы [6-9]. Дополнительный импульс работы в этом направлении получили после известных событий на японской АЭС «Фукусима-Даичи» («Fukusima Daiichi»).

МОНИТОРИНГ РАДОНА (²²²Rn) КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АЭС «БУШЕР-1»

С целью недопущения катастрофических последствий сейсмических событий, АЭС «Фукусима-Даичи» («Fukusima происшедших японской существующая на площадке АЭС «Бушер-1» система ҮҮ (КИП контроля землетрясений в сооружении 1ZA) нуждается в дополнении новой системой мониторинга радона (222Rn), которую предстоит создать на АЭС впервые. Следует особо отметить, что предлагаемая система по своему предназначению не будет являеться развитием существующих на АЭС систем типа АСКРО и ЛВРК, хотя может быть интегрирована в отдельные их сегменты. В том, что в условиях повышенной сейсмичности подобные системы вполне могут быть успешно реализованы, свидетельствуют результаты многочисленных исследований (Toutain, Baubron, 1999; Ghosh et al., 2009; Woith, 2015).

В условиях АЭС «Бушер-1» данная система представляется особенно необходимой, учитывая всё усиливающееся воздействие даже слабых сейсмических событий на состояние строительных конструкций АЭС, особенно возведённых в 70-годах прошлого века и испытавших во время ирано-иракской войны 1980-1988 гг. неоднократные техногенные воздействия минно-взрывного характера.

Следует особо отметить, что предлагаемая система предназначена для использования оперативным персоналом и службой эксплуатации сооружений АЭС. Предполагается определённое сопряжение её элементов с КИП системы YY в здании 1ZA, а также с предполагаемой на площадке АЭС постоянной сейсмической станцией, совершенно необходимой при её дальнейшем расширении (блоки 2, 3, а в перспективе и блоки 4, 5), решение по которым уже принято, и работы на площадке 2 и 3 блоков начаты. Тем более, что МРЗ для площадки определено в 9 баллов с 0.4g для существующего 1 блока и 0.5g для 2 и 3 блоков. В дальнейшем, при достаточном обосновании, данная система может быть также включена и в общую систему сейсмической защиты АЭС, один из вариантов которой в РФ уже создан и недавно

запущен в опытную эксплуатацию на Смоленской АЭС.

Функционирование отдельных элементов системы на первых предполагается в частично непрерывном т.н. «ручном» режиме, а в последующем – в полностью автоматическом. Способ эксплуатации предлагаемой системы достаточно выполнении. Измерения сводятся к одновременной автоматической регистрации объёмной активности радона (ОАР) в почвенном воздухе на специально выбранных участках при помощи серийно выпускаемых т.н. автоматических радоновых станций, а также к определению содержания радона в пробах подземных вод, отбираемых на смежных участках из дренажных колодцев, с последующей обработкой проб в лабораторных условиях или непосредственно на месте. При необходимости, производится экспресс-отбор проб подземных вод из мониторинговых скважин глубиной не менее 30 м. Для регистрации радона используют на первых порах серийную измерительную аппаратуру и апробированные методики [10,11,12].

ПЕРЕЧЕНЬ ОБЪЕКТОВ МОНИТОРИНГА РАДОНА НА ПЛОЩАДКЕ АЭС И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ ПРОВИНЦИИ БУШЕР

Для качественного проведения мониторинга радона на площадке АЭС «Бушер-1» на первых порах перечень работ и объектов мониторинга может быть следующим:

- размещение автоматической радоновой станции в мало глубинной сухой скважине на участке площадки 1 блока возле зданий ZL.1., ZK.3 и изначально настроенной на непрерывный режим проведения измерений;
- периодический (ежедневный) отбор проб из дренажного колодца ПН-1 у сооружения 1ZF (из отводящего трубопровода в колодец ливневой канализации SF13);
- выборочный отбор проб воды на забое скважин R 1, R 16, R 24, PI_7 (для сравнительных целей допускается производить отбор проб и из скважин глубиной 15 м, в первую голову, из № 10 у здания 1ZA/B). При наличии достаточного обоснования возможен выборочный отбор проб и из скважин за пределами площадки 1 блока (скважины серии PO, EXO, PI и пр.);
- размещение приборов для обработки проб воды из скважин в бывшей химической лаборатории здания ZG.0 или в новом здании грунтовой лаборатории, оборудованной специально для обработки проб грунтов и воды во время проведения изысканий на площадке под новые блоки АЭС;
- размещение приёмной и анализирующей аппаратуры всей системы возможно в здании ZL.1.

Выбор скважин для опробования за пределами площадки 1 блока необходимо производить с учётом структурно-тектонического строения всего полуострова в пределах т.н. Бушерской антиклинали. В последствии, эти скважины могут быть использованы для исследования методами радонометрии структурно-тектонического строения полуострова с целью выявления возможных активных разломных зон, как в ядре, так и на крыльях антиклинали, в частности, предполагаемого т.н. сегментированного разлома Харг-Миш, на существовании которого, не смотря на проведённые доисследования, настаивает иранская сторона.

Также, учитывая, что площадка АЭС находится в относительной близости от наиболее сейсмически активных разломных зон земной коры в этом районе провинции Бушер, в частности, Делвар-Ахрамского субширотного разлома, на этой территории впоследствии необходимо размещение дополнительного пункта сейсмического радонового мониторинга. Как нельзя лучше для указанных целей подходят термальные источники, особенно находящиеся непосредственно в зонах выявленных разломов. Из

10 УЛЬЯНОВ

существующих вблизи АЭС термальных источников, отвечающих этим критериям, наиболее подходящим для размещения такого пункта является термальная водолечебница на окраине г. Архам. В 66 м от здания водолечебницы расположена действующая артезианская скважина, которая благодаря установленному в ней погружному насосу большой мощности непрерывно подает термальную воду в басссейны волечебницы. Данная скважина, находящаяся к тому же в каменном здании, при необходимом её дооснащении как нельзя лучше подходит для непрерывного определения содержания радона в подземных водах. Охраняемый участок водолечебницы также подходит и для размещения автоматической радоновой станции для регистрации почвенного радона.

По данным Н. Кагіті и F. Мооге (2008) вода термального источника в Ахраме является минерализованной хлоридно-сульфатной натриево-кальцевой со средней температурой 40.3 град С. Удельная электропроводимость (ЕС) воды составляет 11.4 мСм/см, общее солесодержание (TDS) 7.9 г/л, рН = 6.8, дебит источника 11.4 л/сек [13].

Ещё одним возможным участком является г. Боразджан и его окрестности, находящиеся в зоне Казерун-Боразджанского разлома, где также отмечены многочисленные выходы термальных вод. Однако там требуются дополнительные изыскания, в том числе и по выявлению неиспользуемых скважин, особенно самоизливающихся, как наиболее ценных для подобных исследований. Всего же в провинции Бушер насчитыватся 9 термальных источников, из которых, помимо Ахрама также известен источник Далаки (Dālaki) в 70 км от Бушера, где также имеется скважина [14,15]. Сведений о проведении исследований с целью определения содержания радона в горячих источниках провинции Бушер, в отличии от ряда других провинций Ирана, не имеется. Однако известно, что содержание радона в горячих источниках Ирана, таких как Sirch, Bastak, Sareen, Jowshen, Mahallat, Geno и пр., колеблется достаточно в широких пределах, от 30 до 253 Бк/л и выше.

Следует отметить, что комплексный мониторинг радона с разнесённым дублированным размещением радоновых сейсмостанций на нескольких участках существенно повышает представительность получаемых данных. Кроме того, закономерный и предсказуемый выход регистрируемых значений объемной активности радона на фоновый уровень (определяемый с учётом временного фактора для конкретного участка) после т.н. «всплеска» (т.е. максимального уменьшения или увеличения – уточняется в ходе работ) будет свидетельствовать о том, что в результате сейсмического события (в т.ч. и техногенного характера) коэффициент эманирования горных пород не изменился, а значит, структура трещинно-порового пространства в районе (и прежде всего на участке размещения существующего и новых блоков АЭС «Бушер») не претерпела существенных изменений. Постоянная регистрация и сверка указанных зависимостей с хранящимися в постоянно пополняемой и обновляемой базе данных т.н. «эталонами» будет ещё одним дополнительным фактором обеспечения сейсмической безопасности площадки АЭС. Составление каталога местных сейсмических событий крайне необходимо, учитывая то обстоятельство, сейсмические события в каждом конкретном районе имеют своё собственное, как правило, резко отличное от других мест, т.н. «лицо». А в районе расположения АЭС по данным сейсмометрических исследований прошлых лет оно имеет ещё и ярко выраженный секторальный характер, обусловленный, в частности, тем, что механизм возбуждения сейсмических событий в прилегающих наиболее сейсмогенерирующих районах провинции Бушер различен: в разломных зонах района г. Ахрам, где в 2017 году происходили сейсмические события с М=3.7...4.7, преобладает сжатие, а в районе г. Боразджан на фоне сейсмических событий с М=2.5...3.4 преобладают сдвиги. Различными предполагаются и т.н. «эталоны» фоновых сейсмических событий, в т.ч. и радоновые. Не совсем пока окончательно ясен механизм возникновения сейсмических событий под дном Персидского Залива у Бушерского полуострова, которые происходят практически постоянно с М=2.5...4.8. По этой же причине выведение каких-либо глобальных универсальных зависимостей затруднёно или зачастую практически невозможно, что и подтверждается результатами наблюдений в различных районах земного шара, в первую голову - на сопредельных территориях [16,17]. Выведение же региональных зависимостей или уточнение существующих формул с учётом местных условий вполне возможно, но требует длительного времени для накопления фактического материала, для которых площадка АЭС «Бушер» подходит как нельзя лучше. А учитывая то обстоятельство, что российская сторона после пуска 1 блока АЭС в эксплуатацию и передачи его иранской стороне не намерена оставлять этот объект без надзора и технического сопровождения, вопрос осуществления на практике данных исследований, причём и совместных, вполне реализуем.

ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАДОНА

На первых этапах мониторинга, как указывалось выше, дискретное определение содержания радона в пробах воды, отобранных из отводящей линии дренажного колодца ПН-1 и из выбранных мониторинговых скважин на площадке 1 блока, предполагается производить в т.н. «ручном режиме». Это связано с тем, что как отечественная, так и зарубежная серийная полевая аппаратура для непрерывной регистрации радона в подземных водах (в скважинах), как и аппаратура для непрерывной регистрации радона в проточных (дренажных) водах в настоящее время практически отсутствует. Причина в том, что непосредственное непрерывное автоматизированное измерение содержания радона в проточных водах - достаточно сложная техническая задача, связанная с особенностью самого радиоактивного газа, его инертностью и низким периодом полураспада.

На начальных этапах мониторинга радона на площадке АЭС «Бушер-1» предлагается использовать серийное приборное оборудование российского производства, в частности, производства «НТМ-Защита». Естественно, что все используемые технические средства должны отвечать условиям применения на АЭС. Средства контроля должны быть сертифицированы и соответствовать требованиям соответствующих разделов ГОСТ 15150-69, НП-001-2015, НП-031-01, ГОСТ Р 50746-2013.

Как уже указывалось выше, в качестве первоочередного объекта для опробования предлагается практически непрерывно действующий с середины 70-х гг. дренажный колодец ПН-1 возле сооружения 1ZF. Выбор ПН-1 в качестве объекта опробования отнюдь не случаен, т.к. фрагментарно сохранившаяся с 70-х годов по периметру фундаментной плиты машзала 1ZF дренажная система KWU является своеобразным и уникальным полигоном, обеспечивающим постоянный площадной водоприток подземных вод, в т.ч. и с более глубоких горизонтов через т.н. «гидравлические окна» в глинистых отложениях ИГЭ-6 верхнемиоценового — нижнеплиоценового (N_1^3 – N_2^1) возраста. Отложения ИГЭ-6 в свою очередь являются основанием фундаментных плит как машзала 1 блока, так и всего т.н. «ядерного острова» АЭС.

Ещё одним дополнительным объектом исследований мог бы послужить также действующий с середины 70-х гг. дренажный колодец ПН-2 у сооружения 2ZF, даже не смотря на значительно более низкий водоприток по сравнению с колодцем ПН-1. Не исключено, что последнее связано с заилением самого колодца ПН-2 и его водосборной сети, но после их чистки ситуация может существенно улучшиться. Возможно включение в систему водопунктов для экспресс-отбора проб воды на радон после

12 УЛЬЯНОВ

технического освидетельствования и некоторых из сохранившихся геотехнических скважин серии ВН на площадке б. 2 блока KWU.

На длительную перспективу необходимо будет оборудовать выше перечисленные водопункты (дренажный колодец ПН-1 на площадке 1 блока АЭС, дренажный колодец ПН-2 на площадке б. 2 блока KWU, термальные самоизливающиеся скважины в г. Ахрам и, возможно, г. Боразджан) автоматизированными системами непрерывного определения содержания радона в воде. Необходимость проведения именно непрерывных автоматизированных наблюдений подчёркивается исследователями радона как сейсмоиндикатора. Есть и примеры успешного проведения подобных исследований в различных странах, в т. ч. в некоторых провинциях Исламской Республики Иран, носящих, однако, преимущественно локально-временной характер [18-23]. Причём ряд иранских специалистов также настаивает на опробовании с указанными целями, как наиболее пригодных, именно термальных источников (S. Mehdi Hashemi, Ali Negarestani, Mojtaba Namvaran и др.). Желательным для проведения подобных исследований является и относительно высокая концентрация радона в воде некоторых таких источников.

В качестве приборной базы последующих этапах на исследований предпочтительно использовать доработанные и адаптированные к климатическим условиям площадки автоматизированные системы для непрерывного (по возможности, не менее 2-4 замеров в 1 час) определения содержания радона в воде модели DURRIDGE RAD7 с дополнительным устройством RAD AQUA фирмы DURRIDGE Company, Inc. (США). Или же доработанную и адаптированную к условиям площадки приборную систему для непрерывного определения содержания радона в воде модели RIM 1688-2 немецкой фирмы SARAD GmbH, а также хорошо зарекомендовавший себя в РФ радон-монитор AlphaGUARD PQ2000 PRO с дополнительным устройством Alpha КІТ. Для исключения систематических ошибок подобных устройств иранские специалисты рекомендуют на одной точке использовать одновременно по два комплекта оборудования различных производителей, особенно при проведении работ на термальных водопунктах [24].

Следует отметить, что указанные выше радон-мониторы в вариантах AlphaGUARD PQ2000-S и RIM 1688GEO для отбора и анализа почвенного радона в целях унификации оборудования на начальных этапах исследований могут рассматриваться как альтернатива автоматической радоновой станции СРС-05 («НТМ-Защита», Россия). Также ещё одним вариантом замены СРС-05 может служить оборудование фирмы ALGADE (Франция), учитывая наличие определённых конструктивных преимуществ радоновых станций этой фирмы, в частности, отсутствием у них механической воздуходувки. Указанное оборудование должно устойчиво работать в условиях весьма высоких температуры и влажности, присущих прибрежным районам Персидского Залива в летний период, в т.ч. и провинции Бушер. Учитывая климатические особенности региона наблюдений, возможен вариант питания автоматических радоновых станций и от солнечных батарей.

Размещение автоматизированного оборудования возможно в малогабаритном необитаемом боксе непосредственно у точки наблюдения.

В целях максимального приближения исследовательского оборудования и обслуживающего персонала к опробуемому водопункту (в пределах площадки АЭС), на начальных этапах работ его размещение возможно и в обитаемом авто транспортабельном модуле.

При выборочном экспресс-опробовании скважин за пределами площадки АЭС возможно размещение оборудования в самоходной передвижной лаборатории на колёсном шасси, также оснащённой, но в упрощённом составе, необходимым

оборудованием и системами жизнеобеспечения. Описание таких лабораторий, в т.ч. и их оснащения, приводится в документе МАГАТЭ [25].

ВЫВОДЫ

- 1. Целью предлагаемой системы мониторинга является выявление и изучение возможной взаимосвязи между степенью обогащения подземных вод радоном, зависящей, помимо прочих факторов, от степени раскрытости геологических структур, условий циркуляции подземных вод, в т.ч. термальных, гидродинамической зональности, и общими сейсмотектоническими условиями на участке расположения АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории провинции Бушер.
- 2. Применение радонометрии в комплексе с традиционными геофизическими методами целесообразно при изучении сложной разломно-блоковой тектоники горных пород фундамента на предмет возможности её внезапной активизации, что особенно характерно для природных условий ближайшей к п-ву Бушер горной системы Загрос. Указанные исследования в дальнейшем могут стать составной частью мониторинга недр на площадке АЭС «Бушер-1» и прилегающей территории, в купе с проводимыми высокоточными геодезическими наблюдениями (в т.ч. и в рамках мониторинга СДЗК) и сейсмометрией. Необходимость в устройстве на площадке постоянно действующей сейсмостанции и проведении непрерывных сейсмических наблюдений в связи с планируемым расширением АЭС не подлежит сомнению, тем более что решение о строительстве 2 и 3 блоков на этой площадке уже принято и работы на площадке 2 и 3 блоков начаты. А на очереди, возможно, и блоки 4, 5, что только повышает требования к сейсмической безопасности всего объекта в целом.
- 3. Для качественного проведения мониторинга радона на площадке АЭС «Бушер-1» методика его проведения должна заключаться в тщательном и всеобъемлющем анализе результатов непрерывных замеров ОАР в почвенном воздухе и параллельно проводимых постоянных замеров содержания радона в пробах воды из различных водопунктов (дренажные колодцы, скважины) на площадке АЭС «Бушер», а в последствии и на прилегающей к п-ву Бушер территории предгорий горной системы Загрос (термальные скважины в г. Ахрам и Боразджан).
- 4. На начальных этапах проведения мониторинга радона обработка проб воды из скважин и дренажных колодцев может производиться в «ручном» режиме в лабораторных условиях непосредственно на площадке АЭС.
- 5. При выполнении мониторинга радона на площадке АЭС вначале предлагается использовать серийное оборудование российского производства.
- 6. На длительную перспективу будет необходимо оборудовать выбранные водопункты автоматизированными системами непрерывного определения содержания радона в подземных и проточных (дренажных) водах. Указанные системы должны определённым образом сопрягаться с КИП контроля землетрясений, а также с вновь созданной на площадке АЭС постоянной сейсмической станцией. Возможен вариант интегрирования объектов радонометрии в отдельные сегменты систем типа АСКРО и ЛВРК, причём как существующего, так и будущих блоков. В дальнейшем все эти системы могут быть объединены и в общую систему сейсмической защиты данной АЭС.
- 7. Предлагаемая комплексная система мониторинга радона в случае её реализации сможет обеспечить более полную сейсмозащиту и, как следствие, безаварийную эксплуатацию зданий и сооружений АЭС «Бушер-1». А также начатых постройкой дополнительных блоков АЭС, расположенных в сложных сейсмотектонических условиях ИРИ.

14 УЛЬЯНОВ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Седин В.Л. и др.* Шкала оценки активности тектонических разломов земной коры по интенсивности радоновыделения из недр на площадках строящихся и действующих АЭС [Текст] / В.Л. Седин, В.Ю. Ульянов, Е.М. Бикус // Геориск. 2015. №4. С. 48–52.
- 2. *Рудаков, В.П.* К вопросу о природе эманационных (радоновых) предвестников землетрясений [Текст] / В.П. Рудаков // Геохимия. 2003. №2.
- 3. *Горбушина, Л.В. и др.* Эманационный метод индикации геодинамических процессов при инженерно-геологических изысканиях [Текст] / Л.В. Горбушина, Ю.С. Рябоштан // Советская геология. 1975. №4. С. 106–112.
- 4. Делатказин, T.Ш. и ∂р. Мониторинг поля радоновых эманаций в зоне техногенного воздействия [Текст] / Т.Ш. Делатказин, Ю.П. Коновалова, В.И. Ручкин // Проблемы недропользования. 2016. №4. С. 97–103.
- 5. *Елохин, А.П.* Нетрадиционные методы радиационного контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды [Текст] / А.П. Елохин // Ядерные измерительно-информационные технологии. 2013. №1(45). С. 62–95.
- Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (R-STEPS) [Текст] / Под ред. Г.С. Вартаняна. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 77 с
- 7. Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных [Текст]. РБ-019-01. М., 2001.
- 8. СТО 95 102-2013. Ведение объектового мониторинга состояния недр на предприятиях госкорпорации «РОСАТОМ» [Текст]. М.: СРО НП «СОЮЗАТОМГЕО», 2013.
- 9. СТО 95 103–2013 Руководство по методике комплексного инженерно-сейсмометрического и сейсмологического мониторинга состояния конструкций зданий и сооружений, включая площадки их размещения [Текст]. М.: СРО НП «СОЮЗАТОМГЕО», 2013.
- 10. МР 2.6.1.27-2003. Зона наблюдения радиационного объекта. Организация и проведение радиационного контроля окружающей среды [Текст]. М., 2003.
- 11. РД 52.18.595-96. Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды [Текст]. Методика контроля содержания трития в природных водах МВИ 01—6/96. М., 1998.
- 12. Рекомендации по приборному обеспечению дозиметрического и радиометрического контроля в соответствии с НРБ-99 и ОСПОРБ-99 [Текст]. М., 2003.
- 13. Karimi H, Moore F. The source and heating mechanism for the Ahram, Mirahmad and Garu thermal springs, Zagros Mountains, Iran. Geothermics 37(2008), pp. 84–100.
- 14. Mirhosseini S.M., Moattar F., Negarestani A., Karbasi A.R. Environmental Hydrochemistry and Seasonal Variations in Radon Concentration in Geno Hot Spring, North of Hormozgan, Iran. Environmental Biology: Jan. 2014, Vol. 8, Issue 1, p. 56.
- 15. Javad Nouraliee, Soheil Porkhial, Amir Tamjidi. Study on Dālaki Geothermal Resource in Bushehr Province, in the North of Persian Gulf. World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- 16. *Закиров, Т.З.* Особенности распределения концентрации радона в подземных водах некоторых сейсмоактивных зон Узбекистана (в связи с поисками предвестников землетрясений) [Текст] / Т.З. Закиров: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Ташкент, 1984. С. 18
- 17. *Максудов*, *А.У.* Мониторинг сейсмических предвестников для прогноза землетрясений [Текст] / А.У. Максудов // Вычислительные нанотехнологии. -2016. -№1. -2016. -ℂ. 52–61.
- 18. *Семинский, К.Ж. и др.* Радон в подземных водах Прибайкалья и Забайкалья: пространственно-временные вариации [Текст] / К.Ж. Семинский, А.К. Семинский // Геология и тектонофизика. -2016. Т. 7. №3. С. 477–493.
- 19. *Афонин, А.А. и др.* Измерение радона на гидротермальной системе [Текст] / А.А. Афонин, Ю.Д. Кузьмин, В.Ф. Воропаев, А.Ю. Максимов, А.А. Котляров // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 171–177.
- 20. Ишанкулиев Дж., и др. Динамика уровня подземных вод, концентрации подпочвенного радона и молекулярного водорода в прикаспийском сейсмоактивном регионе [Текст] / Дж. Ишанкулиев, Г.Ч. Сарыева, К.П. Азимов, Н.К. Азимова // Сб. докл. межд. конф. «Актуальные проблемы современной сейсмологии», посвященной 50-летию Института сейсмологии им. Г.А.Мавлянова АН Респ. Узбекистан 12–14 октября 2016 г. Ташкент, 2016.

- C. 234-241.
- 21. *Ульянов, В.Ю.* Организация и методика проведения мониторинга радона на площадках АЭС в асейсмичных регионах [Текст] / В.Ю. Ульянов // Проблемы недропользования. 2015. №1. С. 103–107.
- 22. Negarestani Ali, Hashemi Seyed Mehdi, Naseri Farzin, Namvaran Mojtaba, Musavi Nasab Seyed Mohammad, Montazeri Habiballan. Preliminary Investidation of the variation of radon concentration in the Jowshan hot spring in the SE of Iran as a precursor for the M 4.9 Shahdad and M 4.3 Sirch earthquakes om May, 2009 / Iranian Journal of Geophysics, 2012, Volume 6, pp. 30–39.
- 23. Montazeri H., Abbasnejad A., Negarestani A. Continuous radon monitoring in the Jowshan hot spring as an earthquake precursor, SE Iran. Geochemical Journal, Vol. 45, 2011, pp. 463–472.
- 24. Negarestani A., Namvaran M., Shahpasandzadeh M., Fatemi S.J., Alavi S.A., Hashemi S.M., Mokhtari M. Design and investigation of a continuous radon monitoring network for earthquake precursory process in Great Tehran. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, May 2014, Vol. 300, Issue 2, pp. 757–767.
- 25. IAEA-TECDOC-1092/R. Руководство по мониторингу при ядерных и радиационных авариях [Текст]. Вена: МАГАТЭ, 2002. С. 322.

REFERENCES

- [1] Sedin V.L., Uluanov V., Bicus K.M. Shkala otsenki aktivnosti tektonicheskix razlomov zemnoj kory po intensivnosti radonovydeleniya iz nedr na ploshhadkah stroyashhihsya i dejstvuyushhih AES [Scale assessment of active tectonic faults of the crust on the Intensity of radon exhalation from the depths to the construction site and the existing energy facilities]. Georisk, 2015, №4, pp. 48–52. (in Russian)
- [2] Rudakov V.P. K voprosu o prirode ehmanacionnykh (radonovykh) predvestnikov zemletrjasenijj [The nature of emanation (radon) earthquake precursors]. Geochemistry, 2003, №2, pp. 222–224. (in Russian)
- [3] Gorbushina L.V., Ryaboshtan Y.S. Ehmanacionnyjj metod indikacii geodinamicheskikh processov pri inzhenerno-geologicheskikh izyskanijakh [Emanation method indication of geodynamic processes in geotechnical investigations]. Soviet Geology, 1975, №4, pp. 106–112. (in Russian)
- [4] Dalatkazin Timur Sh., Konovalova Yulia P., Ruchkin Vladimir I. Monitoring polja radonovykh ehmanaciji v zone tekhnogennogo vozdejjstvija [Monitoring radon emanations field in the zone of technogenous impact]. Subsoil use problems, 2016, №4, pp. 97-103. (in Russian)
- [5] Elokhin A.P. Netradicionnye metody radiacionnogo kontrolja radioaktivnogo zagrjaznenija okruzhajushhejj sredy [Unconventional methods for radiation monitoring of radioactive contamination of environment]. Nuclear measurement and information technology, 2013, №1(45), pp. 62–95. (in Russian)
- [6] Metodicheskie ukazanija po vedeniju gidrogeodeformacionnogo monitoringa dlja celejj sejjsmoprognoza (R-STEPS) [Methodical instructions for conducting hydro-deformation monitoring for seismic forecasting purposes (R-STEPS)]. Ed. by G.S. Vartanyan. M. Pub. ZAO Geoinformmark, 2000, p. 77. (in Russian)
- [7] Ocenka sejjsmicheskojj opasnosti uchastkov razmeshhenija jaderno- i radiacionno opasnykh objektov na osnovanii geodinamicheskikh dannykh [Estimation of seismic hazard of sites of location of nuclear and radiation hazardous objects on the basis of geodynamic data. RB-019-01]. M., 2001. (in Russian)
- [8] CTO 95 102-2013. Vedenie ob"ektovogo monitoringa sostojanija nedr na predprijatijakh goskorporacii «ROSATOM» [STO 95 102-2013. Conducting object monitoring of the state of the subsoil at the enterprises of the state corporation ROSATOM]. M. Pub. SRO NP SOYUZATOMGEO, 2013. (in Russian)
- [9] STO 95 103–2013 Rukovodstvo po metodike kompleksnogo inzhenerno-sejjsmometricheskogo i sejjsmologicheskogo monitoringa sostojanija konstrukciji zdaniji i sooruzheniji, vkljuchaja ploshhadki ikh razmeshhenija [STO 95 103-2013. Guidance on the method of complex engineering seismic and seismological monitoring of the state of structures of buildings and structures, including the sites of their deployment]. M. Pub. SRO NP SOYUZATOMGEO, 2013. (in Russian)
- [10] MR 2.6.1.27-2003. Zona nabljudenija radiacionnogo ob"ekta. Organizacija i provedenie radiacionnogo kontrolja okruzhajushhejj sredy [MR 2.6.1.27-2003. Observation zone of the radiation object. Organization and conduct of radiation monitoring of the environment]. (in Russian)
- [11] RD 52.18.595-96. Federal'nyjj perechen' metodik vypolnenija izmerenijj, dopushhennykh k primeneniju pri vypolnenii rabot v oblasti monitoringa zagrjaznenija okruzhajushhejj prirodnojj

16 УЛЬЯНОВ

- sredy [Tekst]. Metodika kontrolja soderzhanija tritija v prirodnykh voda MVI 01—6/96 [RD 52.18.595-96. The federal list of measurement techniques approved for use in the field of monitoring of environmental pollution. Methods for controlling the content of tritium in natural water MVI 01-6/96]. M., 1998. (in Russian)
- [12] Rekomendacii po pribornomu obespecheniju dozimetricheskogo i radiometricheskogo kontrolja v sootvetstvii s NRB-99 i OSPORB-99 [Recommendations on the instrumentation of dosimetric and radiometric control in accordance with NRB-99 and OSPORB-99]. M., 2003. (in Russian)
- [13] Karimi H., Moore F. The source and heating mechanism for the Ahram, Mirahmad and Garu thermal springs, Zagros Mountains, Iran. Geothermics 37(2008), pp. 84–100. (in English)
- [14] Mirhosseini S.M., Moattar F., Negarestani A., Karbasi A.R. Environmental Hydrochemistry and Seasonal Variations in Radon Concentration in Geno Hot Spring, North of Hormozgan, Iran. Environmental Biology: Jan. 2014, Vol. 8, Issue 1, p. 56. (in English)
- [15] Javad Nouraliee, Soheil Porkhial, Amir Tamjidi. Study on Dālaki Geothermal Resource in Bushehr Province, in the North of Persian Gulf. World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, 19–25 April 2015. (in English)
- [16] Zakirov T.Z. Osobennosti raspredelenija koncentracii radona v podzemnykh vodakh nekotorykh sejjsmoaktivnykh zon Uzbekistana (v svjazi s poiskami predvestnikov zemletrjasenijj) [Features of distribution of radon concentration in groundwater of some seismically active zones of Uzbekistan (in connection with searches of precursors of earthquakes)]. Tashkent, 1984, p. 18. (in Russian)
- [17] Makhsudov A.U. Monitoring sejjsmicheskikh predvestnikov dlja prognoza zemletrjasenijj [Monitoring of seismic harbingers for the forecast of earthquakes]. Vychislitelnye nanotekhnologii [Jour. Comp. nanotechnol], 2016, Issue 1, pp. 52–61. (in Russian)
- [18] Seminsky K.Zh., Seminsky A.K. Radon v podzemnykh vodakh Pribajjkal'ja i Zabajjkal'ja: prostranstvenno-vremennye variacii [Radon in groundwaters in the Baikal region and Transbaikalia: variations in space and time]. Geodynamics & Tectonophysics, 2016, Vol. 7, №3, pp. 477–493. (in Russian)
- [19] Afonin A.A., Kuzmin Y.D., Voropaev V.F., Maksimov A.A., Kotlyarov A.A. Izmerenie radona na gidrotermal'nojj sisteme [The measuring of radon by hydrothermal systems]. Kompleksnye sejjsmologicheskie i geofizicheskie issledovanija Kamchatki [Compilation "Complex seismological and geophysical research of Kamchatka"]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2004, pp. 171–177. (in Russian)
- [20] Ishankuliev J., Saryeva G.Ch., Azimov K.P., Azimova N.K. Dinamika urovnja podzemnykh vod, koncentracii podpochvennogo radona i molekuljarnogo vodoroda v prikaspijjskom sejjsmoaktivnom regione [Dynamics of groundwater level, concentration of subsoil radon and molecular hydrogen in the Caspian seismically active region]. Sb. dokl. mezhd. konf. «Aktual'nye problemy sovremennojj sejjsmologii», posvjashhennojj 50-letiju Instituta sejjsmologii im. G.A.Mavljanova AN Resp. Uzbekistan 12–14 oktjabrja 2016 g. [Collection of Reports the International Conference "Actual Problems in Modern Seismology" devoted to the 50th anniversary of G.A. Mavlyanov Institute of Seismology of Academy of Sciences of Republic Uzbekistan 12-14 oct. 2016]. Tashkent, 2016, pp. 234–241. (in Russian)
- [21] Ulyanov V.Yu. Organizacija i metodika provedenija monitoringa radona na ploshhadkakh AEhS v asejjsmichnykh regionakh [Organization and methodology of radon monitoring at NPP sites with aseismic regions]. Problemy nedropol'zovanija [Problems of subsoil use], 2015, №1, pp. 103–107. (in Russian)
- [22] Negarestani Ali, Hashemi Seyed Mehdi, Naseri Farzin, Namvaran Mojtaba, Musavi Nasab Seyed Mohammad, Montazeri Habiballan. Preliminary Investidation of the variation of radon concentration in the Jowshan hot spring in the SE of Iran as a precursor for the M 4.9 Shahdad and M 4.3 Sirch earthquakes om May, 2009. Iranian Journal of Geophysics, 2012, Volume 6, pp. 30–39. (in English)
- [23] Montazeri H., Abbasnejad A., Negarestani A. Continuous radon monitoring in the Jowshan hot spring as an earthquake precursor, SE Iran. Geochemical Journal, Vol. 45, 2011, pp. 463–472. (in English)
- [24] Negarestani A., Namvaran M., Shahpasandzadeh M., Fatemi S.J., Alavi S.A., Hashemi S.M., Mokhtari M. Design and investigation of a continuous radon monitoring network for earthquake precursory process in Great Tehran. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, May 2014, Vol. 300, Issue 2, pp. 757–767. (in English)
- [25] IAEA-TECDOC-1092/R. Rukovodstvo po monitoringu pri jadernykh i radiacionnykh avarijakh [IAEA-TECDOC-1092/R. Guidelines for monitoring nuclear and radiation accidents]. Vienna: MAGATE [IAEA], 2002, p. 322. (in Russian)

МОНИТОРИНГ РАДОНА КАК ИНДИКАТОРА СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ 17

Radon Monitoring as an Indicator of Seismotectonic Events at the Bushehr-1 NPP site and Bushehr Province Adjoining Territory of the Islamic Republic of Iran

V.Y. Ulyanov

Dnieper State Academy of Construction and Architecture, Chernyshevsky St.,24a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49600 e-mail: vuluanov@mail.ru ORCID ID: 0000-0002-9028-3408

Abstract - The work provides justification for the application on the site of the Bushehr-1 NPP in the Islamic Republic of Iran, an innovative for these conditions warning system on seismic hazard. The proposed warning system is based on the integrated monitoring of radon in order to improve safety in the operation of NPP facilities and equipment. Regulations on the application of this system in the context of subsoil monitoring at Bushehr-1 NPP should be fixed in job descriptions. This system can be used as part of seismic monitoring of other sites of nuclear power plants located in zones with increased seismicity.

Keywords: Islamic Republic of Iran, Bushehr-1 NPP, integrated radon monitoring, radon seismic station, radon monitor.

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ УЧРЕЖДЕНИЙ МИНОБРНАУКИ РОССИИ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ЗАКРЫТЫХ РАДИОНУКЛИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ¹

© 2017 А.А. Серебряков, В.Н Федосеев, Л.И. Яковлев, А.А. Портнов, Е.М. Тюрин, М.И. Писаревский

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В статье предлагаются практические рекомендации по продлению срока службы закрытых радионуклидных источников, разработанные специалистами МИФИ, участвующими в рабочей группе Комиссии Минобрнауки РФ по признанию организации пригодной эксплуатировать ядерную установку, радиационный источник или пункт хранения, а также осуществлять деятельность по обращению с ядерными материалами и радиоактивными веществами. Даются пояснения, как применять положения НП-024-2000 «Требования к обоснованию возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии» непосредственно к закрытым радионуклидным источникам.

Ключевые слова: радиационный источник, пункт хранения, обращение с ядерными материалами и радиоактивными веществами, ядерная и радиационная безопасность, потенциальная радиационная опасность, ядерно и радиационно опасный объект, объект использования атомной энергии, остаточный ресурс, комплексное обследование технического состояния.

Поступила в редакцию: 10.11.2017

ВВЕДЕНИЕ

Закрытые радионуклидные источники (далее ЗРнИ) нашли широкое применение в науке и технике, медицине и образовании, промышленности и сельском хозяйстве. Срок их действия ограничен и для эксплуатирующих организаций очень актуален вопрос о его продлении. Согласно пункта 3.6.7 Основных санитарных правил обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) [1] вопрос о возможном эксплуатации источников ионизирующего продлении срока рассматривается, если такое продление не запрещено технической документацией на источник, и должен решаться комиссией, включающей представителей юридического или физического лица, использующего источник ионизирующего излучения, и, при необходимости, представителей предприятия-изготовителя. Продление эксплуатации ЗРнИ возможно по следующим причинам:

- эксплуатация источника проходила при действии климатических и механических нагрузок значительно меньших, чем предусмотрено техническими условиями эксплуатации (далее ТУ);
- при условии строго соблюдения заявленных условий эксплуатации ЗРнИ не обязательно, что после окончания назначенного срока службы должно быть

 1 Статья подготовлена в рамках выполнения работ по Государственному заданию № 13.4275.2017/HM от 28.02.2017 [The article was prepared within the works for the State task No. 13.4275.2017 / HM of 28.02.2017]

[©] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2017

соответствие воздействий на источники степеням жесткости и классам прочности, предусмотренным в ТУ,

– не обязательно соответствие ЗРнИ в требованиям к радиоактивным материалам особого вида (РМОВ) при условии изменения порядка их перевозки в процессе эксплуатации И утилизации $(H\Pi - 053 - 04)$ «Правила безопасности транспортировании радиоактивных отходов» [2]).

В соответствии со статьей 3 Федерального закона от 21.11.1995 N 170-ФЗ (ред. от 03.07.2016) "Об использовании атомной энергии"[3] ЗРнИ относятся к радиационным источникам (далее РИ) и являются объектом использования атомной энергии (далее ОИАЭ). Продление срока эксплуатации ОИАЭ должно быть оформлено по требованиям НП-024-2000 «Требования к обоснованию возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии» (Далее НП-024-2000) [4]. В понятие ОИАЭ входят ядерные установки, радиационные источники и пункты хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ. Поэтому в НП-024-2000 требования к обоснованию срока службы сформулированы широко, чтобы охватить все виды ОИАЭ. Целью данной статьи является выделение и формулировка требований к ЗРнИ, а также дать пояснения к этим требованиям.

ОСНОВАНИЯ К ПРОДЛЕНИЮ СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Основанием к продлению срока эксплуатации РИ служит следующее:

- исправное техническое состояние источников (и приборов, в составе которых они эксплуатируются и хранятся) на момент проведения процедуры продления эксплуатации;
- наличие остаточного ресурса источников, достаточного для обеспечения необходимой радиационной безопасности источника при эксплуатации и выводе его из эксплуатации;
- обязательное выполнение компенсирующих мероприятий в соответствии с «Решением» о продлении срока эксплуатации источников.

ПОРЯДОК ПРОДЛЕНИЯ СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗРНИ

НП-024-2000 устанавливают, что для продления срока службы РИ необходимо выполнение следующих мероприятий:

- Комплексное обследование РИ;
- Экспертиза результатов комплексного обследования РИ;
- Оценка остаточного ресурса РИ;
- Разработка компенсирующих мероприятий;
- Согласование и утверждение Решения о продлении срока эксплуатации РИ.

Для продления срока эксплуатации ЗРнИ на практике это означает следующую последовательность действий эксплуатирующей организации.

- 1. Эксплуатирующая организация разрабатывает документы: (НП-024-2000: пункты 2.4, 3.4):
- Программу комплексного обследования систем и элементов ОИАЭ (ЗРнИ), которая утверждается органом управления – Минобрнауки РФ.
- Частные программы обследования, которые утверждаются самой эксплуатирующей организацией.
- Методики расчета остаточного ресурса, которые согласовываются с Ростехнадзором.

При подготовке указанных документов следует пользоваться рекомендациями,

подготовленными ФГУП «Аварийно-Технический центр Росатома» (С.-Петербург) (далее ФГУП АТЦ СПб).

- 2. Проводится Комплексное обследование ЗРнИ в соответствии с «Общей программой комплексного обследования закрытых радионуклидных источников для проведения работ по продлению срока их эксплуатации» (ФГУП АТЦ СПб), согласованной с Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (далее Ростехнадзор) и утвержденной ГК «Росатом» [5]. Обследование проводит эксплуатирующая организация при участии специализированной организации (при необходимости), имеющей лицензии Ростехнадзора на соответствующий вид деятельности. Радиометрические оценки герметичности источников должны выполняться аккредитованной лабораторией.
- 3. По результатам выполненного комплексного обследования оформляется отчет (НП-024-2000: пункты 3.4.7, 3.4.5). В состав отчета должны быть включены следующие разделы:
 - Описание фактических условий хранения и эксплуатации ЗРнИ.
 - Результаты внешнего осмотра.
 - Характеристики помещений, в которых эксплуатируются и хранятся ЗРнИ.
 - Должность и ФИО, ответственного за РБ.
 - Результаты косвенного контроля герметичности ЗРнИ.
 - Выводы о фактическом состоянии ЗРнИ.

Отчет утверждается эксплуатирующей организацией.

4. Проводится экспертиза отчета в организации, имеющей соответствующую лицензию Ростехнадзора ((НП-024-2000: пункты 3.4.5, 3.4.6).

В экспертном заключении должны быть включены следующие разделы:

- Оценка остаточного ресурса ЗРнИ;
- Экспертное заключение по срокам продления;
- Предложения по перечню технических и организационных мероприятий в период продленного срока эксплуатации;
 - Проект Решения о продлении срока службы ЗРнИ.

Экспертное заключение является основой для подготовки решения о продлении срока эксплуатации и программы работ по подготовке ЗРнИ к продлению срока эксплуатации.

Оценку остаточного ресурса ЗРнИ можно выполнять на основании «Методики определения остаточного ресурса ЗРнИ при проведении работ по продлению срока их эксплуатации» (ФГУП АТЦ СПб). Методика использует как теорию кинетической природы прочности твердых тел, так и оценку по предельным состояниям. Оценивается математическое ожидание и распределение долговечности источника при действующих напряжениях и температуре с учетом соответствующих коэффициентов запаса. Напряжения в слабом звене возникают в результате действия давления газовой среды в капсуле с учетом радиогенного гелия (при наличии), а также от действия внешних механических эксплуатационных нагрузок. Учитывается коррозия корпуса ЗРнИ, влияние радиоактивного содержимого и температуры на свойства материалов.

- 5. Эксплуатирующая организация по результатам экспертизы разрабатывает и утверждает решение о продлении срока эксплуатации ЗРнИ (НП-024-2000: пункт 2.11). Это решение согласовывается с Минобрнауки РФ.
- 6. Эксплуатирующая организация разрабатывает программу работ по подготовке ЗРнИ к продлению срока эксплуатации. (НП-024-2000: пункты 2.5, 2.6), которая утверждается Минобрнауки РФ. Но если нет необходимости дополнительных работ, эта программа не разрабатывается, о чем эксплуатирующая организация уведомляет Минобрнауки РФ.

7. Эксплуатирующая организация должна подготовить акт приемки к дополнительному сроку эксплуатации (НП-024-2000: пункт 5.10). Акт утверждается эксплуатирующей организацией.

Функции Минобрнауки РФ и Ростехнадзора при продлении сроков эксплуатации ЗРнИ

Минобрнауки РФ утверждает программы комплексного обследования, согласовывает экспертизы результатов комплексного обследования, согласовывает Решения о продлении срока эксплуатации ЗРнИ. Ростехнадзор согласовывает методики оценки остаточного ресурса, согласовывает программы комплексного обследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны практические рекомендации по обоснованию продления срока службы закрытых радионуклидных источников для учреждений Минобрнауки РФ. Даются пояснения, как применять положения НП-024-2000 «Требования к обоснованию возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии» непосредственно к закрытым радионуклидным источникам.. Данные рекомендации могут полезными быть и для организаций другой ведомственной принадлежности при обосновании продления срока службы закрытых радионуклидных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26апреля 2010 г. №40) [Текст].
- 2. НП-053-04 «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных отходов». Утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 4 октября 2004 г. №5 [Текст].
- 3. Федеральный закон от 21.11.1995 N 170-ФЗ (ред. от 03.07.2016) «Об использовании атомной энергии» [Текст].
- 4. НП-024-2000 «Требования к обоснованию возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии». Утверждены постановлением Госатомнадзора России от 28 декабря 2000 г. №16 [Текст].
- 5. Федеральный закон от 01.12.2007 № 317-ФЗ (ред. от 03.07.2016) «О Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» [Текст].

REFERENCES

- [1] Sanitarnye pravila i normativy SP 2.6.1.2612-10 Osnovnye sanitarnye pravila obespechenija radiacionnojj bezopasnosti (OSPORB-99/2010) (utv. postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 26aprelja 2010 g. №40) [Sanitary rules and standards of SP 2.6.1.2612-10 Basic Sanitary Rules for Ensuring Radiation Safety (OSPORB-99/2010) (approved by the resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation No. 40 of April 26, 2010)] (in Russian)
- [2] NP-053-04 «Pravila bezopasnosti pri transportirovanii radioaktivnykh otkhodov». Utverzhdeny postanovleniem Federal'nojj sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 4 oktjabrja 2004 g. №5. [NP-053-04 "Safety Rules for the Transport of Radioactive Waste". Approved by the resolution of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of October 4, 2004 No. 5] (in Russian)
- [3] Federal'nyjj zakon ot 21.11.1995 N 170-FZ (red. ot 03.07.2016) «Ob ispol'zovanii atomnojj ehnergii» [Federal Law of 21.11.1995 N 170-FZ (03.07.2016) "The Use of Atomic Energy"]. (in Russian)
- [4] NP-024-2000 «Trebovanija k obosnovaniju vozmozhnosti prodlenija naznachennogo sroka ehkspluatacii ob"ektov ispol'zovanija atomnojj ehnergii». Utverzhdeny postanovleniem Gosatomnadzora Rossii ot 28 dekabrja 2000 g. №16 [NP-024-2000 "Requirements for the Justification of the Possibility of Extending the Designated Lifetime of Nuclear Power Facilities".

- Approved by Resolution of the Gosatomnadzor of Russia of December 28, 2000 No. 16]. (in Russian)
- [5] Federal'nyjj zakon ot 01.12.2007 № 317-FZ (red. ot 03.07.2016) «O Gosudarstvennojj korporacii po atomnojj ehnergii «Rosatom» [Federal Law No. 317-FZ, December 1, 2007 (edited 03.07.2016) "State Atomic Energy Corporation" Rosatom "]. (in Russian)

Practical Recommendations for the Institutions of Ministry of Education and Science of the Russian Federation on the Rationale of Prolonging of Sealed Radionuclide Sources Life Time

A.A. Serebryakov¹, V.N. Fedoseev², L.I. Yakovlev³, A.A. Portnov⁴, Ye.M. Tyurin⁵, M.I. Pisarevskij⁶

National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409 ORCID: 0000-0002-4549-7933 WoS ResearcherID: R-4218-2017 e-mail: AASerebryakov@mephi.ru; ² ORCID: 0000-0002-1612-5161 WoS ResearcherID: R-7626-2017 e-mail: fedvn59@mail.ru; ³ ORCID: 0000-0001-6981-3585 WoS ResearcherID: R-4259-2017 e-mail: LIYakovlev@mephi.ru: ⁴ ORCID: 0000-0002-1405-4021 WoS ResearcherID: J-9316-2013 e-mail: AAPORTNOV@mephi.ru; ORCID: 0000-0002-0100-0702 WoS ResearcherID: R-3471-2017 e-mail: tempost@mail.ru; ⁶ ORCID: 0000-0002-3578-6942 WoS ResearcherID: O-8221-2017 e-mail: MIPisarevskij@mephi.ru

Abstract – The article offers practical recommendations for prolonging of the sealed radionuclide sources life time, developed by MEPhI experts, participating in the working group of the Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for recognizing the organization suitable for operating a nuclear installation, radiation source or storage facility, and also carrying out activities for handling nuclear materials and radioactive substances. It explains how to apply the provisions of NP-024-2000 "Requirements for justifying the possibility of extending the designated lifetime of nuclear facilities" directly to sealed radionuclide sources.

Keywords: radiation source, storage point, handling of nuclear materials and radioactive substances, nuclear and radiation safety, potential radiation hazard, nuclear and radiation hazard facility, nuclear energy facility, residual resource, comprehensive technical condition survey.

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

УДК [621.311.25:551.5](569.5)

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЙОНА АЭС «БУШЕР» В ИРАНЕ

© 2017 А.П. Елохин, Е.А. Алалем, А.И. Ксенофонтов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе рассматривается метод оценки необходимого и достаточного количества постов автоматизированной системы радиационной обстановки окружающей среды в санитарно-защитной зоне второго блока АЭС «Бушер» в Иране, размещаемых вокруг АЭС, а также обоснование способа их расстановки.

В основе метода лежат данные метеорологических наблюдений в указанном районе, представляющие собой результаты измерений скорости ветра и температуры на различной высоте на метеомачте и методика градиентных наблюдений указанных характеристик, для каждого месяца в течение 2006–2010 гг.

Полученные характеристики дают возможность провести расчёты состояния устойчивости атмосферы в рамках известной модели её приземного слоя и определяющие его метеорологические параметры - скорости воздушного потока, температуру, коэффициент турбулентной диффузии и энергию турбулентных пульсаций в виде функций высоты, путём решения замкнутой системы уравнений, описывающих состояние приземного слоя атмосферы.

Знание метеопараметров атмосферы позволяет сформулировать задачу по оценке радиоактивного загрязнения окружающей среды путём решения уравнения турбулентной диффузии в условиях гипотетической радиационной аварии на АЭС «Бушер» и определить необходимое и достаточное число постов АСКРО, а также способ их расстановки вокруг АЭС, позволяющий учесть ограниченность информации относительно радионуклидного состава радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере в условиях аварии.

Работа может представлять интерес для работников атомной промышленности, занимающихся эксплуатацией Атомных электростанций, научных сотрудников проектных организаций, разрабатывающих проекты автоматизированных систем типа АСКРО для предприятий атомной, металлургической и химической промышленности, экологов и др.

Ключевые слова: радиационная авария, метеорологические характеристики, ионизирующее излучение, радиоактивное загрязнение окружающей среды, детекторы ионизирующего излучения, устойчивое и неустойчивое состояния атмосферы.

Поступила в редакцию: 08.12.2017

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] авторами рассматривались основные параметры района размещения проектируемой АЭС «Бушер» (1-го блока) в Иране с последующей систематизацией данных по основным характеристикам площадки, намеченной для строительства атомной электростанции. В представленной работе тема получила дальнейшее развитие, но основное внимание уделялось изучению метеорологических характеристик площадки АЭС и обоснованию системы радиационного контроля путём прогнозирования радиоактивного загрязнения окружающей среды при гипотетической радиационной аварии.

Моделирование распространения радиоактивного загрязнения окружающей играет важную роль при проектировании объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), в частности, атомных станций. В случаях, когда необходимо минимизировать степень экологической опасности, важно своевременно и максимально точно определить направление возможного распространения радиоактивной примяси, ее объемную активность, а также характер распределения радиоактивного следа на местности.

В рассматриваемом нами случае ОИАЭ является стационарным объектом (АЭС). Его особенностью является то, что выход радионуклидов в атмосферу, происходит, как правило, на большой высоте, что является причиной распространения радиоактивного загрязнения на обширной территории. Газоаэрозольные выбросы создают в атмосферном воздухе аэродисперсные массы, которые в результате турбулентного движения долгое время удерживаются в атмосфере и переносятся воздушными потоками из района расположения станции на значительное расстояние [2]. Скорость и дальность переноса таких масс зависит от турбулентных течений в атмосфере, времени их существования в воздухе, метеорологических условий, а также скорости и направления атмосферных потоков и периода полураспада радионуклидов.

Физическая сторона рассматриваемой проблемы связана с анализом распространения и осаждения радионуклидов. Однако практически все компьютерные модели нуждаются в постоянной корректировке определенных данных, основанных на экологических и метеорологических наблюдениях.

В рассматриваемой работе необходимые метеорологические параметры предварительно получали путём их измерения на метеорологической мачте, а общий характер их зависимости как функции высоты — на основе решения замкнутой системы уравнений приземного слоя атмосферы [3].

1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА

Для моделирования возникновения гипотетической аварии с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу и определения уровней радиоактивного загрязнения окружающей среды, а также дозовых нагрузок на персонал и население предполагается использование автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО), общие характеристики которой достаточно подробно представлены в работах [4-7]. Данная система способна предоставить текущую информацию по развитию радиационной аварии в режиме реального времени всем необходимым структурам для своевременной оценки риска и принятия решений с целью минимизации последствий аварии.

В соответствии со сказанным выше, можно считать, что система АСКРО обеспечена соответствующими приборами и оборудованием, которое предназначено для целей сбора и обработки информации по радиоактивному загрязнению окружающей среды, оценки дозовых нагрузок на персонал и население, передачи обработанной информации руководству для принятия решений в соответствии с планом-мероприятий в случае возникновения радиационной аварии на АЭС [8].

В настоящей работе при рассмотрении сценария, обусловленного выходом радиоактивных газоаэрозольных примесей в атмосферу, рассматривается задача оценки необходимого и достаточного количества детекторов у-излучения, размещаемых в санитарно-защитной зоне АЭС в рамках АСКРО, с целью надёжной регистрации радиоактивного облака или факела выбросов, переносимых ветром в атмосфере. Приводится математическая формулировка постановки задачи и метод ее решения.

Рассматривая в качестве субстанции объемную активность газоаэрозольной

радиоактивной примеси, загрязняющей окружающую среду, q(x, y, z) (Ku/m^3), метеопараметры атмосферы: u(z) — продольную скорость воздушного потока (поперечную скорость полагаем равной нулю), k(z) — коэффициент турбулентной диффузии и b(z) — энергию турбулентных пульсаций (энергию турбулентных вихрей), определяемые в рамках модели приземного слоя атмосферы, находим, используя физико-математический аппарат работы [3].

$$k(z) = \chi v_* L k_n; \quad u(z) = v_* u_n / \chi; \quad b = v_*^2 c^{-1/2} b_n = 4,6625 \ v_*^2 b_n,$$
 (1)

где $z_n = z/L$ — безразмерная высота;

L – масштаб Монина - Обухова (масштаб приземного слоя атмосферы);

 b_n – безразмерная энергия турбулентных пульсаций;

c — постоянная;

 u_n – безразмерная скорость ветра;

 v_* – динамическая скорость;

 $\chi = 0.4$ – постоянная Кармана;

 θ — потенциальная температура $\theta = T(1000/P)^{0.29}$ (T — температура °K;

P – атмосферное давление мбар;

 $heta_n$ – ее безразмерная величина $heta_n = -\chi\, heta/ heta_*$, $heta_* = P_0/(
ho c_{_D}
u_*)$,

 P_0 – поток тепла,

ρ – плотность воздуха,

 c_P – удельная теплоемкость);

 $\alpha_{\rm T} = k_{\rm T}/k$ — отношение коэффициента турбулентности для тепла и количества движения.

$$z_n = 2/y - 2y^3/3 - 4/3;$$
 (2)

$$k_n = 1 - y^4, \tag{3}$$

где y – табулированное значение для различных z_n [3].

Для безразмерных u_n , b_n , получаем следующие выражения:

$$u_n = 2/y + 2arctg(y) + \ln\frac{|1-y|}{1+y} + c_1;$$
 (4)

$$b_n = y^2; (5)$$

$$\theta_n = \int_{z_{0n}}^{z_n} \frac{dz_n}{\alpha_T k_n};\tag{6}$$

$$L = -\frac{v_*}{\chi(g/T_0)(P_0/\rho c_p)},\tag{7}$$

где g – ускорение свободного падения;

 T_0 – температура на уровне земли.

Уравнение (2) относительно у имеет аналитическое решение Феррари и зависит

от z_n следующим образом [6,7]:

$$y = \begin{cases} -\sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B)-4\left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2}\right)^2 + 3}\right]}; & z_n \ge -\frac{4}{3}; \\ \sqrt{A+B} + \sqrt{(A+B)-4\left[\frac{A+B}{2} - \sqrt{\left(\frac{A+B}{2}\right)^2 + 3}\right]}; & z_n \le -\frac{4}{3}; \end{cases}$$
где $A = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} + \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}; } B = \sqrt[3]{\frac{(2+1,5z_n)^2}{2} - \sqrt{64 + \frac{(2+1,5z_n)^4}{4}}}.$

Зависимости скорости приземного ветра u(z), коэффициента турбулентной диффузии k(z) и энергии турбулентных пульсаций b(z) как функций высоты z в рамках модели приземного слоя атмосферы могут быть успешно найдены, если известны параметры приземного слоя: v* и L. Значения последних находят, используя методику градиентных наблюдений над скоростью ветра и температурой следующим образом [3,6-7]. Измеряют на двух уровнях скорость ветра и температуру, например, $z_1 = 2H$, $z_2 = 0.5H$ (H = 1м). Находят разности $Du = u(z_1) - u(z_2)$; $D\theta = \theta(z_1) - \theta(z_2)$. Используя формулу (7) и выражение для скорости ветра и температуры через безразмерные величины, получают $P_0/\rho_{CP} = -\chi v* D\theta/D\theta_n$;

$$Du = v_* Du_n / \chi; \left(Du / Du_n \right)^2 = \left(g / T_0 \right) L \left(D\theta / D\theta_n \right), \tag{9}$$

где u_n ; θ_n — табулированные значения универсальных функций, вычисленных для различных z_n ($z_n = z/L$) [3], Du_n ;

 $D\theta_n$ – их разность.

Поскольку Du; $D\theta$ - измеряемые величины, а Du_n ; $D\theta_n$ зависят от масштаба Монина - Обухова L, то выражение (9) есть явно-неявная функция L. Для нахождения L задаются некоторым значением L_{\max} и варьируют его, например, $L_i = DL \cdot i$, i = 1,2,3,...,N; $DL = L_{\max}/N$ до тех пор, пока разность ξ или относительная погрешность ε не будет минимальной (в пределе $\varepsilon \to 0$, см. рис. 1).

$$\xi = \left| \left(\frac{Du}{Du_n} \right)^2 - \frac{g}{T_0} L \frac{D\theta}{D\theta_n} \right|, \quad \varepsilon = \left| \frac{\left(Du/Du_n \right)^2 - \left(gL/T_0 \right) \left(D\theta/D\theta_n \right)}{\left(Du/Du_n \right)^2} \right| \cdot 100\% \tag{10}$$

Найденное значение L^* , при котором ε минимальна, и определит искомое значение L: $L^* = DL \cdot i^*$. Определив масштаб Монина — Обухова L и пересчитав z_n при фиксированных z_1 и z_2 , т.е., таким образом, пересчитав $D\theta_n$; Du_n , найдем v_* :

$$v'_* = \chi \frac{Du}{Du_n} \tag{11}$$

или

$$v_*'' = \chi \sqrt{(gL/T_0)(D\theta/D\theta_n)}.$$
 (12)

При стремлении $\varepsilon \to 0$ $v'_* \to v''_*$. Рассмотренный метод более целесообразен при расчёте метеопараметров на ЭВМ. Следует отметить, что представление ε в виде зависимостей (11) и (12), собственно говоря, и позволяет находить масштаб приземного слоя атмосферы L в виде выражения (10). Поскольку параметр L может быть как L>0 так и L<0 (при L=0 режим движения теряет турбулентный характер [3]), то всевозможные вариации L_i должны проводится по формуле: $L_i=DL(N+1-i),$ i=1,2,3,...,N, N+1, N+2,...,2N+1. Последнее позволяет учесть различную стратификацию слоя атмосферы, задаваемую температурным режимом. Для расчета $u_n(z_n)$, $k_n(z_n)$ при найденном L целесообразно пользоваться не таблицами, а аналитическим значением y как функцией z_n , определяемой формулой (8), а для оценки разности безразмерных скорости воздушного потока и температуры в соответствии с видом этих зависимостей, определяемых формулами (4), (6), использовать выражения:

$$Du_{n} = u_{n}(z_{1n}) - u_{n}(z_{2n}) = 2\left(\frac{y(z_{2n}) - y(z_{1n})}{y(z_{2n})y(z_{1n})}\right) + 2\left(arctg(y(z_{1n})) - arctg(y(z_{2n}))\right) + \ln\left(\frac{|1 - y(z_{1n})|}{|1 - y(z_{2n})|}\frac{1 + y(z_{2n})}{1 + y(z_{1n})}\right),$$

$$D\theta_{n} = \int_{z_{2n}}^{z_{1n}} \frac{1}{\alpha_{T}(z_{n})[1 - (y(z_{n}))^{4}]} dz_{n}.$$

Выбор u_n , θ_n по заданному z_n осуществляется следующим образом: при известном z_n находят y, по которому из таблицы находят значения соответствующие u_n или θ_n . Аналогично находят значения этих функций для другого значения z_n (другого уровня), вычисляя затем разности Δu_n , $\Delta \theta_n$. После определения параметров L, v_* значения u(z), k(z) находят по формулам (1). Постоянную c_1 в (4) находят при $z=z_0$ и $u(z)\Big|_{z=z_0}=0$.

Для определения зависимости метеопараметров атмосферы, таких как скорость приземного ветра u(z) и коэффициент турбулентной диффузии k(z), как функций от высоты над подстилающей поверхностью (z), использовались параметры, полученные с метеовышки, находящейся на расстоянии около $100\,$ км от промплощадки АЭС. Собранные с двух высотных отметок метеоданные по температуре, давлению, скорости и направлению ветра были усреднены помесячно.

Таблица 1. – Характеристики нижнего 100-метрового слоя атмосферы по результатам измерений на мачте в 2006 – 2010 годы [9] [Characteristics of the lower 100-meter atmosphere layer as measured by mast in 2006–2010]

					-			•			-		
Месяцы													
Высота,	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
M													
Температура воздуха, °С													
10	12,3	16,9	20,5	25,6	30,7	32,6	33,7	33,9	31,9	28,0	21,8	19,9	26,7
45	12,7	16,6	20,9	26,0	30,8	32,3	33,6	33,9	32,3	238,	22,6	21,7	27,0
										9			
80	13,0	16,9	21,6	26,6	31,4	32,8	33,9	34,0	32,5	29,2	23,0	22,0	27,4
100	13,1	16,9	21,9	26,8	31,6	32,8	33,9	33,7	32,1	28,8	23,1	21,8	27,3
	Скорость ветра, м/с												
10	3,0	2,8	3,2	3,3	3,2	3,6	3,3	2,7	2,7	2,5	3,0	2,9	3,0
45	5,0	5,0	5,0	4,9	4,7	5,0	4,6	3,7	3,9	3,7	4,9	4,5	4,5
80	6,0	6,0	6,0	5,6	5,5	5,8	5,2	3,9	4,3	4,1	5,8	5,1	5,1
100	6,4	6,5	6,5	6,0	6,0	6,4	5,7	4,1	4,5	4,3	6,2	5,4	5,5

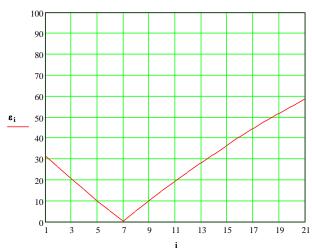
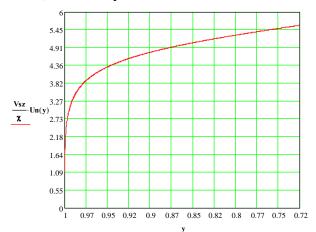


Рис. 1. — Значения индекса i, где наблюдается минимальная относительная погрешность ε_i (февраль) [Value of the index i, with which the minimum relative error ε_i is observed (February)]

Усредненные метеорологические данные учетом указанного распределения и оценкой минимальных и максимальных значений представлены в таблице 1. Значения температуры уровне подстилающей воздуха поверхности в точке $z = z_0$, получали методом eë экстраполяции, требуя непрерывности производной, обеспечивающей «гладкость» кривой, метеоданным построенной метеовышки сглаженной путём Расчёт применения сплайнов. метеопараметров проводился наиболее характерных метеорологических условий указанных в таблице сезонов, а именно для января (I), февраля (II), марта (III),

июля (VII) и августа (VIII) [9].

При определенной в ходе расчета минимальной относительной погрешности $\varepsilon(i)$ были получены экстремальные значения индекса i, при которых наблюдается минимум ε_i , используемый для дальнейшего вычисления масштаба Монина-Обухова L, а



устойчивом состоянии атмосферы (расчет авторов), характеризуемых параметрами L=85 м; $v^*=0,229$ ($y=1 \rightarrow z=0$; $y=0,72 \rightarrow z=100$ м (февраль) [Distribution of wind speed in atmosphere stable state (authors' calculation), characterized by parameters L=85 m; $v^*=0.229$ ($y=1 \rightarrow z=0$;

 $y = 0.72 \rightarrow z = 100 \text{ m (February)}$

Рис. 2. – Распределение скорости ветра при

найденные значения v_* по формуле (11), дали возможность рассчитать по формулам (1) значения скорости воздушного потока u(z), коэффициента турбулентной диффузии k(z) и энергии турбулентных пульсаций b(z), которые приведены на соответствующих рисунках для каждого из указанных месяцев. зависимости, приведенном рисунке 1, показывает, что с ростом индекса iотносительная погрешность $\varepsilon(i)$ уменьшается до нуля при некотором $i^* = 7$, определяя, таким образом, $L_i^* = \Delta L \cdot i^*$, и затем снова резко возрастает, определяя расходимость решения. Подобный характер зависимости $\varepsilon(i)$ оказывается справедливым практически для всех сезонов. На рисунке 2 приведена зависимость распределения скорости ветра $U_n(y)$ как функции у (высоты z), учитывая, что зависимость $y(z_n)$ определяется формулой (8). На рисунке 3 приведена зависимость

коэффициента турбулентной диффузии k(y), а на рисунке 4 – зависимость от y энергии турбулентных пульсаций b(y). Аналогичные характеристики для января, марта, июля и августа приведены в приложении. Анализ полученных в ходе расчета значений масштаба приземного слоя (параметра Монина-Обухова) L позволил сделать вывод, что характер состояния атмосферы в районе площадки АЭС «Бушер» в общем, является изменчивым, т.е. изменяется от устойчивого (L=85) до средне неустойчивого (L=80). Об этом, в частности, свидетельствуют сезонные изменения диапазона скорости ветра и температуры.

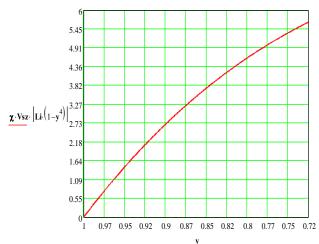


Рис. 3. — Зависимость коэффициента турбулентной диффузии k(z), для устойчивого состояния атмосферы L=85; $v^*=0,229$ (февраль) [Dependence of turbulent diffusion coefficient k(z), for atmosphere stable state L=85; $v^*=0.229$ (February)]

неустойчивом состояниях атмосферы. Существенным признаком устойчивого неустойчивого И состояний атмосферы является отличие зависимостей профиля ветра воздушного потока и коэффициента турбулентной диффузии как функций высоты при том другом атмосферы. При состояниях устойчивом состоянии атмосферы для воздушного скорости потока характерен её рост с высотой и небольшой коэффициент турбулентной диффузии. Напротив, неустойчивом состоянии при

Характер полученных зависимостей скорости ветра u(z) (см. рис. 2) и коэффициента турбулентной диффузии k(z) (см. рис. 3) как функций высоты д для устойчивого состояния атмосферы хорошо согласуется известными в литературе данными для зависимостей указанных при соответствующем состоянии атмосферы [3,6-7,10], что позволяет констатировать, что расчёты проведены корректно.

Затрагивая вопрос корректности расчетов, целесообразно указать на отличия в поведении рассматриваемых функций при устойчивом и

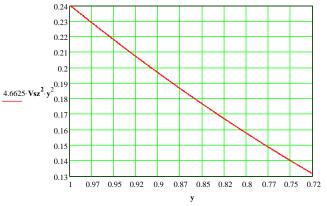


Рис. 4. — Зависимость энергии турбулентных пульсаций b(z), для устойчивого состояния атмосферы L=85; v*=0,229 (февраль) [Dependence of turbulent pulsatioenergy b (z), for atmosphere stable state L=85; v*=0.229 (February)]

атмосферы наблюдается иная картина — слабое изменение с высотой скорости воздушного потока u(z) и значительный рост величины коэффициента турбулентной диффузии k(z). При устойчивом и неустойчивом состояниях атмосферы меняется и характер зависимости энергии турбулентных пульсаций: при устойчивом состоянии зависимость b(z) уменьшается с ростом высоты z, а при неустойчивом растёт. Усреднённые значения указанных величин, включая масштаб приземного слоя атмосферы Монина-Обухова L и динамическую скорость V_* , приведены в таблице 2.

Таблица 2. — Усреднённые характеристики метеопараметров атмосферы [Averaged characteristics of atmosphere meteorological parameters]

Месяц	$U_{ m cp}$ м/с	$K_{\rm cp}~{\rm M}^2/{\rm c}$	$b_{\rm cp}~{\rm m}^2/{\rm c}^2$	<i>L</i> , м	V_*
январь	4,87	2,88	0,169	62,5	0,23
февраль	4,814	3,266	0,183	85	0,229
март	4,814	3,266	0,183	85	0,229
июль	4,815	14,187	1,643	-5,556	0,288
август	3,341	8,895	0,577	-8,667	0,198

Перенос радиоактивной примеси в атмосфере рассчитывают, используя уравнение турбулентной диффузии для функции q(x,y,z), полагая при этом, что размывание примеси по оси Y осуществляется по закону Гаусса. В этом случае объёмная активность примеси определяется формулой:

$$q(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_{y}(x)} \exp(-y^{2}/2\sigma_{y}^{2}),$$
 (13)

где $\sigma_y(x)$ – среднеквадратичное отклонение; функция S(x, z) определяется выражением:

$$S(x,z) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(x,y,z) dy = 2 \int_{0}^{+\infty} q(x,y,z) dy.$$
 (14)

Таким образом, для объемной концентрации газоаэрозольной примеси получают уравнение:

$$u\frac{\partial S}{\partial x} - w\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \tag{15}$$

где $\varphi(x,z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y,z) dy = M\delta(x)\delta(z-h_{9\phi});$

 $f = M\delta(x)\delta(y)\delta(z-h_{9\varphi})$ — источник газоаэрозольной примеси, загрязняющий окружающую среду;

M – мощность выброса (Бк/с);

 $h_{\rm bh}$ – эффективная высота выброса;

 σ — постоянная релаксации радиоактивной газоаэрозольной загрязняющей примеси, представляющая собой постоянную вымывания примеси из атмосферы σ_0 (c⁻¹), так что $\sigma = \sigma_0$; w — гравитационная скорость осаждения примеси.

В рамках рассматриваемой модели переноса величину $\sigma_y^2(x)$ представляют в виде: $\sigma_y^2(x) = \bar{b} x^2/\bar{u}^2 \left(1 + ax\bar{b}/\bar{k}\bar{u}\right)$, где \bar{b} , \bar{k} , \bar{u} — усредненные по приземному слою высотой $H_{\rm np} \approx 100$ м с весом S(x,z) значения энергии турбулентных пульсаций b(z), коэффициента турбулентной диффузии k(z) и скорости ветра u(z), $\alpha=0.015$.

$$\overline{b} = \frac{\int_{0}^{H_{\text{lim}}} b(z) \left(\int_{0}^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_{0}^{H_{\text{lim}}} \left(\int_{0}^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}; \quad \overline{k} = \frac{\int_{0}^{H_{\text{lim}}} k(z) \left(\int_{0}^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_{0}^{H_{\text{lim}}} \left(\int_{0}^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}; \quad \overline{u} = \frac{\int_{0}^{H_{\text{lim}}} u(z) \left(\int_{0}^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}{\int_{0}^{H_{\text{lim}}} \left(\int_{0}^{\infty} S(x, z) dx \right) dz}.$$

Граничные условия определяются выражениями:

$$S(x,z)|_{z=0} = 0; (16)$$

$$S(x,z)|_{z=0} = 0; (17)$$

$$S(x,z)\big|_{z\to\infty} = 0; (18)$$

$$k \frac{\partial S}{\partial z}\Big|_{z=z_0} = (\beta - w)S\Big|_{z=z_0}, \qquad (19)$$

где β – скорость сухого осаждения газоаэрозольной примести на подстилающую поверхность;

 z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Аналитическое решение этой частной задачи (15) – (19) дается выражением (20), непосредственно объемная активность газоаэрозольной примеси радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, вычисляется по формуле (13).

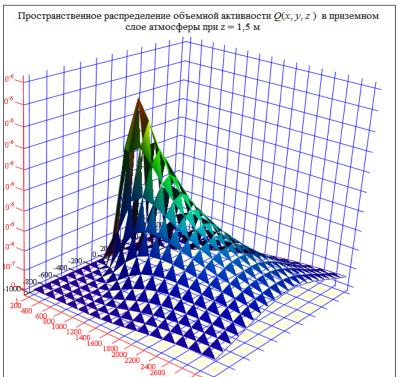
$$S(x,z) = \frac{M}{2} \exp\left(-\left[\frac{\sigma_{0}x}{\bar{u}} + \frac{w^{2}x}{4\bar{k}\bar{u}} + \frac{w(z-h_{s\phi})}{2\bar{k}}\right]\right) \begin{cases} \frac{\exp\left(-\left[z+h_{s\phi}\right]^{2}\bar{u}/4\bar{k}x\right) + \exp\left(-\left[z-h_{s\phi}\right]^{2}\bar{u}/4\bar{k}x\right)}{\sqrt{\pi\bar{k}\bar{u}x}} \\ -\frac{(2\beta-w)}{\bar{k}\bar{u}} \exp\left[-\frac{(2\beta-w)(z+h_{s\phi})}{2\bar{k}} + \left(\frac{2\beta-w}{2\bar{k}}\right)^{2}\frac{\bar{k}x}{\bar{u}}\right] \times \end{cases}$$

$$\times erfc\left[\left(\frac{2\beta-w}{2\bar{k}}\right)\sqrt{\bar{k}x/\bar{u}} + \frac{(z+h_{s\phi})}{2\sqrt{\bar{k}x/\bar{u}}}\right]$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчётов указанных зависимостей u(z), k(z) и b(z) как функций высоты над подстилающей поверхностью, а также их усреднённые значения дают возможность получить осевые, поперечные распределения объёмной активности в зависимости от состояния устойчивости приземного слоя атмосферы, а также представить её общий характер.

Наглядное представление общего характера распределения объёмной активности, которая описывается формулами (13), (20), дает зависимость, представленная на рисунке 5.



Puc. 5. – Распределение объемной активности газоаэрозольной радиоактивной примеси как функции x, y при z = 1,5 м [Volumetric activity distribution of a gas-aerosol radioactive impurity x, y at z = 1.5 m function]

К сожалению, точность такого рода распределений не всегда бывает достаточно высокой, поскольку ряд параметров, определяющих функцию распределения S(x, z) (см. выражение (20)) и дисперсию $\sigma_v(x)$, содержат данные, полученные экспериментально,

т.е. с определенной погрешностью. Последнее может привести к тому, что на расстояниях от источника выброса, начиная с 10 км, точность оценки будет превышать порядок рассматриваемой величины [11]. Поэтому в условиях радиационных аварий необходимо, по возможности, уточнять состояние устойчивости атмосферы, используя более надежные технологии измерения, а также использовать радиоуправляемые беспилотные средства дозиметрического контроля типа беспилотного дозиметрического комплекса (БДК) [6], позволяющие провести как дозиметрический, так и радиометрический контроль воздушного бассейна и подстилающей поверхности в режиме реального времени.

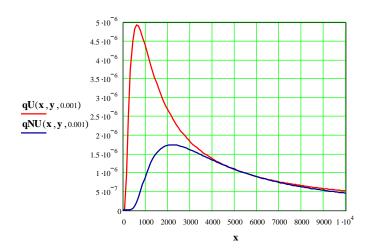


Рис. 6. – Осевые распределения выбросов объемной активности q(x, y = 0, z = 1,5) газоаэрозольной радиоактивной примеси при неустойчивом состоянии атмосферы (выделено красным) и при устойчивом (выделено синим) (февраль) [The axial distributions of the volumetric activity q(x, y = 0, z = 1.5) emissions of a gas-aerosol radioactive impurity at atmosphere unstable state (red) and stable (blue) (February)]

Знание величины объемной активности характер распределения атмосфере позволяет получить расчетные оценки мощности дозы OT объемного источника И OT поверхностного загрязнения подстилающей поверхности, используя интегральные методы [12] или метод Монте-Карло [13-16] вблизи источника выбросов, или, при измеренных значениях объёмной активности, получить указанные оценки рамках концепции лучевого равновесия [17] территории, на расположенной на расстояниях от источника от 700 до 10000 м [6, 7].

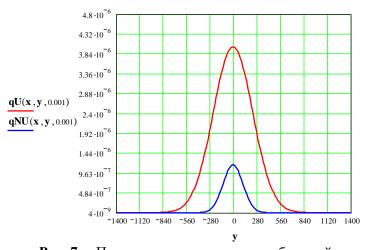


Рис. 7. – Поперечное распределение объемной активности q(x, y = 0, z = 1,5) газоаэрозольной радиоактивной примеси при неустойчивом состоянии атмосферы (выделено красным) и при устойчивом (выделено синим) на расстоянии от источника x = 1200 м (февраль) [The transverse distribution of the volumetric activity q (x, y = 0, z = 1.5) of the gas-aerosol radioactive impurity in atmosphere unstable state (red) and stable (blue) at a distance x = 1200 m (February)]

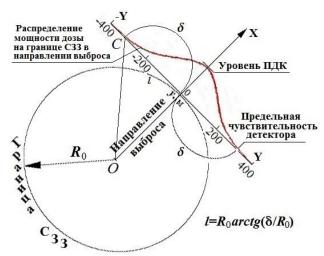


Рис. 8. – Иллюстрация выбора оптимального количества датчиков АСКРО. На оси X0Y на границе С33 в направлении выброса приведено поперечное распределение мощности дозы, создаваемой газоаэрозольной радиоактивной примесью. R_0 – радиус C33 [19] [Illustration of the choice of the optimum number of sensors ASKRO. On the X0Y axis, a transverse distribution of the dose rate produced by the gas-aerosol radioactive impurity is shown at the border of the sanitary protection zone in the direction of ejection. R0 is the radius of the sanitary protection zone]

Ha рисунке рамках рассматриваемой приведены задачи, результаты расчета осевого распределения радиоактивной примеси для полученных значений состояний устойчивости атмосферы, а на рис. 7 – результаты расчетов поперечного распределения радиоактивной примеси на границе санитарно-защитной зоны (C33) радиусом $R_0 = 1200$ м. Это распределение может использовано для оценки необходимого достаточного постов контроля, размещаемых вокруг АЭС, следующим образом. В соответствии с нормативным документом [18] (см. таблицу 3.1 указанного документа) на границе СЗЗ АЭС для населения установлена годовая доза, составляющая 5 мЗв в год, которая будет определяться мощностью дозы 0,57 мкЗв/ч или 57 мкР/ч. Принимая, что максимум того или распределений, приведённых на рис. 7, соответствует этой величине, предельная чувствительность

стандартного γ -детектора составляет $P_{\rm np}=10$ мкР/ч, найдем, используя линейную интерполяцию для каждой из приведённых зависимостей, что для неустойчивого состояния атмосферы величина $P_{\rm np}$ может быть зарегистрирована на расстоянии $\delta_{\rm нy}=420$ м от оси выброса, а для устойчивого — $\delta_{\rm уст}=224$ м. Далее для оценки необходимого и достаточного количества датчиков, размещаемых вокруг АЭС, воспользуемся иллюстрацией, приведенной на рис. 8. Определяя величиной δ расстояние, на котором γ -детектор регистрирует $P_{\rm np}$ от газоаэрозольной примеси, поперечное распределение которой описывается той или иной кривой на рис. 7, характерной для того или иного состояния атмосферы, найдем длину дуги l, отсекаемую на окружности радиуса R_0 сектором, тангенс которого равен (δ/R_0). Тогда длина дуги определится несложной формулой [19, 20]:

$$l = R_0 arctg \left(\frac{\delta}{R_0} \right) \tag{21}$$

При этом необходимое число датчиков, размещаемых вокруг АЭС при неустойчивом или устойчивом состояниях атмосферы, полагая, что любое азимутальное направление выброса из 2π является равновероятным, отбрасывая мантиссу, найдём как отношение:

$$N_{H} = \pi R_{0}/l = \pi/arctg(\delta/R_{0}), \qquad (22)$$

а минимальное достаточное: $N_{\rm д} = N_{\rm H} + 1$.

Подставляя соответствующие значения δ для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы, находим: $N_{\rm д, нy} = 10$, $N_{\rm д, ycr} = 18$. Выбирая наиболее худший

вариант, можно констатировать, что для АЭС «Бушер» минимально достаточное число постов контроля составляет 18. При этом модель, согласно которой осуществлялась оценка числа постов, предполагает их размещение по периметру СЗЗ с равномерным их распределением по азимуту.

3. ОБСУЖДЕНИЕ



Рис. 9. – Расстановка постов АСКРО на АЭС «Бушер» 1-го блока [9] [Arrangement of ASKRO posts at Unit 1 Bushehr NPP]

К размещению постов контроля в C33 предъявляют экономические, экологические, демографические требования и физические критерии [19, 20].

Экономические требования ограничению числа сводятся к постов (датчиков), что обусловлено высокой стоимостью линий связи, оборудования (датчиков, приемопередающих информацию устройств, систем персональных ЭВМ), зарплатой обслуживающего персонала, затратами на социальные нужды и т.д.

Экологические требования сводятся к обеспечению высокой степени информативности об уровнях загрязнения окружающей среды при любом направлении выброса, чего можно достигнуть увеличением числа постов контроля на промышленной площадке и в СЗЗ [21].

Демографические – определякритерием численности ются населения: пост контроля совместно с информационным табло общего пользования, на котором обычно выводится информация текущего времени, давлении, температуры влажности воздуха, его загрязненности. Его целесообразно устанавливать в населенном пункте с числом жителей не менее N чел., где значение N будет определяться как

социально-экономическими условиями населения населенного пункта (установка постов в населённых пунктах осуществляется за счёт финансовых средств муниципалитета), так и стремлением жителей к получению информации об уровнях экологического загрязнения окружающей среды. Противоречие экономических и экологических критериев приводит к необходимости оптимизации числа датчиков, размещаемых вокруг АЭС. Эта оптимизация оказывается возможной при использовании соответствующего физико-математического аппарата, приведённого

выше. Однако, кроме определения оптимального числа датчиков АСКРО требуется удовлетворять ещё и некоторым критериям надёжности системы в целом, что приводит к необходимости разумного увеличения их числа в СЗЗ, например, за счёт дублирования некоторого числа датчиков.

При расстановке постов радиационного контроля при пуске 1-го блока АЭС "Бушер", представленного на рисунке 9 [9], руководствовались, по-видимому, в основном демографическими критериями, поскольку посты представлены только населёнными пунктами с расстоянием от АЭС от 1600 м (Марварид) до (Хадакан) 59460 м, что не позволяет использовать результаты измерений радиационного фона, регистрируемого соответствующими детекторами, для корректировки прогностических расчётов радиационного загрязнения окружающей среды при радиационной аварии на АЭС «Бушер». равномерности азимутального 0 распределения говорить вообще не приходится, поскольку он вообще отсутствует. Орография подстилающей поверхности (рельеф местности) значительно изменяется, предъявляет весьма жесткие требования к программному обеспечению, осуществляющему прогностические оценки радиоактивного загрязнения окружающей среды при возникновении радиационной аварии.

Таким образом, в случае возникновения радиационной аварии на АЭС «Бушер» систему постов радиационного контроля, представленную на рис. 9, невозможно использовать для корректировки прогностических расчётов с целью их уточнения, что указывает на крайнюю ограниченность системы АСКРО при таком методе размещения её постов радиационного контроля.

Рассмотренный выше принцип размещения постов контроля в С33 (равномерно по азимуту и по периметру границы С33) целесообразен лишь при условии, что примеси при штатной работе или аварийной ситуации выбрасываются из вентиляционных труб АЭС. В этом случае наиболее важные параметры выброса, такие, как начальные температура T_0 и давление P_0 струи, мощность выброса $P_{\rm B}$, радионуклидный состав примесей или спектральный γ -излучения, могут быть измерены специальными датчиками или их совокупностью, установленными в устье венттрубы.

Иная ситуация возникает при несанкционированном выбросе примесей в виде перегретой газовой струи из отверстий, клапанов, неплотностей сосудов, рваных отверстий или щелей, возникающих в случае взрыва или разрыва резервуаров, находящихся под высоким давлением и высокой температурой [6, 7, 21, 22]. В этом случае экспериментально почти невозможно определить ни параметры струи, выбрасываемой из отверстий, ни объемную активность примесей, ни их радиационные характеристики, поскольку не известен спектр или средняя энергия у-излучения, и, в конечном итоге, невозможно определить масштабы загрязнения окружающей среды и оценить экологические последствия загрязнения, так как подобные аварии являются крайне редкими и не могут быть прогнозируемыми. Разработка же универсальной аппаратуры, которую можно было бы использовать для определения указанных параметров и характеристик в любых ситуациях, – задача почти невыполнимая и, кроме того, может привести к резкому удорожанию АЭС.

Тем не менее, радиоактивное загрязнение окружающей среды в случае мощного нестационарного импульсного выброса примесей через отверстия может быть успешно оценено при использовании показаний технологических датчиков, устанавливаемых в резервуарах и определяющих температуру и давление среды, и показаний датчиков АСКРО, определяющих мощность дозы внешнего облучения от радиоактивного облака, образовавшегося в результате выброса. При этом датчики на промплощадке (ПП) и в СЗЗ должны быть расположены по определенному правилу, которое требует, чтобы расстояние от возможного источника радиационной опасности (АЭС) до любого

датчика было строго различно [11, 21-23].

Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть в общем случае выражение для мощности дозы в точках $P_{ijk} = P(x_i, y_j, z_k)$, расположенных на подстилающей поверхности, от объемного источника (облака) с распределением объемной активности в нем q(x, y, z):

$$D'_{i,j,k} = D'(x_i, y_j, z_k) = \int_{E_{i,j}}^{E_{mak}} \alpha(E) \mu_a(E) \varphi(E) E \int_{V} q(x, y, z) [B(E, R)/R^2] \exp[-\mu(E)R] dv dE, \quad (23)$$

где $\alpha(E)$ – зависимость чувствительности детектора от энергии γ -излучения примесей в облаке;

 $\mu_a(E)$, $\mu(E)$ — линейные коэффициенты поглощенной энергии ослабления γ -излучения в воздухе соответственно;

 $B(E,R) = 1 + a(E)\mu R \exp[b(E)\mu R] - \phi$ актор накопления;

a(E), b(E) – известные функции энергии [24];

 $\varphi(E)$ — подлежащий определению дифференциальный спектр γ -излучения примесей;

$$R = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_j)^2 + (z - z_k)^2};$$

x, y, z — текущие координаты;

 x_i, y_j, z_k – координаты датчиков АСКРО;

V – область интегрирования и dv = dxdydz.

Предполагая кратковременность выброса, можно пренебречь его смещением относительно оси симметрии. Требование кратковременности существенно упрощает метод оценки мощности дозы, создаваемой облаком, тогда как оценка мощности дозы в динамическом режиме распространения требует учета не только деформации облака, но и учета метеорологических факторов атмосферы, особенностей подстилающей поверхности и т.д.

Координаты центра масс облака определим следующим образом:

$$x_0 = \int_V xq(x,y,z)dv/Q_v; \qquad y_0 = \int_V yq(x,y,z)dv/Q_v; \qquad z_0 = \int_V zq(x,y,z)dv/Q_v; \qquad Q_v = \int_V q(x,y,z)dv.$$

Полагая, что расстояние от точки центра масс до любого поста контроля АСКРО

$$R_{i,j,k} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_j)^2 + (z_0 - z_k)^2}$$

значительно больше характерного размера облака, объемную активность q(x, y, z) представим в виде:

$$q(x,y,z) = Q_V \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \tag{24}$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция.

Проводя в уравнении (23) интегрирование по объему с q(x, y, z) вида (24), получаем:

$$D'(R_{i,j,k}) = Q_V \int_{E_{-i}}^{E_{mak}} \alpha(E) \mu_a(E) [B(E, R_{i,j,k}) / R^2_{i,j,k}] \exp[-\mu(E) R_{i,j,k}] \varphi(E) E dE,$$
 (25)

где $i=1,\,2,\,3,...,\,N_{\rm d};\,N_{\rm d}$ – достаточное число датчиков системы АСКРО.

Уравнение (25) относительно $\varphi(E)$ представляет собой уравнение Фредгольма первого рода и относится к классу некорректных задач при заданной погрешности измерения датчиков. Нетривиальное решение уравнения (25) возможно, если $R_{ijk} \equiv R_i$: $R_i \neq R_{i+1} \neq R_{i+2} \neq ... \neq R_{N_{\pi}}$; $i = 1, 2, ..., N_{\pi}$.

Уравнение решают заменой $\varphi(E)$ групповым спектром, аппроксимацией интеграла конечной суммой и, таким образом, при различных i задачу сводят к системе линейных алгебраических уравнений, т.е. решают систему вида [6,7]:

$$\hat{A}\vec{\varphi} = \vec{D},\tag{26}$$

где \widehat{A} – матрица $N_{\rm A} \times M$ ($N_{\rm A} > M$) матричным элементом, равным:

$$a_{i,j} = a(E_i)\mu_a(E_i)\{1 + a(E_i)\mu(E_i)R_i \exp |b(E_i)\mu(E_i)R_i|\} \exp |-\mu(E_i)R_i|E_i\Delta E$$

 $\vec{\phi}$ – вектор искомого решения с компонентами ϕ , j = 1, 2, 3, ..., M;

 \vec{D} – заданный вектор результатов измерений с компонентами $D_i = D(R_i)R_i^2/Q_V, i = 1, 2, 3, ..., N_{\pi}.$

Для проверки методов расчета ϕ_i используют так называемый метод «бумажного эксперимента»: задают исходный спектр $\phi_{anp}(E)$, затем по уравнению (25) находят значения $D(R_i)$, которые искажают в пределах погрешности реальных показаний датчиков (15-25%), после чего решают обратную задачу определения ф. Из представленных в табл. 3 результатов решения уравнения (26) следует, что исходный и восстановленный спектры удовлетворительно согласуются, там же, наряду с решениями, удовлетворительными приведено решение линейных системы полученное тривиальным обращением матрицы алгебраических уравнений, (неудовлетворительное решение): $\vec{\varphi} = (\hat{A}^* \cdot \hat{A})^{-1} \vec{b}$, где \hat{A}^* матрица, сопряженная \hat{A} ; $(\hat{A}^* \cdot \hat{A})^{-1}$ – обратная матрица размером $M \times M$; $\vec{b} = \hat{A}^* \cdot \vec{D}$ – вектор.

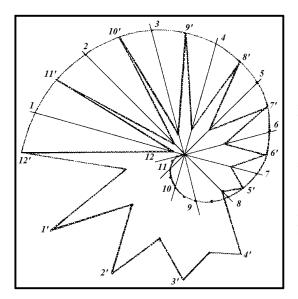
Таблица 3. — Сравнение исходного ϕ_{anp} и восстановленных Спектров [6,7] [Comparison of the original ϕ_{anp} and the reconstructed Spectra]

Энергия	Априорный ϕ_j	ф, Вычисленный методом			
E_j (M \ni B)		Fabian H.U.	Обр. матр.		
0,37	1,768	1,784	1,851	-0,088	
0,748	0,503	0,731	0,671	0,0	
1,1216	0,328	0,149	0,137	-0,802	
1,496	7,36·10 ⁻²	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$	$-1,1\cdot10^{-3}$	
1,87	9,6.10-4	$2,28 \cdot 10^{-4}$	$2,13\cdot10^{-4}$	2,8434	

Условие ($R_{ijk} \neq R_i$: $R_i \neq R_{i+1} \neq R_{i+2} \neq ... \neq R_{N_A}$; $i=1, 2, ..., N_A$) накладывает определенные требования на размещение постов контроля: при размещении датчиков мощности дозы (АСКРО) не должно быть осевой и центральной симметрии, поскольку в противном случае число уравнений (25) или (26), отличающихся правой частью, уменьшится в 2 или 4 раза (при осевой симметрии) или приведет к полному вырождению системы линейных алгебраических уравнений (при размещении датчиков

по периметру СЗЗ, т.е. при центральной симметрии). Кроме того, как уже отмечалось, размещение датчиков по периметру зоны позволяет надежно регистрировать факел выброса или распространение облака при любом направлении ветра.

Учет этих двух противоречивых требований приводит к тому, что R_i постов контроля должны возрастать с увеличением азимутального угла, отсчитываемого от какого-либо направления (например, как в спирали Архимеда). Графики таких кривых приведены на рис. 10 и представляют собой либо гладкую кривую, для которой R_i является функцией угла, $R_i = R_0\theta_i$, $\theta_i = i\Delta\theta$; $i = 1, 2, ..., N_{\rm d}$; $\Delta\theta = 2\pi/N_{\rm d}$, либо многолучевую звезду [6].



Puc. 10. – Принцип расстановки постов контроля в C33 [22] [The principle of placing control posts in the sanitary protection zone]

Решение аналогичной задачи осуществлялось и для наиболее реального источника радиоактивного загрязнения атмосферы – факела выбросов, схема выброса которого представлена на рис. 11, на котором размещение датчиков вокруг ОИАЭ также осуществлялось по спирали Архимеда [6]. В этом случае факел выбросов представляли источником с неравномерной линейным на котором плотностью распределения, определялось положение центра масс. В результате чего получали аналогичное уравнение, но с более сложным ядром. Решение уравнения осуществляли аналогичным образом. Результаты решения приведены в табл. 4.

На рисунке 12. представлены результаты расчётов восстановления спектров фотонного излучения методом Скофилда (N. Scofield).

Гистограммы спектров представляют собой следующее: 1 — исходный $\varphi(E)_{\text{апр}}$ ($E_{\text{ср}}=0,497\,\text{ MэB}$); 2 — восстановленный с использованием метода N. Scofield (a — возрастающий спектр, $E_{\text{ср}}=0,5104\,\text{ МэB}$, 500 итераций); (δ — «горбатый» спектр, $E_{\text{ср}}=0,4939\,\text{ МэB}$, 2500 итераций); (ϵ — убывающий спектр, ϵ — 0,3519 МэВ, 12500 итераций).

Таблица 4. – Сравнение исходного ϕ_{anp} и восстановленных спектров [6] [Comparison of the original ϕ_{anp} and the reconstructed Spectra]

	B	Спектр $\varphi(E_j)$							
.J	МэВ	Z		вычисленный методом					
Индекс	Энергия E_j ,	${ m Anp}$ иорный ${ m \phi}_j$	$E_{ m cp},~{ m M}{ m 3}{ m B}$	Y.Su	Е _{ср} , МэВ	N. Scofield	$E_{ m cp}$, МэВ	Метод обратной матрицы	
1	0,25	2,359		1,722		1,573		19,285	
2	0,364	1,618	0,458	1,070	0,460	1,332	0,457	-33,735	
3	0,497	1,178		0,438	1,269	0,400	1,123	0,437	28,269
4	0,605	0,638		0,939		0,972),972	-8,819	

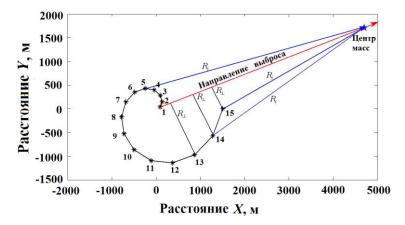


Рис. 11. – Иллюстрация оценки спектрального состава гамма-излучения от факела выбросов, который аппроксимируют линейным источником [6] [Illustration of spectral composition estimation of gamma radiation from the emission flare, which is approximated by linear source]

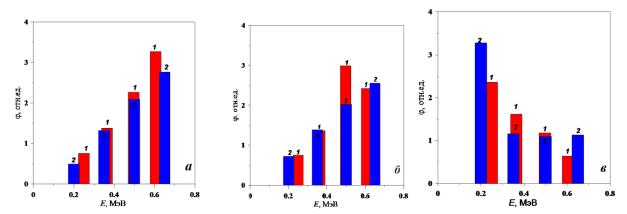


Рис. 12. – Результаты расчётов восстановления спектрального состава гамма-излучения от факела выбросов, который аппроксимируют линейным источником для трёх видов спектра гамма-излучения: *a* – возрастающий; *б* - «горбатый»; *в* - убывающий спектр [6] [The calculation results of spectral composition reconstruction of gamma radiation from the emission flare, which are approximated by linear source for three types of gamma-ray spectrum: a is increasing; b is "hunchbacked"; c is a decreasing spectrum]

Восстановленные спектры дают возможность определить среднюю энергию фотонного излучения радиоактивной примеси, формирующей радиоактивное облако, что, в свою очередь, позволяет оценить дозовые нагрузки на персонал и население. Средняя энергия есть интегральная величина, определяемая выражением:

$$E_{\rm cp} = \int_{E_{\rm min}}^{E_{\rm max}} E\varphi(E) dE / \int_{E_{\rm min}}^{E_{\rm max}} \varphi(E) dE.$$
 (27)

Следует отметить, что знание этой величины позволяет существенно упростить расчетные оценки дозовых нагрузок на персонал и население, поскольку, в противном случае расчеты указанных величин следовало бы проводить для каждой энергии фотонов радионуклидов, учитывая для каждого из них схему распада.

Сравнение средней энергии восстановленных и априорного спектров показывает удовлетворительное согласие относительно средней энергии $E_{\rm cp}$ (табл. 4). Относительная погрешность расчетов составляет менее 1 % [6]. На рисунке 13 представлены зависимости погрешности средней энергии, восстанавливаемые методом N. Scofield спектров γ -излучения в виде кривых итерационного процесса при оценки сходимости величины средней энергии $E_{\rm cp}$.

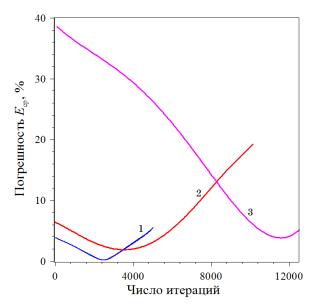
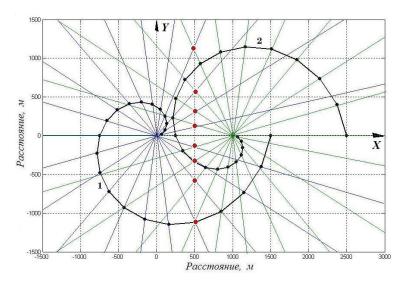


Рис. 13. – Условие сходимости итерационного процесса при восстановлении спектрального состава γ -излучения от факела выбросов, который аппроксимируют линейным источником для трёх видов спектра γ -излучения: 1 – возрастающего; 2 – «горбатого»; 3 – убывающего [6] [The condition for the iterative process convergence when the spectral composition of gamma radiation is restored from the emission flare, which is approximated by a linear source for three types of γ -radiation spectrum: 1 is increasing; 2

4. ПРИНЦИП РАЗМЕЩЕНИЯ ПОСТОВ АСКРО ДЛЯ ДВУХ И БОЛЕЕ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

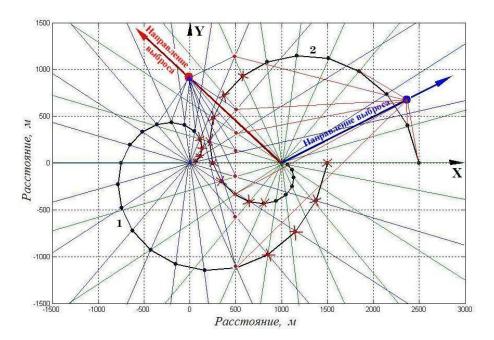
Рассмотренный выше метод размещения постов контроля целесообразен для одного блока АЭС, но недостаточен для двух или более, поскольку, размещая на каждом блоке систему γ -датчиков указанным выше способом, мы можем получить дублирование датчиков на каком-то направлении, что в итоге может привести к их избыточности или далеко не оптимальному количеству.

Для оптимизации числа датчиков, расположенных между блоками АЭС, предварительно на каждом блоке их расставляют по спирали Архимеда (кривые 1 и 2 на рис. 14) и находят точки пересечения двух семейств прямых, проходящих через источники выбросов и датчики, расположенные на кривых [6].



Puc. 14. – Метод расстановки постов контроля для двух энергоблоков АЭС [6] [The method of arranging control posts for two power units of nuclear power plants]

Затем находят дублирующие точки на выделенных направлениях. При этом датчики, дублирующие друг друга, расположенные на кривых, для экономии финансовых и материальных средств можно отбросить (см. перечеркнутые точки на рис. 15), а точки, находящиеся на пересечении двух семейств прямых, определяют необходимое число датчиков, которое следует установить между блоками АЭС, и их координаты (см. вертикально расположенные точки на рис. 14 и 15).



Puc. 15. – Метод расстановки постов контроля для двух энергоблоков: выделение дублирующих датчиков системы ACKPO [6] [The method of arranging control posts for two power units: allocation of duplicate sensors of the ASCRO system]

Семейство прямых, характеризующих кривую 1 (спираль Архимеда) определяется уравнением:

$$y_i^{(1)} = x \cdot \mathsf{tg}(\varphi), \tag{28}$$

где $\varphi = i \cdot \Delta \varphi, i = 1, 2, ..., m;$

 $\Delta \phi = 2\pi/N_{\rm A}, N_{\rm A}$ – достаточное число датчиков системы АСКРО, располагающихся вокруг одного блока АЭС, чтобы при любом азимутальном угле выброса радиоактивной примеси в атмосферу факел выбросов мог быть зарегистрирован при сильно устойчивом метеорологическом состоянии атмосферы (категории F или G модели Пасквилла—Гиффорда) [6] или при высоком значении параметра приземного слоя атмосферы L>0.

Кривые 1 и 2 описываются уравнением $R=R_0 \varphi$. Значение R_0 выбирают из условия $R_{\rm max}=R_0\cdot 2\pi$. Откуда следует $R_0=R_{\rm max}/2\pi$. В качестве $R_{\rm max}$ принимают $R_{\rm max}=1500,0$ м — расстояние от источника выбросов с общей активностью $Q=5\cdot 10^6$ Ки, расположенного на высоте h=100 м, на котором источник создает мощность эквивалентной дозы фотонного излучения, сравнимую с естественным фоном.

Семейство прямых, характеризующих кривую 2, определяется уравнением:

$$y_i^{(2)} = (x_0 - x) \operatorname{tg}(\varphi),$$
 (29)

где x_0 – расстояние между источниками возможных выбросов радиоактивной примеси в атмосферу.

В точках пересечения семейства прямых $y_i^{(1)} = y_i^{(2)}$, а значение абсциссы точек пересечения не зависит от φ (индекса i) и равно:

$$x = x_0/2$$
. (30)

Напротив, значения ординат точек пересечения семейств прямых зависят от угла ϕ (индекса i) и определяются выражением:

$$y_i^{(1)} \equiv y_i^{(2)} = \frac{x_0}{2} \operatorname{tg}(\varphi) = 0.5x_0 \operatorname{tg}(i \cdot \Delta \varphi),$$
 (31)

где в соответствии с рис. 14 и 15, $i = \pm 1, 2, 3, 4$.

При определении максимальной ординаты датчиков значения индекса i должно быть ограничено так, чтобы выполнялось условие:

$$\sqrt{\left(y_i^{(1)}\right)^2 + \left(0, 5x_0\right)^2} \le R_{\text{max}}.$$
 (32)

После построения системы датчиков АСКРО, удовлетворяющих требованиям для каждой из систем дублирующие друг друга датчики, в целях экономии финансовых и материальных средств, можно отбросить (см. перечеркнутые точки на рисунке 15).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Окончательная картина размещения датчиков АСКРО для двух блоков АЭС приведена на рисунке 16. Стрелками на рисунке указаны гипотетические направления выбросов радиоактивной примеси в атмосферу на одном из источников. Крупные точки на выделенных направлениях представляют собой центр масс радиоактивного выброса, распространяющегося в данном направлении. Прямые, соединяющие центры масс с у-датчиками АСКРО указывают на систему опроса показаний датчиков, которые (показания) затем используются для определения спектра и средней энергии фотонного излучения радиоактивной примеси, распространяющейся по ветру.

Если система АСКРО строится для трех блоков* АЭС, расположенных на одной прямой (как показывает практика), то решается аналогичная задача для второго и третьего блоков АЭС путем трансляции (перемещением) кривой 1 по оси X с размещением источника выбросов на расстоянии x_0 от второго источника и т.д.

В случае выброса радиоактивной примеси в атмосферу в условиях радиационной аварии на АЭС с заданными, например, левым или правым направлениями, система

^{*} Если рассматривать конкретный случай АСКРО 2-го и 3-го блоков АЭС Бушер, то рекомендации здесь сводятся к следующему. Поскольку расстояние между вторым и третьим блоками небольшое и составляет всего порядка 300 м с небольшим, то геометрический центр источника возможных радиоактивных выбросов целесообразно разместить посредине между ними. Тогда задача размещения постов контроля сводится в точности к вышеизложенной. Если посты радиационного контроля в этом случае будут размещаться на зданиях, то размещать их следует таким образом, чтобы исключить экранирование детектора более высоким зданием, расположенном по направлению луча, проведённого из устья венттрубы до рассматриваемого детектора, или же приподнять детектор на определённую высоту, чтобы исключить подобный эффект.

АСКРО (в соответствии с рис. 16) опрашивает все датчики, регистрируя их показания, определяет состояние устойчивости атмосферы для уточнения условий рассеяния радиоактивной примеси, определяет радионуклидный состав радиоактивной примеси, используя показания спектрометрического оборудования или в случае его отказа – показания датчиков АСКРО, определяет спектр и среднюю энергию фотонного излучения и прогнозирует радиоактивное загрязнение окружающей среды и дозовые нагрузки на персонал и население, обеспечивая, таким образом, руководство АЭС предварительной информацией для принятия соответствующего решения, позволяющего минимизировать последствия радиационной аварии.

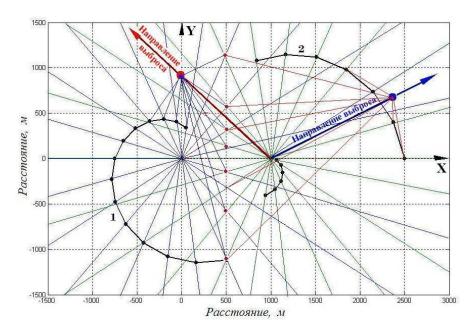


Рис. 16. — Принципиальная схема размещения γ-датчиков системы радиационного контроля АСКРО для двух энергоблоков АЭС. Стрелками указаны гипотетические направления выбросов радиоактивной примеси в атмосферу на одном из источников. Крупные точки на выделенных направлениях представляют собой центр масс радиоактивного выброса, рапространяющегося в данном направлении. Прямые, соединяющие центры масс с γ-датчиками АСКРО, указывают на систему опроса показаний датчиков, которые (показания) затем используются для определения спектра и средней энергии фотонного излучения радиоактивной примеси, распространяющейся по ветру [6] [The basic scheme for the placement of γ-sensors of the radiation monitoring system ARMS for two power units of nuclear power plants. Arrows indicate the hypothetical directions of emissions of radioactive impurities into the atmosphere at one of the sources. The large points on the selected directions represent the center of radioactive ejecta mass propagating in this direction. The straight lines connecting the centers of mass with the ARMS γ-sensors indicate a system for interrogating the readings of the sensors, which are then used to determine the spectrum and average energy of the photon radiation of a radioactive impurity propagating downwind]

РЕКОМЕНДАЦИИ

Работа может представлять интерес для работников атомной промышленности, занимающихся эксплуатацией Атомных электростанций, научных сотрудников проектных организаций, разрабатывающих проекты автоматизированных систем типа АСКРО для работников предприятий металлургической и химической промышленности, занимающихся вопросами охраны окружающей среды, экологов и других специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Елохин, А.П. и др.* Принципы расстановки постов радиационного контроля в санитарнозащитной зоне и зоне наблюдения АЭС "Бушер" [Текст] / А.П. Елохин, Н.М. Власкин // Экологические системы и приборы. – 2004. – №6. – С. 40–46.
- 2. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения [Текст]. М.: «МХО Интератомэнерго», 1992. 334 с.
- 3. *Лайхтман*, Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы [Текст] / Д.Л. Лайхтман. Л.: Гидромет. изд-во, 1970. 340 с.
- 4. *Елохин, А.П. и др.* Оценка материальных затрат при ликвидации последствий радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности при радиационной аварии на ОИАЭ [Текст] / А.П. Елохин, И.А. Стародубцев // Глобальная ядерная безопасность. 2016. №3(20). С. 7–34.
- 5. *Елохин, А.П. и др.* Некоторые оценки материальных затрат при ликвидации последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды в результате радиационной аварии на ОИАЭ [Текст] / А.П. Елохин, И.А. Стародубцев // The XIIth International Conference Science and Education. 1-2 июля 2016 г., Мюнхен, Германия. Мюнхен, 2016. С. 55–81.
- 6. *Елохин, А.П.* Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография / М-во образования и науки Российской Федерации, Нац. исслед. ядерный ун-т «МИФИ» [Текст] / А.П. Елохин. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 520 с.
- 7. *Елохин, А.П.* Оптимизация методов и средств автоматизированных систем контроля радиационной обстановки окружающей среды [Текст] / А.П. Елохин : дисс. ... докт. техн. наук. М.: МИФИ. 2001. 325 с.
- 8. Типовое содержание плана мероприятий по защите персонала в случае аварии на атомной станции (НП 015-12). Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 18 сентября 2012 г. №518 [Текст].
- 9. Компания по производству и развитию атомной энергии Ирана. АЭС «Бушер-2» [Текст]. Энергоблоки 2,3. Том 4. Инженерно-гидрологические изыскания. Книга 1. Аэрометеорологические работы и исследования. 2015. 235 с.
- 10. *Бобылева*, *М.М.* Расчет характеристик турбулентности в планетарном пограничном слое атмосферы [Текст] / М.М. Бобылева // Труды Ленинградского Гидрометеорологического института. Вып. 40 (Некоторые вопросы физики пограничного слоя в атмосфере и море). Л., 1970. С. 64–73.
- 11. *Елохин, А.П. и др.* Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Д.Ф. Рау, Е.А. Иванов. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РБ − 053−09. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.06.2010 г. № 465. − 79 с.
- 12. Метеорология и атомная энергия [Текст] / Пер. с англ. Под ред. Н.Л. Бызовой и К.П. Махонько. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 618 с.
- 13. Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучений [Текст] / Под ред. чл.-корр. АН СССР Г.И. Марчука. М.: Атомиздат, 1967. 256 с.
- 14. Leimdorfer M. On the Use of Monte-Carlo Methods for Solving Gamma Radiation Transport Problems. Nukleonik, 1964, Vol. 6. p. 14.
- 15. *Золотухин, В.Г. и др.* Поле излучения точечного мононаправленного источника гамма-квантов [Текст] / В.Г. Золотухин, Л.Р. Кимель, А.И. Ксенофонтов и др. М.: Атомиздат, 1974. 160 с.
- 16. *Соболь, И.М.* Численные методы Монте-Карло [Текст] / И.М. Соболев. М.: Наука, 1973. 311 с.
- 17. *Гусев, Н.Г. и др.* Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. М.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.
- 18. Санитарные правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) [Текст].
- 19. *Елохин, А.П. и др.* К вопросу об использовании автоматизированных систем контроля экологической обстановки на территориях, прилегающих к предприятиям черной, цветной металлургической и атомной промышленности [Текст] / А.П. Елохин, И.А. Стародубцев // Глобальная ядерная безопасность. − 2015. − №4(17). − С. 15–34.
- 20. Elokhin Alexander P., Starodubtcev Ilia A. On the Ecological Situation at the Territories Adjacent to Chemical and Metallurgical Facilities. (Subtitle: Using Sensors and an Automated Control System to

- Monitor Environmental Conditions). Environmental Quality Management. (USA) 2017, Issue 26, №2, pp. 23–43.
- 21. *Елохин, А.П.* Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды [Текст] / А. П. Елохин. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 316 с.
- Елохин, А.П. Принципы размещения датчиков мощности дозы вокруг АЭС [Текст] / А.П. Елохин // Атомная энергия. – 1994. - Т. 76. – Вып. 3. – С. 188–193.
- 23. *Елохин, А.П. и др.* Система контроля радиационной обстановки в зонах размещения объектов атомной промышленности. РФ патент на изобретение № 2042157 20.08.96 бюл. №23 [Текст] / А.П. Елохин, Д.Ф. Рау. 1996. С. 230—231.
- 24. *Машкович, В.П. и др.* Защита от ионизирующих излучений. Справочник [Текст] / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.

REFERENCES

- [1] Elokhin A.P., Vlaskin N.M. Printsipy rasstanovki postov radiatsionnogo kontroiya v sanitarnozashchitnoi zone i zone nabliudeniya AES "Busher" [The Principles of Placing Radiation Control Posts in the Sanitary Protection Zone and the Observation Zone of the Bushehr NPP]. Ekologicheskie sistemy i pribory [Ecological Systems and Devices], 2004, №6, pp. 40–46. (in Russian)
- [2] Metody rascheta rasprostraneniya radioaktivnykh veshchestv v okruzhaiushchei srede i doz oblucheniya naseleniya [Methods for Calculating the Spread of Radioactive Substances in the Environment and Doses to the Public]. M. Pub. «MKhO Interatomenergo», 1992, 334 p. (in Russian)
- [3] Laikhtman D.L. Fizika pogranichnogo sloia atmosfery [Physics of the Boundary Layer of the Atmosphere]. Leningrad. Pub. Gidrometeorologicheskoe, 1970, 340 p. (in Russian)
- [4] Elokhin A.P., Starodubtsev I.A. Otsenka materialnykh zatrat pri likvidatsii posledstvii radioaktivnogo zagriazneniya podstilaiushchei poverkhnosti pri radiatsionnoi avarii na OIAE [Assessment of Material Costs in the Liquidation of Radioactive Contamination Consequences of the Underlying Surface during a Radiation Accident at the OIAE]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №3(20), pp. 7–34. (in Russian)
- [5] Elokhin A.P., Starodubtsev I.A. Nekotorye otsenki materialnykh zatrat pri likvidatsii posledstvii radioaktivnogo zagriazneniya okruzhaiushchei sredy v rezultate radiatsionnoi avarii na OIAE [Some Estimates of Material Costs during the Liquidation of Environment Radioactive Contamination Consequences as a Result of a Radiation Accident at the OIAE]. The XIIth International Conference Science and Education. 1-2 iyuiya 2016 g., Miunkhen, Germaniya. Miunkhen, 2016, pp. 55–81. (in Russian)
- [6] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistem radiatsionnogo kontroiya okruzhaiushchei sredy [Methods and Means of Radiation Monitoring Systems of the Environment]. M. Pub. NIyaU MIFI [NRNU MEPhI], 2014, 520 p. (in Russian)
- [7] Elokhin A.P. Optimizatsiya metodov i sredstv avtomatizirovannykh sistem kontroiya radiatsionnoi obstanovki okruzhaiushchei sredy [Optimization of Methods and Means of the Automated Control Systems of Environment Radiation Situation]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [The thesis for the Doctor of Engineering degree]. M. Pub. MIFI [MEPhI], 2001, 325 p. (in Russian)
- [8] Tipovoe soderzhanie plana meropriyatii po zashchite personala v sluchae avarii na atomnoi stantsii (NP 015-12). Federalnye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoi energii. Utverzhdeny prikazom Federalnoi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 18 sentiabria 2012 g. №518 [Typical Content of the Action Plan for Personnel Protection in the Accident at Nuclear Power Plant (NP 015-12). Federal Rules and Regulations in the Field of Use of Atomic Energy. Approved by the order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision of September 18, 2012 № 518]. (in Russian)
- [9] Kompaniya po proizvodstvu i razvitiyu atomnoi energii Irana. AES «Busher-2». Energobloki 2,3. Tom 4. Inzhenerno-gidrologicheskie izyskaniya. Kniga 1. Aerometeorologicheskie raboty i issledovaniya [Company for the Production and Development of Nuclear Energy in Iran. Bushehr-2 NPP. Power units 2,3. Volume 4. Engineering and Hydrological Surveys. Book 1. Aerometeorological Work and Research.]. 2015, 235 p. (in Russian)
- [10] Bobyleva M.M. Raschet kharakteristik turbulentnosti v planetarnom pogranichnom sloe atmosfery. Trudy Leningradskogo Gidrometeorologi¬cheskogo instituta. Vyp. 40 (Nekotorye voprosy fiziki pogranichnogo sloia v atmosfere i more) [Calculation of the Turbulence Characteristics in the Planetary Boundary Layer of the Atmosphere. Proceedings of the Leningrad Hydrometeorological

- Institute. Issue. 40 (Some issues of the Physics of the Boundary Layer in the Atmosphere and the Sea)]. Leningrad, 1970, pp. 64–73. (in Russian)
- [11] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Ivanov E.A. Polozhenie o povyshenii tochnosti prognosticheskikh otsenok radiatsionnykh kharakteristik radioaktivnogo zagriazneniya okruzhaiushchei sredy i dozovykh nagruzok na personal i naselenie. Ministerstvo prirodnykh resursov i ekologii Rossiiskoi Federatsii, Federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru RB − 053−09. Utverzhdeno prikazom Federalnoi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 08.06.2010 g. №465 [Provision on Increase in Accuracy of Predictive Estimates of Radiation Characteristics of Radioactive Environmental Pollution and Dose Loads of Personnel and Population. The Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Russian Federation, Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision, 08.06.2010 №465], 79 p. (in Russian)
- [12] Meteorologiya i atomnaya energiya [Meteorology and Nuclear Energy.]. Perevod s angliiskogo, pod redaktsiei N.L. Byzovoi i K.P. Makhonko [Trans. from English. Edited by N.L. Byzova and K.P. Mahonko]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat, 1971, 618 p. (in Russian)
- [13] Metod Monte-Karlo v probleme perenosa izluchenii [The Monte Carlo Method in the Problem of Radiation Transfer.]. Pod redaktsiei chlena-korrespondenta AN SSSR G.I. Marchuka [Edited by G.I. Marchuk]. M. Pub. Atomizdat, 1967, 256 p. (in Russian)
- [14] Leimdorfer M. On the Use of Monte-Carlo Methods for Solving Gamma Radiation Transport Problems. Nukleonik, 1964, Vol. 6. p. 14. (in English)
- [15] Zolotukhin V.G., Kimel L.R., Ksenofontov A.I. i etc. Pole izlucheniya tochechnogo mononapravlennogo istochnika gamma-kvantov [The Radiation Field of a Point Monodirectional Source of Gamma Quanta]. M. Pub. Atomizdat, 1974, 160 p. (in Russian)
- [16] Sobol I.M. Chislennye metody Monte-Karlo [Numerical Monte Carlo Methods]. M. Pub. Nauka [Science], 1973, 311 p. (in Russian)
- [17] Gusev N.G., Beiyaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere. Spravochnik [Radioactive Emissions in the Biosphere: a reference book]. M. Pub. Energoatomizdat, 1986, 224 p. (in Russian)
- [18] Sanitarnye pravila i normativy. SanPiN 2.6.1.2523-09 «Normy radiatsionnoi bezopasnosti» (NRB-99/2009) [Sanitary Rules and Regulations. SanPiN 2.6.1.2523-09 "Norms of Radiation Safety"]. (in Russian)
- [19] Elokhin A.P., Starodubtsev I.A. K voprosu ob ispolzovanii avtomatizirovannykh sistem kontroiya ekologicheskoi obstanovki na territoriyakh, prilegaiushchikh k predpriyatiyam chernoi, tsvetnoi metallurgicheskoi i atomnoi promyshlennosti [Use of Automated Systems for Environmental Monitoring in the Area Surrounding Ferrous, Nonferrous Metallurgical Enterprises and Nuclear Industry]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2015, №4(17), pp. 15–34. (in Russian)
- [20] Elokhin Alexander P., Starodubtcev Iiya A. On the Ecological Situation at the Territories Adjacent to Chemical and Metallurgical Facilities. (Subtitle: Using Sensors and an Automated Control System to Monitor Environmental Conditions). Environmental Quality Management. (USA) 2017, Issue 26, №2, pp. 23–43. (in English)
- [21] Elokhin A.P. Avtomatizirovannye sistemy kontroiya radiatsionnoi obstanovki okruzhaiushchei sredy [Automated Systems for Monitoring the Radiation Environment]. M. Pub. NIyaU MIFI, 2012, 316 p. (in Russian)
- [22] Elokhin A.P. Printsipy razmeshcheniya datchikov moshchnosti dozy vokrug AES [The Principles of Dose Rate Sensors Placement around Nuclear Power Plants]. Atomnaya energiya [Atomic Energy], 1994, Vol. 76, Issue 3, pp. 188–193. (in Russian)
- [23] Elokhin A.P., Rau D.F. Sistema kontroiya radiatsionnoi obstanovki v zonakh razmeshcheniya obieektov atomnoi promyshlennosti. RF patent na izobretenie №2042157 20.08.96 biulleten №23 [The Monitoring System of the Radiation Situation in the Areas Where Nuclear Facilities are Located. RF patent for invention № 2042157 20.08.96 bul. №23]. pp. 230–231. (in Russian)
- [24] Mashkovich V.P., Kudriavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruiushchikh izluchenii [Protection against Ionizing Radiation]. Spravochnik [Reference Book]. M. Pub. Energoatomizdat, 1995, 496 p. (in Russian)

Meteorological Conditions of the Bushehr NPP area, Iran

A.P. Elokhin¹, E.A. Alalem², A.I. Ksenofontov³

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

¹ORCID: 0000-0002-7682-8504

WoS ResearcherID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru;

² ORCID: 0000-0002-7207-5939

WoS ResearcherID: G-9489-2017

e-mail: issaalem2@yahoo.com;

³ ORCID: 0000-0002-6864-9805

WoS ResearcherID: H-1833-2017

e-mail: AIKsenofontov@mephi.ru

Abstract – This work considers the method of assessment of the required and sufficient number of posts of the automated radiation monitoring system (ARMS) in the sanitary protection zone of the Bushehr NPP second unit in Iran arranged around the NPP and justification of their layout.

The method is based on the data of meteorological observations in the specified region that represent the results of measurement of wind speed and temperature at different heights at the meteorological tower and methods of gradient observations over these characteristics for each month during 2006-2010.

The characteristics obtained allow to calculate atmospheric stability as part of the known model of the ground layer and the meteorological parameters that determine it - air speed, temperature, turbulence diffusivity coefficient and turbulent fluctuation energy as functions of height by solving the closed equation system describing the condition of the ground layer.

Knowledge of atmosphere meteorological parameters allows to define a problem of assessing environmental nuclear pollution by solving the equation of turbulence diffusivity in the conditions of a hypothetical radiation accident at Bushehr NPP and determine the required and sufficient number of ARMS posts and their layout around the NPP that takes into account the restricted nature of the information as to the radionuclide composition of the radioactive impurity propagating in the atmosphere in case of the accident.

This work may be of interest to nuclear industry workers engaged in the operation of nuclear power plants, research officers of design organizations that design automated systems of ARMS type for enterprises of nuclear, metal processing and chemical industries, environmental engineers, etc.

Keywords: radiation accident, meteorological characteristics, ionization radiation, environmental nuclear pollution, ionizing-radiation detectors, stable and unstable atmosphere.

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

УЛК 621.039.743

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ СОРБИРУЮЩЕГО МАТРИЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА ДЛЯ ИММОБИЛИЗАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ¹

© 2017 Ю.А. Убаськина*, П.А. Парагузов**, Н.В. Шарова**, Е.В. Панкратова ***

* НИЦ "Курчатовский институт" – ИРЕА, Москва, Россия **ООО «Сталкер», Ульяновск, Ульяновская обл., Россия ***ООО «Керамзит», Ульяновск, Ульяновская обл., Россия

Работа посвящена исследованию отдельных эксплуатационных свойств лабораторных образцов сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов на основе отечественных цеолитсодержащих пород. Показано, что цеолитсодержащие породы достаточно термически устойчивы для того, чтобы их можно было использовать в качестве сырья для изготовления сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов. Приведены стадии обработки цеолитсодержащих пород с целью получения сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов. Найдены оптимальные параметры ультразвуковой обработки сырья. Показано, что начальный гранулометрический состав цеолитсодержащих пород практически не влияет на значения ключевых эксплуатационных свойств изготавливаемого сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов.

Ключевые слова: цеолитсодержащие породы, радионуклиды, скорость выщелачивания по цезию, суммарная сорбционная емкость, термическая устойчивость, ультразвук, пропаривание.

Поступила в редакцию: 17.11.2017

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изоляции радиоактивных отходов — одна из самых острых нерешенных задач науки. Общие принципы решения данной проблемы в последнее десятилетие были сформулированы МАГАТЭ — это отверждение жидких радиоактивных отходов путем включения их в состав химически и механически стойких матриц и последующее захоронение их в глубоких геологических формациях.

Исходя из данных принципов, одной из наиболее важных проблем является для создание максимально устойчивых матричных материалов длительной иммобилизации радионуклидов [1]. Эти матрицы должны минимально взаимодействовать с вмещающей породой и не растворяться в поровых и трещинных растворах. Такими матричными материалами могут служить минералы и их твердые растворы.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект № 26892)

Как правило, в этих целях применяется бентонит. Например, его планируют применять в хранилище отработанного ядерного топлива Onkalo [2] — глубоком геологическом захоронении для окончательного захоронения отработанного ядерного топлива, первом хранилище такого рода в мире. Процесс утилизации будет включать помещение двенадцати топливных сборок в канистру из борсодержащей стали и её запечатывание в медную капсулу. Каждую капсулу затем поместят в отдельное отверстие в ответвлении хранилища и зальют бентонитом. Хранилище Onkalo, как ожидается, будет достаточно большим, чтобы принимать пеналы с отработанным топливом около ста лет, то есть примерно до 2120 года. Тогда, после последней инкапсуляции и захоронения, вход в туннель будет забетонирован и засыпан грунтом.

Однако применение бентонита в качестве сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов вызывает серьезные сомнения, связанные с возможностью растворения части бентонита при вероятном контакте с грунтовыми водами [3, 4].

Проводимые в последние 15-20 лет исследовательские работы в США, Канаде, Болгарии, Франции, ФРГ, Великобритании, Японии показали, что в качестве матричного материала могут быть использованы природные цеолиты. Они могут быть использованы и в ядерной энергетике, так как они устойчивы к ядерной деградации и дешевле органических ионообменных смол [5]. Цеолиты быстро реагируют с цементом и стеклом, что позволяет создавать надежные бетонные хранилища для радиоактивных материалов [6].

Цеолитсодержащие породы достаточно широко распространены на территории России. Благодаря уникальным ионообменным свойствам, они имеют успешную историю применения в качестве сорбентов тяжелых металлов и радионуклидов при очистке разных типов жидкостей.

Однако практическим вопросом применения данного типа сырья именно в качестве матрицы, иммобилизирующей радионуклиды, ранее не занимались, в первую очередь, из-за отсутствия согласованной концепции направления исследований в условиях недостаточного технологического задела.

В связи с этим целью данной работы стало исследование некоторых эксплуатационных свойств лабораторных образцов сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов, созданного на основе природного цеолита.

МЕТОДОЛОГИЯ

Объектами исследования стали лабораторные образцы сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов, полученные на основе цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения (цеолит активированный 0-40 мкм (ТУ 2163-001-27860096-2016)) (производитель — ООО «Цеолиты Поволжья»), Юшанского месторождения (цеолит фракций 0-80 мкм и 100-300 мкм (производитель — ООО «Керамзит»).

Лабораторные образцы сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов получали по следующей методике. К образцу цеолитсодержащей породы добавляли воду в соотношении Т:Ж=1:5. Затем полученную водную суспензию нагревали на водяной бане в течение часа, после чего на установке «Молот» 2В при частоте преобразования $20\pm2~\mathrm{k\Gamma}$ ц суспензию подвергали воздействию ультразвука. Варьировали время пребывания материала в установке: 0, 30, 45 и 60 минут. Затем обработанную ультразвуком суспензию отмучивали, осадок подсушивали и

пересыпали в сито 325 Mesh по Тайлеру, на предварительно размещенный в нем вырезанный по размеру сита круг пористой фильтровальной бумаги, высотой слоя в 1 см. Сито помещали на водяную баню, образец в сите нагревали и пропаривали в течение часа после закипания воды. Затем сито вынимали, просушивали в сушильном шкафу при 105°С. Далее сито с образцом охлаждали до комнатной температуры, готовый лабораторный образец из сита пересыпали в чистую, сухую емкость.

Химический состав исследуемых цеолитсодержащих пород определяли с помощью с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL OPTIM'X. Термогравиметрический анализ цеолитов выполняли на термоанализаторе SDT Q600. Гранулометрический состав цеолитов определяли с помощью лазерного анализатора размеров частиц Fritsch Analysette 22.

Эксплуатационные свойства лабораторных образцов сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов — суммарную сорбционную ёмкость и скорость выщелачивания по цезию, определяли следующим образом. К навеске образца добавляли раствор CsOH, затем через 6 часов титрованием раствором HCl определяли в надосадочной жидкости концентрацию оставшихся в растворе ионов Cs^+ .

На основании полученных данных рассчитывали суммарную сорбционную ёмкость, мг/100 г образца, с учетом того, что поглощение катионов Cs+ составляет в среднем 6,5% от суммарной сорбционной емкости образца цеолита.

Затем осторожно удаляли пипеткой надосадочную жидкость, осадок сушили, добавляли к нему дистиллированную воду. Через 6 часов в надосадочной жидкости титрованием раствором HCl определяли концентрацию в растворе ионов Cs^+ .

На основании полученных данных рассчитывали скорость выщелачивания по цезию.

Регрессионный анализ данных проводили с помощью программы Microsoft Excel. Для характеристики исследуемых корреляционных зависимостей рассчитывали коэффициент Пирсона и определяли уровень значимости, используя программу Microsoft Excel и таблицы критических значений коэффициента корреляции Пирсона (г) для различных уровней значимости и различного числа степеней свободы (размеров выборки).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Цеолитсодержащие породы Татарско-Шатрашанского и Юшанского месторождения – природные сорбенты, в составе которых в равной мере представлены цеолиты (в виде клиноптилолита), монтмориллониты (глинистые минералы с отличной поглощающей способностью и высокой удельной поверхностью ($700-840 \text{ м}^2/\text{г}$ [7])), опал-кристобалит-тридимитовая фаза (в основном, представленная глобулами опала [8]), а также кварц и кальцит. Для исследования использовали фракции 0-40 мкм (Татарско-Шатрашанского месторождения), 0-80 и 100-300 мкм (Юшанского месторождения).

Химический состав исследуемых цеолитсодержащих пород различается незначительно (табл. 1).

Анализ данных, приведенных в таблице 1, показывает, что значимое различие по химическому составу между цеолитсодержащими породами Татарско-Шатрашанского и Юшанского месторождений состоит в количестве Al_2O_3 (6,60±0,16 % — Татарско-Шатрашанское, 5,44±0,33 % — Юшанское), в количестве Fe_2O_3 (1,80±0,02 % — Татарско-Шатрашанское, 2,37±0,13 % — Юшанское), в количестве CaO (13,85±1,74 % — Татарско-Шатрашанское, 15,21±1,21 % — Юшанское), в количестве MgO (2,04±0,04 % — Татарско-Шатрашанское, 1,30±0,09 % — Юшанское), в количестве Na₂O (0,25±0,02 % —

Татарско-Шатрашанское, $0.15\pm0.02~\%$ – Юшанское). Таким образом, в Юшанской цеолитсодержащей породе больше CaO и Fe₂O₃, меньше Al₂O₃, MgO, Na₂O.

Таблица 1. – Химический состав цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского и Юшанского месторождений [Chemical composition of zeolite-bearing rocks of the Tatar-Shatrashan and Yushan deposits]

Оксиды в составе цеолитсодержащих пород	Наименование месторождения цеолитсодержащих пород			
догин одоришши пород	Татарско-Шатрашанское	Юшанское		
SiO_2	57,33±1,65	56,35±2,90		
Al_2O_3	6,60±0,16	5,44±0,33		
Fe_2O_3	1,80±0,02	2,37±0,13		
CaO	13,85±1,74	15,21±1,21		
MgO	2,04±0,04	1,30±0,09		
TiO ₂	0,31±0,04	$0,31\pm0,04$		
K_2O	1,66±0,24	1,26±0,09		
Na ₂ O	0,25±0,02	$0,15\pm0,02$		
п.п.п.	17,62±0,60	16,18±0,49		

Различие в химических составах цеолитсодержащих пород может оказывать влияние на ключевые эксплуатационные свойства, в частности на термостойкость лабораторных образцов сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов на основе природного цеолита. Например, авторы работы [9] обнаружили, что после обработки природного цеолита, богатого кальцием, раствором соли натрия происходит увеличение термостойкости цеолита от 150 до 400 °C.

Термогравиметрический анализ фракций показал, что цеолиты данных месторождений имеют схожие экзотермические эффекты (при 931,27°C, 1427,68°C (0-40 мкм (Татарско-Шатрашанского месторождения); при 918,36°C, 1406,16°C (0-80 мкм (Юшанского месторождения); при 918,34°C; 1406,16°C (100-300 мкм (Юшанского месторождения)), схожие эндотермические эффекты (при 740,46°C, 1120,65°C (0-40 мкм (Татарско-Шатрашанского месторождения)); при 724,68°C, 1110,61°C (0-80 мкм (Юшанского месторождения); при 723,70°C; 1110,61°C (100-300 мкм (Юшанского месторождения)).

Однако есть отличия — кривые ТГА фракций 0-80 и 100-300 мкм Юшанского месторождения указывают на эндотермический эффект при прокаливании породы в диапазоне температур 1200-1355 °C. Данный эндотермический эффект может быть связан с повышенным содержанием оксида кальция в цеолитсодержащей породе Юшанского месторождения. Повышение количества данного оксида в породе приводит к снижению ее термостойкости, так как эвтектики бинарных систем Al_2O_3 —CaO и SiO_2 —CaO плавятся при более низких температурах (1400 и 1445 °C) по сравнению с чистыми оксидами Al_2O_3 (2050 °C), SiO_2 (1710 °C) и CaO (2570 °C) [10].

На основании данных химического и термогравиметрического анализа цеолитсодержащих пород исследуемых месторождений можно сделать вывод, что цеолитсодержащие породы достаточно термически устойчивы для того, чтобы можно было использовать их в качестве сырья для изготовления сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов.

Изготовление лабораторных образцов сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов на основе цеолитсодержащих пород состоит из двух

основных стадий:

I стадия – модификация цеолитсодержащих пород ультразвуком с целью увеличения их суммарной сорбционной емкости;

II стадия – модификация обработанного ультразвуком цеолита пропариванием с целью снижения скорости выщелачивания адсорбированных радиоактивных веществ из цеолита.

При обработке ультразвуком цеолитсодержащих пород происходит очистка пор каркасных алюмосиликатов от примесей, разделение агрегированных частиц, возрастает удельная поверхность материала, которая прямо пропорционально связана с его суммарной сорбционной емкостью. Положительное влияние ультразвука на адсорбционные свойства цеолита описано в работе [11].

При обработке паром происходит деалюминирование цеолита, как это описано в заявке на изобретение [12]. Деалюминирование способствует снижению скорости выщелачивания адсорбированных радиоактивных веществ из цеолита. Пропаривание цеолитов приводит к увеличению активности цеолитов в 2 раза (при концентрации воды 1,5 ммоля на 1 г цеолита) [13]. Это происходит вследствие увеличения количества активных центров - протонов, в алюмосиликатном каркасе. Обработка паром увеличивает стойкость цеолитов к выщелачиванию радиоактивных катионов, так как определенное соотношение протонов и двухвалентных катионов в отрицательно заряженном алюмосиликатном каркасе позволяет стабилизировать радиоактивные катионы, удерживая их в цеолите. В работе [14] отмечено, что полизарядные катионы более эффективно компенсируют общий отрицательный заряд гексагональной призмы структуры цеолита, и цеолит, содержащий такие ионы, будет способен выдерживать более высокие температуры. Причем, чем выше заряд катиона, тем стабильнее цеолит. В работе [15] отмечено, что воздействие перегретого пара при высоких температурах способствует удалению атомов алюминия из каркаса цеолита, что ведет к его перестройке, а так же к изменению характера распределения кислотно-основных центров на поверхности и в объеме цеолита, что вызывает изменение силикатного модуля носителя. Сделан вывод, что увеличение силикатного модуля приводит к росту эффективности и селективности процесса катионного обмена.

При изготовлении лабораторных образцов сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов на основе фракций цеолитсодержащих пород 0-40 мкм (Татарско-Шатрашанского месторождения), 0-80 и 100-300 мкм (Юшанского месторождения) варьировали время пребывания материала в ультразвуковой установке -0, 30, 45 и 60 минут.

Для фракции 0-40 мкм (Татарско-Шатрашанского месторождения) были обнаружены следующие закономерности.

В таблице 2 приведен гранулометрический состав цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения начальной фракции 0-40 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, свидетельствует о том, что при времени пребывания материала в ультразвуковой установке, равном 30 мин, количество фракции менее 5 мкм (63,84 %) и величина удельной поверхности материала (22481,31 cm^2/cm^3) максимальны.

На рисунке 1 приведена суммарная сорбционную ёмкость цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения начальной фракции 0-40 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке.

Таблица 2. — Гранулометрический состав цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения начальной фракции 0-40 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке [The granulometric composition of Tatar-Shatrashan deposit zeolite-bearing rock of initial fraction is 0-40 μm, depending on the time of the material being in the ultrasonic unit]

	Время пребывания материала в ультразвуковой					
Количество фракции, %	установке, мин					
	0	30	45	60		
менее 5 мкм	52,91	63,84	45,44	60,90		
5-45 мкм	47,09	36,16	54,56	39,10		
более 45 мкм	0,00	0,00	0,00	0,00		
Удельная поверхность, см ² /см ³	19120,22	22481,31	17179,23	21577,33		

Анализ данных, приведенных на рисунке 1, показывает, что при пребывании материала в ультразвуковой установке в течение 30 мин достигается максимум суммарной сорбционной емкости (111,1 мг-экв/100 г) (уравнение регрессии: $y=0.2796x^3-2.0945x^2+4.6803x+107.88$, величина достоверности аппроксимации $R^2=1$).

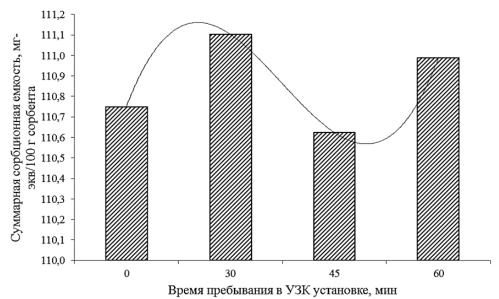


Рис. 1. — Суммарная сорбционная ёмкость цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения начальной фракции 0-40 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке [The total sorption capacity of Tatar-Shatrashan deposit zeolite-bearing rock of initial fraction of 0-40 µm, depending on the time of the material being in the ultrasonic unit]

Было обнаружено, что скорость выщелачивания по цезию из лабораторных образцов, полученных на основе фракции 0-40 мкм цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения, не зависит от времени пребывания материала в ультразвуковой установке и равна 0 мг/см²*сут.

Таким образом, можно сделать вывод, что качество сырья для изготовления сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов —

цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения фракции 0-40 мкм, повышается при обработке ультразвуком и достигает максимума при времени пребывания в ультразвуковой установке, равном 30 мин.

Для фракции 0-80 мкм (Юшанского месторождения) были обнаружены следующие закономерности.

В таблице 3 приведен гранулометрический состав цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке.

Таблица 3. – Гранулометрический состав цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке [The granulometric composition of Yushan deposit zeolite-bearing rock of initial fraction is 0-80 µm, depending on the time of the material being in the ultrasonic unit]

Количество фракции, %	Время пребывания материала в ультразвуков установке, мин				
	0	30	45	60	
менее 5 мкм	48,33	67,79	64,90	71,08	
5-45 мкм	45,16	32,21	35,10	28,92	
более 45 мкм	6,51	0,00	0,00	0,00	
Удельная поверхность, cm^2/cm^3	20522,15	25362,07	24267,82	26798,64	

Данные таблицы 3 позволяют сделать вывод, что при увеличении времени пребывания материала в ультразвуковой установке количество фракции менее 5 мкм и величина удельной поверхности материала повышаются.

На рисунке 2 приведена суммарная сорбционная ёмкость цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке.

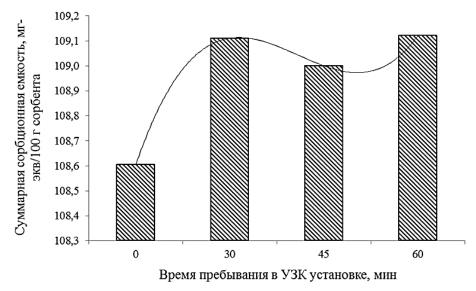


Рис. 2. – Суммарная сорбционная ёмкость цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке [The total sorption capacity of Yushan deposit zeolite-bearing rock of initial fraction of 0-80 μm, depending on the time of the material being in the ultrasonic unit]

Анализ данных, приведенных на рис. 2, показывает, что суммарная сорбционная емкость материала повышается при увеличении времени пребывания цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм в ультразвуковой установке (уравнение регрессии: $y = 0.1414x^3 - 1.1568x^2 + 2.9867x + 106.63$, величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1$).

Была исследована скорость выщелачивания по цезию цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке (рис. 3).

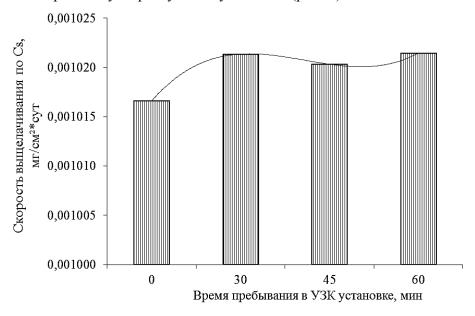


Рис. 3. – Скорость выщелачивания по цезию цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке [The cesium leaching rate for Yushan deposit zeolite-bearing rock of initial fraction is 0-80 µm, depending on the time of the material being in the ultrasonic unit]

Данные рисунка 3 указывают на то, что скорость выщелачивания по цезию цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм зависит от времени пребывания материала в ультразвуковой установке: скорость выщелачивания по цезию максимальна при 30 и 60 мин, но несколько снижается при 45 мин (уравнение регрессии зависимости: $y = 10^{-6}x^3 - 10^{-5} x^2 + 3 \times 10^{-5}x + 0,001$, величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1$).

При времени пребывания материала в ультразвуковой установке, равному 45 мин, суммарная сорбционная емкость цеолитсодержащей породы составляет 109,0 мг-экв./100 г сорбента (рис. 2), что сравнимо с суммарной сорбционной емкостью цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения фракции 0-40 мкм (111,1 мг-экв/100 г). В связи с этим, был сделан вывод, что оптимальное время пребывания в ультразвуковой установке цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 0-80 мкм при изготовлении сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов должно составлять 45 мин.

Для цеолитсодержащих пород Юшанского месторождения фракции 100-300 мкм были обнаружены следующие закономерности.

В таблице 4 приведен гранулометрический состав цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке.

Таблица 4. — Гранулометрический состав цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке [The granulometric composition of Yushan deposit zeolite-bearing rock of initial fraction is 100-300 μm, depending on the time of the material being in the ultrasonic unit]

	Время пребывания материала в ультразвуковой					
Количество фракции, %	установке, мин					
	0	30	45	60		
менее 5 мкм	22,61	55,70	67,93	65,75		
5-45 мкм	21,53	33,90	32,07	27,55		
более 45 мкм	55,86	10,40	0	6,7		
Удельная поверхность, cm^2/cm^3	10747,46	22091,04	23912,86	24628,23		

Анализ полученных результатов гранулометрического анализа свидетельствует о том, что при времени пребывания в ультразвуковой установке, равном 45 мин, количество фракции менее 5 мкм максимально. При времени пребывания в ультразвуковой установке, равном 60 мин, величина удельной поверхности материала максимальна.

Анализируя изменения гранулометрического состава цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальных фракций 0-80 и 100-300 мкм под действием ультразвука, можно выявить следующие тенденции. При повышении времени пребывания фракции 0-80 мкм в ультразвуковой установке, количество фракции 5-45 мкм в ней понижается (табл. 3). Для фракции 100-300 мкм количество фракции 5-45 мкм сначала повышается, затем понижается, что связано с диспергированием агрегированного материала под действием ультразвука (табл. 4). Сравнение данных таблиц 3 и 4 позволяет сделать вывод, что при обработке цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальных фракций 0-80 и 100-300 мкм в ультразвуковой установке с повышением времени пребывания материала в установке количество фракции 5-45 мкм становится примерно одинаковым для обеих начальных фракций — 0-80 и 100-300 мкм (коэффициент корреляции Пирсона г = 0,99, р < 0,001, n = 6). На рисунке 4 приведена суммарная сорбционная ёмкость цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке.

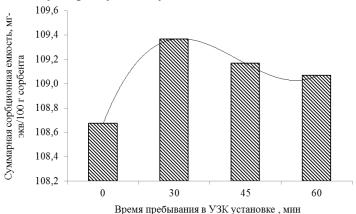


Рис. 4. – Суммарная сорбционная ёмкость цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке [The total sorption capacity of Yushan deposit zeolite-bearing rock of initial fraction of 100-300 μm, depending on the time of the material being in the ultrasonic unit]

Анализ данных, приведенных на рисунке 4, показывает, что суммарная сорбционная емкость цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в ультразвуковой установке максимальна при пребывании материала в ультразвуковой установке в течение 30 мин, затем начинает снижаться (уравнение регрессии: $y = 0.1658x^3 - 1.4423x^2 + 3.8614x + 106.09$, величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1$).

Была исследована скорость выщелачивания по цезию цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке (рис. 4).

Данные рисунка 5 указывают на то, что скорость выщелачивания по цезию цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм зависит от времени пребывания материала в ультразвуковой установке: скорость выщелачивания по цезию максимальна при 30 мин, затем начинает снижаться (уравнение регрессии: $y = 2 \times 10^{-6} x^3 - 10^{-5} x^2 + 4 \times 10^{-5} x + 0,001$, величина достоверности аппроксимации $R^2 = 1$).

Анализируя данные рисунков 4 и 5, можно сделать вывод, что при условии пребывания цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в течение 45 мин в ультразвуковой установке будет достигнута приемлемая величина суммарной сорбционной емкости (109,2 мг-экв./100 г сорбента). Эта величина сравнима с суммарной сорбционной емкостью цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения фракции 0-40 мкм (111,1 мг-экв/100 г). При времени пребывания цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в ультразвуковой установке, равном 45 мин, скорость выщелачивания по цезию остается невысокой – 1,02*10⁻³ мг/см²*сут.

В связи с этим, был сделан вывод, что оптимальное время пребывания в ультразвуковой установке цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм при изготовлении сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов также должно составлять 45 мин.

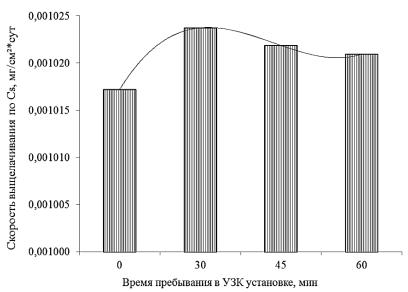


Рис. 5. – Скорость выщелачивания по цезию цеолитсодержащей породы Юшанского месторождения начальной фракции 100-300 мкм в зависимости от времени пребывания материала в ультразвуковой установке [The cesium leaching rate for Yushan deposit zeolite-bearing rock of initial fraction is 100-300 µm, depending on the time of the material being in the ultrasonic unit]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы отдельные эксплуатационные свойства лабораторных образцов сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов, полученных на основе цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского и месторождений. Исследован химический состав и термическая Юшанского устойчивость цеолитсодержащих пород. Найдено, что в Юшанской цеолитсодержащей CaO и Fe₂O₃, меньше Al₂O₃, MgO, Na₂O, чем в породе содержится больше цеолитсодержащей породе Татарско-Шатрашанского месторождения. Показано, что данные цеолитсодержащие породы достаточно термически устойчивы для того, чтобы их можно было использовать в качестве сырья для изготовления сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов. Приведены стадии обработки цеолитсодержащих пород с целью получения сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов. Сделан вывод о том, что качество сырья изготовления сорбирующего матричного материала для иммобилизации радионуклидов – цеолитсодержащей породы Татарско-Шатрашанского месторождения фракции 0-40 мкм, повышается при обработке ультразвуком и пропариванием, достигая оптимума при времени пребывания в ультразвуковой установке, равном 30 мин. Найдено, что оптимальное время обработки ультразвуком Юшанской цеолитсодержащей породы, вне зависимости от начального размера фракций, составляет 45 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Котельников, А.Р. и др.* Минеральные матричные материалы для иммобилизации радионуклидов [Текст] / А.Р. Котельников, В.А. Суворова, В.И. Тихомирова, Г.М. Ахмеджанова, Т.А. Десятова, А.М. Ковальский // Экспериментальная минералогия: некоторые итоги на рубеже столетий. Т. 2. М.: Наука, 2004. С. 209–240.
- 2. TKS-2009. Nuclear Waste Management at Olkiluoto and Loviisa Power Plants: Review of Current Status and Future Plans for 2010-2012. Olkiluoto: POSIVA OY, 2010, 553 p. Available at: http://www.posiva.fi/files/1078/TKS2009_Eng_web_rev1_low.pdf
- 3. Reijonen H.M., Marcos N. Chemical erosion of the bentonite buffer: do we observe it in nature? Geological Society, London, Special Publications, 2017, Vol. 443, №1, pp. 307–317.
- 4. Kočová M., Říhová Z., Zatloukal J. The Issue of Underground Depositing of High Radioactive Waste. Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, 2017, Vol. 722, pp. 59–65.
- 5. *Васильянова, Л.С. и др.* Цеолиты в экологии [Текст] / Л.С. Васильянова, Е.А. Лазарева // Новости науки Казахстана. -2016. -№1(127). С. 61–85.
- 6. Kim C.K., Kong J.Y., Chun B.S., Park J.W. Radioactive removal by adsorption on Yesan clay and zeolite. Environmental earth Sciences, 2013, Vol. 68(8), pp. 2393–2398.
- 7. *Осипов, В.И.* Микроструктура глинистых пород [Текст] / В.И. Осипов, В.Н. Соколов, Н.А. Румянцева. М.: Недра, 1989. С. 42.
- 8. *Тюрин, А.Н.* Минералого-литологическая характеристика цеолитсодержащих пород Татарско-Шатрашанского месторождения : дис. канд. геол.–минерал. наук [Текст] / А.Н. Тюрин. Казань, 2003. 208 с.
- 9. Liang Z., Ni J. Improving the ammonium ion uptake onto natural zeolite by using an integrated modification process. Journal of Hazardous Materials, 2009, Vol. 166, №1, pp. 52–60.
- 10. Балкевич, В.Л. Техническая керамика. Учебное пособие для ВТУЗов. 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.Л. Балкевич. М.: Стройиздат, 1984. 256 с.
- 11. *Шарапова*, *А.В.* Обезвреживание сточных вод от тяжелых металлов под действием ультразвука и утилизация противообледенительных жидкостей с применением природных сорбентов: дис. ... канд. хим. наук [Текст] / А.В. Шарапова. Нижний Новгород, 2015. 114 с.
- 12. Заявка на изобретение RU 2011118502 Российская Федерация, МПК⁷ В01J 29/18. Селективное деалюминирование цеолитов структурного типа морденита [Текст] / Армитидж Г.Д., Санли Д.Г.; заявитель и патентообладатель БП Кемикэлз Лимитед. № 2011118502/04; заявл.

- 29.09.2009; опубл. 20.11.2012, Бюл. № 32. 2 с.
- 13. Основы предвидения каталитического действия [Текст]: Труды IV Международного конгресса по катализу. Том 2 / Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского АН СССР; отв. ред. Я.Т. Эйдус. М.: Наука, 1970. 480 с.
- 14. *Мустафаева Р.М.* Цеолитсодержащие катализаторы в процессах получения ароматических углеводородов: Монография. [Текст] / Р.М. Мустафаева Баку, 2012. 175 с.
- 15. *Немцов А. А.* Модифицирование носителей на основе морденита, шабазита и фожазита [Текст] / А.А. Немцов, М.И. Пакина, Ю.В. Александрова, Е.А. Власов, С.В. Мякин, Ш.О. Омаров // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2015. № 31. С. 25-29.

REFERENCES

- [1] Kotelnikov A.R., Suvorova V.A., Tihomirova V.I., Ahmedzhanova G.M., Desyatova T.A., Kovalskiy A.M. Mineralnyie matrichnyie materialyi dlya immobilizatsii radionuklidov [Mineral matrix materials for the immobilization of radionuclides] [Experimental mineralogy: some results at the turn of the century. Vol. 2.]. M. Pub. Nauka [Science], 2004, p. 209–240. (in Russian)
- [2] TKS-2009. Nuclear Waste Management at Olkiluoto and Loviisa Power Plants: Review of Current Status and Future Plans for 2010–2012. Olkiluoto: POSIVA OY, 2010, 553 p. Available at: http://www.posiva.fi/files/1078/TKS2009_Eng_web_rev1_low.pdf (in English)
- [3] Reijonen H.M., Marcos N. Chemical erosion of the bentonite buffer: do we observe it in nature? Geological Society, London, Special Publications, 2017, Vol. 443, №1, pp. 307–317. Available at: https://doi.org/10.1144/SP443.13 (in English)
- [4] Kočová M., Říhová Z., Zatloukal J. The Issue of Underground Depositing of High Radioactive Waste. Key Engineering Materials, Trans Tech Publications, 2017, Vol. 722, pp. 59–65. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.722.59 (in English)
- [5] Vasilyanova L.S., Lazareva E.A. Tseolityi v ekologii [Zeolites in ecology] [Science news of Kazakhstan], 2016, №1(127), pp. 61–85. (in Russian)
- [6] Kim C.K., Kong J.Y., Chun B.S., Park J.W. Radioactive removal by adsorption on Yesan clay and zeolite. Environmental earth Sciences, 2013, Vol. 68(8), pp. 2393–2398. Available at: https://doi.org/10.1007/s12665-012-1923-5 (in English)
- [7] Osipov V.I. Mikrostruktura glinistyih porod [Microstructure of clay rocks]. Moscow. Nedra, 1989. p. 42. (in Russian)
- [8] Tyurin A.N. Mineralogo-litologicheskaya kharakteristika tseolitsoderzhaschih porod Tatarsko-Shatrashanskogo mestorozhdeniya [Mineralogical and lithological characteristics of zeolite-bearing rocks of the Tatar-Shatrashan deposit]. PhD dissertation (Lithology). Kazan, 2003, 208 p. (in Russian)
- [9] Liang, Z., Ni J. Improving the ammonium ion uptake onto natural zeolite by using an integrated modification process. Journal of Hazardous Materials, 2009, Vol. 166. №1, pp. 52–60. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.002 (in English)
- [10] Balkevich V.L. Tehnicheskaya keramika [Technical ceramics]. M. Stroyizdat, 1984, 256 p. (in Russian)
- [11] Sharapova A.V. Obezvrezhivanie stochnyih vod ot tyazhelyih metallov pod deystviem ultrazvuka i utilizatsiya protivoobledenitelnyih zhidkostey s primeneniem prirodnyih sorbentov [Disinfection of sewage from heavy metals under the influence of ultrasound and salvaging of anti-icing fluids using natural sorbents]. PhD dissertation (Ecology). Nizhniy Novgorod, 2015, 114 p. (in Russian)
- [12] Armitidzh G.D., Sanli D.G. Selektivnoe dealyuminirovanie tseolitov strukturnogo tipa mordenita [Selective dealumination of structural type mordenite zeolites]. Patent application RF, №2011118502, 2009. 2 p. (in Russian)
- [13] Osnovyi predvideniya kataliticheskogo deystviya. Trudyi IV Mezhdunarodnogo kongressa po katalizu. [Basics of catalytic action foresight] Vol. 2. [Zelinsky Institute of Organic Chemistry (ZIOC)]. M. Nauka [Science], 1970, 480 p. (in Russian)
- [14] Mustafayeva R.M. Tseolitsoderzhashchiye katalizatory v protsessakh polucheniya aromaticheskikh uglevodorodov: Monografiya. [Zeolite-containing catalysts in the production of aromatic hydrocarbons: Monograph]. Baku, 2012, 175 p. (in Russian)
- [15] Nemtsov A.A.. Pakina M.I.. AleksandrovaZ Yu.V.. Vlasov E.A.. Myakin S.V.. Omarov Sh.O. Modifitsirovaniye nositeley na osnove mordenita. shabazita i fozhazita [Modification of carriers based on mordenite, chabazite and faujasite]. Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) [Bulletin of the Saint Petersburg State

Institute of Technology (Technical University) / Bulletin of St PbSIT(TU)], 2015, №. 31, pp. 25-29. (in Russian)

The Research of Selected Operational Properties of Sorbing Matrix Material Laboratory Samples on the Base of Natural Zeolite for Radionuclide Immobilization

J.A. Ubaskina*, P.A. Paraguzov**, N.V. Sharova**, E.V. Pankratova***

* NRC «Kurchatov Institute» – IREA Russia, 107076, Moscow, Bogorodsky shaft, 3 e-mail: juliabasjo@gmail.com ORCiD: 0000-0002-5927-3121 WoS Researcher ID: K-4368-2015 **LLC «Stalker» Russia, 432027, Ulyanovsk, ul. Dokuchaeva, 24/176, apt. 6 e-mail: post.continental@gmail.com ORCiD: 0000-0003-4278-6454 WoS Researcher ID: R-3153-2017 e-mail: ns.new.73@mail.ru ORCiD: 0000-0003-0377-4653 WoS Researcher ID: R-3100-2017 *** LLC "Keramzit" Russia, 432045, Ulyanovsk, Moskovskoe shosse, 22 e-mail: elenapankratova3@yandex.ru ORCiD: 0000-0001-8410-9246 WoS Researcher ID: R-3331-2017

Abstract – The work is devoted to the research of selected operational properties of the sorbing matrix material laboratory samples for the immobilization of radionuclides on the basis of local zeolite-containing rocks. It is shown that zeolite-containing rocks are sufficiently thermally stable for use as a raw material for producing of the sorbent matrix material for immobilizing radionuclides. The stages of processing zeolite-containing rocks for the purpose of sorbing matrix material obtaining for the immobilization of radionuclides are given. Optimum parameters of ultrasonic processing of raw materials are found. It is shown that the initial particle size of zeolite-containing rocks practically does not influence the values of the main operational properties of the produced sorbing matrix material for the immobilization of radionuclides.

Keywords: zeolite-bearing rocks, radionuclides, cesium leaching rate, total sorption capacity, thermal stability, ultrasound, steaming.

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

УДК 532.5

ОБОСНОВАНИЕ ГИПОТЕЗЫ ПЕРЕХОДА ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОЕ ПРИ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ КАНАЛАХ

© 2017 В.К. Семенов, А.А. Беляков

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», Иваново, Ивановская обл., Россия

Предложена и обоснована гипотеза перехода медленного стационарного ламинарного течения жидкости в турбулентное при восходящем ее движении вдоль вертикальной неравномерно нагретой поверхности в условиях смешанной конвекции. Проанализирован характер движущих сил и роль силы давления на разных этапах прогрева жидкости. Показано, что указанный переход обусловлен зарождением спутного течения и срывом условий стационарности. Методом интегральных соотношений определены критическое значение конвективного параметра и место зарождения турбулентности.

Ключевые слова: восходящие движения жидкости, смешанная конвекция, ламинарное течение, критерии перехода ламинарного течения в турбулентное.

Поступила в редакцию: 30.11.2017

Изучению восходящих ламинарных и турбулентных течений жидкости в длинных вертикальных каналах вдоль неравномерно нагретых поверхностей стенок каналов в условиях свободной или смешанной конвекции посвящено большое количество исследований, обзор которых можно найти в литературе [1-13]. Интерес к этим течениям в ядерной энергетике связан с возможностью охлаждения активной зоны реакторов в аварийных ситуациях при выходе из строя главных циркуляционных насосов. Из литературы известно [9-11], что при медленном движении вначале жидкость течет ламинарно, а на известной высоте ламинарное течение может перейти в турбулентное. Этот вывод делается или на основе наблюдений, или на основании известных аналогий с другими течениями подобного типа, однако, механизм перехода ламинарного течения в турбулентное по существу до сих пор не выяснен. Не ясна даже главная причина, которая влечет за собой турбулизацию течения в канале. Как известно, турбулентность появляется вследствие неустойчивости ламинарного течения, и обычно она связана с существенной ролью нелинейных инерционных членов в уравнении Навье-Стокса [14]. Эти члены становятся заметными лишь при больших числах Рейнольдса, тогда как при медленном движении и достаточной вязкости жидкости эти числа малы. Вопрос этого перехода в вертикальных каналах, в виду важности различных технических приложений, имеет немаловажное значение в плане расчета теплообмена и течения жидкости. Ламинарный и турбулентные режимы течения имеют существенно различные сопротивления и различные процессы теплообмена, которыми определяется такие важные параметры как перепад температуры между нагретой поверхностью и охлаждающей жидкостью. Этот вопрос требует внимания к чисто физической стороне проблемы, тогда как большинство работ, посвященных рассматриваемому вопросу, содержат только эмпирический материал или посвящены разработке методик решения дифференциальных уравнений, описывающих ту или иную математическую модель течения и нагрева охлаждающей жидкости в вертикальных каналах различной конфигурации. Настоящая работа посвящена обоснованию гипотезы, объясняющей причины указанного перехода.

Вначале дадим качественное объяснение наблюдаемому течению. Рассмотрим вертикальное движение охлаждающей жидкости вдоль стенок стационарное вертикального канала, сообщающегося с нижним и верхним смесителями. Одна из стенок является неравномерно нагретой, а вторая – теплоизолированной. Такая задача типична для многих технических приложений. Анализ для симметричного нагрева проводится аналогичным образом. На частицы жидкости в условиях смешанной конвекции действуют четыре силы: сила инерции, сила тяжести, сила сопротивления и сила давления. При стационарном движении их сумма равна нулю. В медленных потоках, которые нами рассматриваются, силами инерции можно пренебречь, тогда остаются три рода сил: силы тяжести, силы сопротивления и силы давления. В установившихся течениях эти силы должны давать равновесие: т.е. движущие силы должны уравновешиваться тормозящими. При изотермических течениях движущей силой является сила давления и она направлена в сторону падения давления, и т.к. она движущая, то направлена в сторону течения. Это значит, что в таких потоках давление всегда уменьшается в направлении течения. Эти закономерности весьма привычны и так укоренились в сознании, что стали интуитивными. Однако, в тех случаях, когда нужно учитывать поле тяжести, все эти закономерности нарушаются из-за присутствия третьей силы – силы тяжести. Поскольку указанные закономерности перешли в интуицию, то возможны всякого рода недоразумения, чреватые непониманием физической сути дела. В частности может нарушаться только что сформулированная закономерность: давление уменьшается в направлении движения.

Остановимся на этом вопросе подробнее. В задачу входят три величины: скорость, температура и давление. Все три величины взаимосвязаны, так что ни об одной из них нельзя говорить, не касаясь отчасти и других. Жидкость в канал входит с постоянной температурой, т.е. в начале канала течение почти изотермическое и давление падает по течению. В изотермическом движении сила давления выступает в качестве единственной движущей силы, поэтому давление должно уменьшаться вдоль потока. При неизотермическом течении сила тяжести имеет вид $\rho \vec{g} = \rho_0 (1 - \beta T) \vec{g}$. Здесь β - коэффициент объемного расширения, T-средняя по сечению канала температура, ρ_0 - плотность жидкости при температуре входа в канал T_0 , g - ускорение свободного падания.

Рассмотрим небольшой столб жидкости высотой dz. Сила давления направлена сила тяжести вниз, поэтому ИХ сумма имеет вверх, $dp - \rho g dz = dp - \rho_0 g dz + \rho_0 \beta T g dz$. Далее будем иметь в виду так называемое «гидродинамическое давление» р, которое получается путем вычитания из полного давления р "гидростатического" давления, отвечающего температуре входа $T_0 \ p' = p - \rho_0 gz$ Здесь z- координата по высоте канала. Такая перенормировка давления возможна, поскольку $rot[grad(p-\rho_0gz)]=0$. Таким образом, движущей силой является $dp' + \rho_0 \beta T g dz$, т.е. сила тяжести направлена вверх, в сторону силы давления. Итак, гидродинамическое давление вначале уменьшается по течению также как и при изотермическом течении, т.е. линейно с высотой. Но это только примерно. По мере прогрева жидкости все большую роль начинает играть сила тяжести (сила Архимеда), направленная вверх, она то и вызывает движение жидкости по каналу в целом. С учетом нагрева жидкости движущая сила должна уравновесить силу сопротивления dR, т.е.

$$\frac{dR}{dz} = \frac{dp'}{dz} + \rho_0 \beta g T .$$

Левая часть этого уравнения, т.е. сила сопротивления почти не изменяется с высотой и на нее можно смотреть как на постоянную, тогда как сила тяжести медленно растет, следовательно, сила давления медленно уменьшается, а это значит, что само давление с высотой будет изменяться не строго линейно, а отклоняясь от линейного закона (рис. 1). Это отклонение приведет к тому, что на некоторой высоте кривая давления станет параллельной оси z, т.е. сила давления на этой высоте обратится в нуль, и сила сопротивления целиком будет уравновешиваться силой тяжести. На еще больших высотах жидкость будет продолжать нагреваться, и сила тяжести превысит силу сопротивления. Чтобы равновесие сохранилось, сила давления вновь появится, но будет направлена вниз против движения, а само давление будет расти в направлении течения. В этом случае сила давления из движущей превратится в тормозящую.

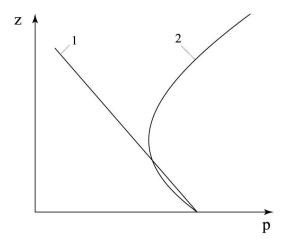


Рис. 1. – Качественная зависимость гидродинамического давления от высоты канала 1 – изотермическое течение, 2 – неизотермическое течение [Qualitative dependence of hydrodynamic pressure on the channel height 1 - isothermal flow, 2 - non-isothermal flow]

Наиболее интересным является поведение поля скоростей. Жидкость втекает в канал с постоянной по сечению скоростью, а затем поле скоростей начинает деформироваться. На малых участках жидкость не успевает прогреться, так что здесь справедливы законы изотермического течения. При малых числах Рейнольдса участок динамической стабилизации порядка ширины канала, так что им можно пренебречь и считать профиль сформировавшимся. Но кроме участка динамической стабилизации есть участок тепловой стабилизации, которым нельзя пренебречь. На этом участке первоначально параболический профиль скоростей начнет деформироваться, но деформируется он медленно. Это означает, что в уравнении Навье-Стокса вполне можно пренебречь инерционными членами и считать, что на каждую частицу жидкости действуют три силы: сила тяжести, сила сопротивления и сила давления.

При этом также считаем, что гидростатическое давление исключено из рассмотрения и тогда сила тяжести, обусловленная ростом температуры, направлена вверх. На участке стабилизации поперек канала имеем две зоны: в одной зоне жидкость отчасти прогрета, а в другой она не прогрета и ее температура равна температуре входа T_0 (рис. 2). В пределах пограничного слоя (нагретого) на частицу действуют две

движущих силы: сила тяжести и сила давления, а вне слоя только сила давления. С увеличением высоты сила тяжести растет, т.к. растет температура и, кроме того, увеличивается толщина слоя. Это приводит к тому, что имеет место медленная перекачка потока жидкости из наружного слоя в пристеночный нагретый слой. При этом в силу стационарности течения общий расход жидкости остается неизменным, но нагретый слой расширяется, и скорость его частиц растет. Вне нагретого слоя скорость частиц уменьшается, а вместе с ней уменьшается и градиент давления. Постепенно скорость частиц в наружной зоне может снизиться до нуля. Дальнейшее развитие ситуации может пойти по двум сценариям. Во-первых, может так случиться, что скорость в непрогретой зоне не успеет снизиться до нуля до того момента как весь канал прогреется, нагретый слой достигнет адиабатической стенки канала и участок стабилизации закончится. В этом случае жидкость будет течь вверх ламинарно. Вовторых, может случиться, что жидкость не успеет прогреться, а скорость в непрогретой зоне снизится до нуля и будет изменяться далее до возникновения спутного (возвратного) течения. С физической точки зрения этот режим наиболее интересен. Возникшее спутное течение будет нарастать до тех пор, пока канал не прогреется и оно должно идти от самой верхней кромки канала от места его соединения со смесителем. Стационарное течение имеет определенный профиль скоростей и температур, как на всем протяжении канала, так и на верхней его кромке. Если это распределение скоростей и температур не сформируется, то стационарный режим течения будет невозможен. Втекание жидкости из смесителя в канал будет происходить с профилем скорости, определяемым геометрией смесителя, а температура будет определяться его средней температурой. Понятно, что и профиль скоростей и поле температур будут совсем не те, которые требуются для формирования стационарного течения в спутном потоке. Произвольные скорости и температуры, может быть, и смогут поддерживать спутный поток, но движение не будет стационарным. Изменяясь сложным образом во времени, оно будет турбулентным. Как показывает эксперимент, спутный поток не появляется, так что зарождением турбулентности следует считать ту высоту, на которой он мог бы появиться. Эта турбулентность теоретически была предсказана В. Н. Волковым и В. К. Ли-Орловым и наблюдалась одним из авторов данной работы экспериментально при моделировании системы охлаждения обмоток мощных трансформаторов [12].

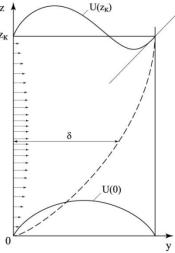


Рис. 2. — Схема вертикального канала δ — толщина теплового пограничного слоя U(0) — профиль скорости в начале канала; $U(z_{\kappa})$ — профиль скорости при спутном течении [Vertical channel scheme δ is the thickness of the thermal boundary layer U(0) - velocity profile at the beginning of the channel U(zk) is the velocity profile for the slowness flow]

Таким образом, математической частью задачи является определение условий и места зарождения спутного потока. Математическая модель стационарной смешанной конвекции базируется на системе уравнений в приближении Буссинеска [13]. Эти уравнения для плоской геометрии при пренебрежении в уравнении Навье-Стокса силами инерции имеют следующий вид (рис.2):

$$\frac{\partial p(y,z)}{\partial y} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial p(y,z)}{\partial z} - GrT = \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \qquad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$
(3)

$$u\frac{\partial T}{\partial z} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\Pr}\frac{\partial^2 T}{\partial y^2},\tag{4}$$

где р и T – соответственно избыток давления над гидростатическим и температура, отсчитанные от входа в канал,

и и v — соответственно продольная и поперечная компоненты скорости жидкости.

Здесь первые два уравнения (1, 2) – уравнения Навье-Стокса при принятых выше условиях, третье уравнение – уравнение непрерывности, а четвертое – уравнение теплопроводности.

За единицу длины взята ширина канала h, за единицу температуры принят ее перепад между верхним и нижним смесителями ΔT , а остальные масштабы выбраны так, чтобы коэффициенты при всех слагаемых в уравнении (2), за исключением силы Архимеда, равнялись единице. При такой нормировке появляются два критерия подобия: число Прандтля и число Грасгофа:

$$Pr = \frac{v}{a}$$
, $Gr = \frac{\beta g h^3 \Delta T}{v^2}$.

Здесь ν и а — соответственно средние в рабочем интервале температур коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности жидкости. Граничными условиями задается расход теплоносителя, который при данной нормировке является средним по сечению канала числом Рейнольдса <Re>. Краевые условия имеют следующий вид:

При
$$y=0$$
 $j=-\frac{\partial T}{\partial y}$; $u=v=0$;
$$\text{при } y=1 \ \frac{\partial T}{\partial y}=0 \, ; \ u=v=0 \, ;$$

$$\text{при } z=0 \ T(0,y)=0 \, ; \ p=0 \, ; \ \left\langle u \right\rangle = \left\langle \operatorname{Re} \right\rangle = \int u dy = const \ .$$

Здесь і - плотность теплового потока, исходящего из нагретой стенки.

Решение поставленной задачи будем искать известным в гидродинамике методом интегральных соотношений [14]. Для этого проинтегрируем уравнение (2) поперек канала по у:

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_0 = \frac{dp}{dz}y - Gr\int_0^y Tdy . \tag{5}$$

Повторное интегрирование дает:

$$u = \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_0 y + \frac{dp}{dz} \frac{y^2}{2} - Gr \int_0^y dy \int_0^y T dy.$$

Учитывая, что при y=1 u=0, получим:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_0 = -\frac{1}{2}\frac{dp}{dz} + Gr\int_0^y dy \int_0^y Tdy$$

и соответственно:

$$u = -\frac{1}{2} \frac{dp}{dz} (y - y^{2}) + Gr\varphi(z, y), \qquad (6)$$

где
$$\varphi(z, y) = y \int_{0}^{1} dy \int_{0}^{y} T dy - \int_{0}^{y} dy \int_{0}^{y} T dy$$
.

Градиент и перепад давления находим из условия постоянства расхода жидкости:

$$\langle u \rangle = \int_{0}^{1} u dy = -\frac{1}{12} \frac{dp}{dz} + Gr \int_{0}^{1} \varphi(z, y) dy ,$$

$$-\frac{dp}{dz} = 12 \left[\langle u \rangle - Gr \int_{0}^{1} \varphi(z, y) dy \right],$$

$$-p(z) = 12 \left[\langle u \rangle z - Gr \int_{0}^{z} dz \int_{0}^{1} \varphi(z, y) dy \right].$$
(7)

Подставляя (7) в (6), получим профиль скорости:

$$u = 6 \left[\langle u \rangle - Gr \int_{0}^{1} \varphi(z, y) dy \right] \left(y - y^{2} \right) + Gr \varphi(z, y).$$

Гидравлическое сопротивление канала находим из выражения (5):

$$F_{c} = \int_{0}^{z} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{0} - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{1} \right] dz = -p(z) + Gr \int_{0}^{z} dz \int_{0}^{1} T dy.$$

Далее складывая уравнение (3) с уравнением (4), получим:

$$\frac{\partial (Tu)}{\partial z} + \frac{\partial (Tv)}{\partial y} = \frac{1}{\Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}.$$

Интегрируя это уравнение поперек канала с учетом граничных условий, получим уравнение для среднемассовой температуры:

$$\langle T \rangle = \frac{\int_{0}^{1} UT du}{\langle \text{Re} \rangle}$$
$$\frac{d \langle T \rangle}{dz} = \frac{j(z)}{\text{Pr} \langle \text{Re} \rangle}$$

Задавая в качестве примера распределение плотности теплового потока в виде, характерном для тепловыделяющей сборки ядерного реактора:

$$j(z) = j_0 \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right), \text{ имеем:}$$

$$\langle T \rangle = \frac{j_0 H}{\pi \Pr \langle \text{Re} \rangle} \left(1 - \cos\frac{\pi z}{H}\right). \tag{8}$$

Здесь Н – высота тепловыделяющей поверхности канала.

В изложенном здесь методе все гидродинамические величины выражены через температуру. Если бы поле температур было известно точно, то на основе интегральных соотношений можно было бы найти точные выражения и для гидродинамических величин. Отсюда ясно, что точность применяемого здесь метода определяется точностью задания температурного поля. Поскольку температура всегда изменяется монотонно, то очень сильно "промазать" в задании температурного профиля маловероятно, тогда как профиль скоростей может изменяться весьма замысловатым образом. Понятно, что все гидродинамические величины следует выражать через температуру, а не наоборот.

Далее рассмотрим участок тепловой стабилизации. Для его расчета введем характерный размер $\delta(z)$ — толщину теплового нагретого слоя, которая должна удовлетворять следующим условиям:

при z=0
$$\delta(0)$$
=0; при y= δ $T(z, \delta)$ =0, $\frac{\partial T}{\partial y}$ = 0.

На адиабатической стенке $\delta(z_k)$ =1. Здесь z_k – высота, на которой тепловой нагретый слой достигает адиабатической стенки. С учетом граничных условий зададим температурный профиль в следующем виде:

при
$$0 \le y \le \delta$$
 $T(z,y) = \frac{1}{2}\delta(z)\left(1 - \frac{y}{\delta(z)}\right)^2 j(z);$ (9) при $\delta < y \le 1$ $T(z,y) = 0$.

Опуская промежуточные вычисления, приведем выражение для профиля скорости и градиента давления при $z=z_k$ и $\delta=1$, когда тепловой нагретый слой достигнет адиабатической стенки:

$$u = 6 \langle \text{Re} \rangle \left(1 - \frac{K \cdot j(z_k)}{80} \right) (y - y^2) + \frac{1}{24} K \cdot j(z_k) \left[(1 - y) - (1 - y)^4 \right], \tag{10}$$
$$-\frac{dp}{dz} = 12 \langle \text{Re} \rangle \left(1 - \frac{K \cdot j(z_k)}{80} \right).$$

Здесь $K = \frac{Gr}{\langle \text{Re} \rangle}$ – конвективный параметр.

Из уравнения (8) с учетом (9) и (10), после элементарных вычислений, получим уравнение для определения z_k :

$$\frac{H}{\pi \Pr} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi z_k}{H}\right) \right] = \frac{3}{20} \sin\left(\frac{\pi z_k}{H}\right) + \frac{K \cdot j_0}{2800} \sin^2\left(\frac{\pi z_k}{H}\right).$$

Как уже говорилось, переход от ламинарного течения к турбулентному связан с появлением спутного течения, условием появления которого (рис. 2) является $\frac{du}{dy} > 0$ при у=1. После соответствующих вычислений, находим:

$$K > \frac{360}{j(z_k)}. (11)$$

Симметричный нагрев среды с постоянной плотностью теплового потока рассмотрен в работе [15]. Для симметричного нагрева условие (11) принимает вид

 $K > \frac{180}{j(z_k)}$. Из полученных решений видно, что при вынужденной конвекции (Gr=0) движущей силой является градиент давления, а профиль скорости является

параболическим $U = 6\langle \text{Re} \rangle (y-y^2)$. При $K > \frac{80}{j(z_k)}$ градиент давления поменяет знак,

т.е. сила давления из движущей станет тормозящей, как и следует из анализа, приведенного в начале статьи.

Таким образом, проведенный анализ позволяет обосновать предлагаемую гипотезу, найти гидродинамические характеристики ламинарного течения и количественно определить условия перехода к турбулентному режиму течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Остроумов Г.А. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. -М.: Гостехиздат, 1952.
- 2. *Лыков А. В. и др.* Сопряженные задачи конвективного теплообмена / А.В. Лыков, А. А. Алексашенко, В. А. Алексашенко. Минск: Наука и техника, 1971.
- 3. Гебхарт Б. и др. Свободно конвективные течения, тепло- и массообмен. М.: Мир, 1991.
- 4. Гусев С.Е., Шкловер Г.Г.. Свободноконвективный теплообмен при внешнем обтекании тел / Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р.Л. Махаджан М.: Энергоатомиздат, 1992
- 5. *Кутателадзе С. С. и др.* Турбулентная естественная конвекция вертикальной изотермической пластины / С. С. Кутателадзе, А. Г. Кирдяшкин, В. П. Ивакин «Докл. АН СССР», 1974, т. 21, №6, с. 1270.
- 6. Дропкин Д., Сомерскейлз Е. Теплоотдача путем естественной конвекции в жидкостях, ограниченных двумя параллельными плоскими поверхностями, которые располагаются под различными углами наклона к горизонтали.— «Тр. амер. об-ва инж.-мех., сер. С. Теплопередача», 1965, № 1, с. 94.
- 7. *Петухов Б. С.* Турбулентное течение и теплообмен в трубах при существенном влиянии термогравитационных сил. В кн.: Труды Международного семинара по турбулентной свободной конвекции. Дубровник, СФРЮ, 1976, с. 701
- 8. Merrikh A. A., Lage J. L. Natural convection in an enclosure with disconnected and conducting solid blocks // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2005 V. 48, N 7 P. 1361–1372.
- 9. *Кириллов*, П.Л. u ∂p . Тепломассобмен в ядерных энергетических установках [Текст] / П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская. М.: ИздАТ, 2008.
- 10. *Кириллов, П.Л. и др.* Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т.1. [Текст]/ П.Л. Кириллов, В.П. Бобков, А.В. Жуков, В.С. Юрьев. М.: ИздАТ, 2010.
- 11. *Петухов, Б.С. и др.* Теплообмен в ядерных энергетических установках [Текст] / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. М.: Изд. МЭИ, 2003.
- 12. Семенов, В.К. и др. Конвективное охлаждение обмоток мощных электрических трансформаторов [Текст] / В.К. Семенов, А.Ф. Горбунцов, Д.А. Горбунцов // Сб. "Исследования в области теоретических основ электротехники и инженерной электрофизики". Иваново: Изд. Ивановского энергоинститута, 1982. С. 113.
- 13. Γ ершуни, Γ .3. u ∂p . Устойчивость конвективных течений [Текст] / Γ .3. Γ ершуни, Е.М. Жуховицкий, А.А. Непомнящий. М.: Наука, 1989.
- 14. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. М.: Наука, 1974.
- 15. Семенов, В.К. К вопросу теплообмена в вертикальных каналах газоразрядных аппаратов [Текст] / В.К. Семенов // Теплофизика высоких температур. − 1998. − Т. 36. − №3. − С. 503–507.

REFERENCES

- [1] Ostroumov G.A. Svobodnaya konvekciya v usloviyah vnutrennei' zadachi. M. Pub. Gostehizdat, 1952. (In Russian)
- [2] Lykov A. V., Aleksashenko A. A., Aleksashenko V. A.. Sopryazhennye zadachi konvektivnogo teploobmena. Minsk. Pub. Nauka i tehnika, 1971. (In Russian)
- [3] Gebhart B. Svobodno konvektivnye techeniya, teplo- i massoobmen. M. Pub. Mir, 1991. (In Russian)
- [4] Gusev S.E., SHklover G.G. Svobodnokonvektivnyi' teploobmen pri vneshnem obtekanii tel. M. Pub. JEnergoatomizdat, 1992. (In Russian)

- [5] Kutateladze S. S., A. G. Kirdyashkin, V. P. Ivakin. Turbulentnaya estestvennaya konvekciya vertikal'noi' izotermicheskoi' plastiny «Dokl. AN SSSR», 1974, t. 21, №6, p. 1270. (In Russian)
- [6] Dropkin D., Somerskei'lz E. Teplootdacha putem estestvennoi' konvekcii v zhidkostyah, ogranichennyh dvumya parallel'nymi ploskimi poverhnostyami, kotorye raspolagayutsya pod razlichnymi uglami naklona k gorizontali. «Tr. amer. ob-va inzh.-meh., ser. S. Teploperedacha», 1965, № 1, p. 94. (In Russian)
- [7] Dropkin D., Somerskei'lz E. Teplootdacha putem estestvennoi' konvekcii v zhidkostyah, ogranichennyh dvumya parallel'nymi ploskimi poverhnostyami, kotorye raspolagayutsya pod razlichnymi uglami naklona k gorizontali.− «Tr. amer. ob-va inzh.-meh., ser. S. Teploperedacha», 1965, № 1, p. 94. (In Russian)
- [8] Merrikh A. A., Lage J. L. Natural convection in an enclosure with disconnected and conducting solid blocks // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2005 V. 48, N 7 P. 1361–1372.
- [9] Kirillov P.L., Bogoslovskaja G.P. Teplomassobmen v jadernykh ehnergeticheskikh ustanovkakh [Heat-Energy in Nuclear Power Plants]. M. Pub. IzdAT, 2008. (in Russian)
- [10] Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Jurjev V.S. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam v jadernojj ehnergetike [Handbook on Thermal Hydraulic Calculations in Nuclear Power Engineering]. Vol. 1. M. IzdAT, 2010. (in Russian)
- [11] Petukhov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A., Solovjev S.L. Teploobmen v jadernykh ehnergeticheskikh ustanovkakh [Heat Transfer in Nuclear Power Plants]. M. Pub. MEI, 2003. (in Russian)
- [12] Semenov V.K., Gorbuncov A.F., Gorbuncov D.A. Konvektivnoe okhlazhdenie obmotok moshhnykh ehlektricheskikh transformatorov [Convective Cooling of Windings of Powerful Electrical Transformers]. Sbornik Issledovanija v oblasti teoreticheskikh osnov ehlektrotekhniki i inzhenernojj ehlektrofiziki [Collection of works "Research in the Field of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering and Engineering Electrophysics"]. Ivanovo. Pub. Ivanovskogo ehnergoinstituta, 1982. p. 113. (in Russian)
- [13] Gershuni G.Z., Zhukhovickiji E.M., Nepomnjashhiji A.A. Ustojjchivost konvektivnykh techeniji [Stability of Convective Currents]. M. Pub. Nauka [Science], 1989. (in Russian)
- [14] Shlikhting G. Teorija pogranichnogo sloja [Boundary Layer Theory]. M. Pub. Nauka [Science], 1974. (in Russian)
- [15] Semenov V.K. K voprosu teploobmena v vertikalnykh kanalakh gazorazrjadnykh apparatov [Heat Exchange in Vertical Channels of Gas-Discharge Apparatus]. Teplofizika vysokikh temperature [Thermal Physics of High Temperatures], 1998, Vol. 36, №3, pp. 503–507. (in Russian)

Hypothesis Substantiation of Laminar Current Transition to Turbulent during Mixed Liquid Convection in Vertical Channels

V.K. Semenov, A.A. Beliakov

Ivanovo State Power University, 34 Rabfakovskaya st., Ivanovo, Ivanovskaya region, Russia, 153003 E-mail: oh_behave@mail.ru

Abstract – The paper offers and justifies the hypothesis of the transition of a slow steady-state laminar liquid flow into a turbulent one during its ascending motion along a vertical unequally heated surface under conditions of mixed convection. It analyzes the nature of the driving forces and the role of the pressure force at different stages of liquid heating. It is shown that this transition is due to the origin of the wakeful flow and the disruption of the stationarity conditions. The critical value of the convective parameter and the place of turbulence generation are determined by the method of integral relations.

Keywords: ascending movement of the liquid, mixed convection, laminar current, criteria of transition of the laminar to turbulent current.

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

УДК 621.791.75.053

ДЕФОРМАЦИЯ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ МАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2017 Ц. Гу, А.М. Рыбачук

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

В статье рассмотрен способ формирования швов во внешнем поперечном магнитном поле четырехполюсной магнитной системы при дуговой сварке. Исследована деформация магнитного поля при сварке ферромагнитных металлов. Показана зависимость величины смещения оси магнитного поля от тока в катушках магнитной системы.

Ключевые слова: дуговая сварка, четырёхполюсная магнитная система, ферромагнитный металл, магнитное поле.

Поступила в редакцию: 05.12.2017

Одним из простых способов формирования шва при дуговой сварке является создание массовых электромагнитных сил в жидком металле введением в сварочную ванну поперечного магнитного поля [1-4](рис. 1).

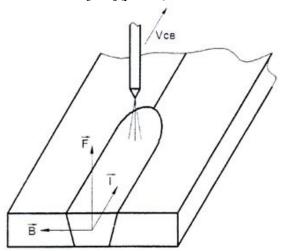


Рис. 1. – Схема удержания сварочной ванны поперечным магнитным полем [Scheme of holding the weld pool by a transverse magnetic field]

При дуговой сварке происходит деформация температурного поля при движении дуги [5, 6]. В результате происходит деформация электрического поля в изделии [7, 8]. Через жидкий металл сварочной ванны протекает растекающийся по свариваемому изделию сварочный ток. При вводе в сварочную ванну поперечного магнитного поля, пронизывающего жидкий металл, взаимодействие сварочного тока с магнитным полем создаёт в жидком металле массовые электромагнитные силы, направленные вверх или вниз в зависимости от взаимного направления магнитного поля и сварочного тока. Созданием в сварочной ванне электромагнитных сил можно компенсировать или

превышать силы тяжести.

Такой способ создания электромагнитных сил в жидком металле позволяет располагать устройство, создающее магнитное поле с любой стороны изделия. В том числе и со стороны дуги. Данный способ даёт возможность управлять формой шва и при сварке изделий, не имеющих доступа к обратной стороне шва [3].

При введении поперечного магнитного поля в область сварочной ванны поле взаимодействует не только со сварочным током в жидком металле, но и со сварочным током в дуге [9-11]. Ввести магнитное поле только в жидкий металл, не вводя в область расположения сварочной дуги, практически не удаётся из-за выпучивания его в зазоре между полюсами магнитной системы. Поэтому при вводе магнитного поля в хвостовую часть сварочной ванны дуга оказывается под воздействием магнитного поля почти такой же величины, как и в сварочной ванне.

При взаимодействии магнитного поля с дугой происходит отклонение дуги, меняются её технологические свойства и при индукции магнитного поля, недостаточной для формирования шва, она обрывается.

Для обеспечения устойчивого горения дуги при использовании больших магнитных полей в сварочной ванне предложено ввести два поперечных магнитных поля: одно позади дуги в область сварочной ванны, а другое, такое же по величине, но противоположного направления, перед дугой [3].

В результате одно поперечное поле будет воздействовать на дугу в одном направлении, а другое – в противоположном, и дуга будет сохранять устойчивость. Для введения двух поперечных магнитных полей необходима четырёхполюсная магнитная система (рис. 2.).

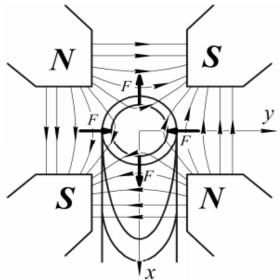


Рис. 2. – Дуга в четырехполюсном магнитном поле [Arc in a four-pole magnetic field]

Четырёхполюсное магнитное поле, взаимодействуя с током в дуге, создаёт электромагнитные силы в дуге, которые сдавливают дугу в поперечном направлении и растягивают её в направлении сварки при удержании сварочной ванны (рис. 2).

Такой способ формирования швов во внешнем поперечном магнитном поле четырехполюсной магнитной системы при дуговой сварке (рис. 2), позволяет формировать швы с нулевой выпуклостью с обратной стороны при однопроходной сварке изделий из немагнитных материалов [3]. На рисунке 3 показано направление магнитных полей в сварочной ванне при сварке на обратной полярности.

В этом случае при сварке стыковых швов с полным проплавлением или корневых швов можно получать требуемую форму обратной стороны шва (рис. 4).

72

При сварке немагнитных металлов при совпадении оси электрода и оси магнитной системы и, следовательно, оси магнитного поля, дуга деформируется симметрично [12-14] (рис. 5).

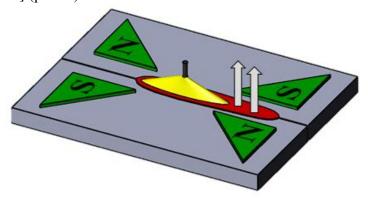


Рис. 3. – Схема удержания сварочной ванны четырёхполюсным магнитным полем при сварке на обратной полярности [Scheme of holding the welding bath with a four-pole magnetic field when welding on the reverse polarity]

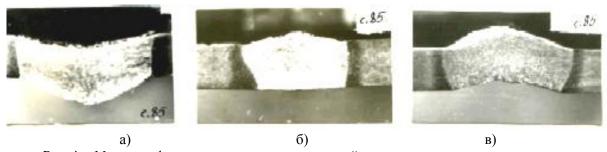


Рис. 4. – Макрошлифы швов, выполненных при разной величине индукции магнитного поля в сварочной ванне [Macroscale stitches made at different values of magnetic field induction in the weld pool]: a) B=0; б) B=0,08 T; в) B=0,1 T

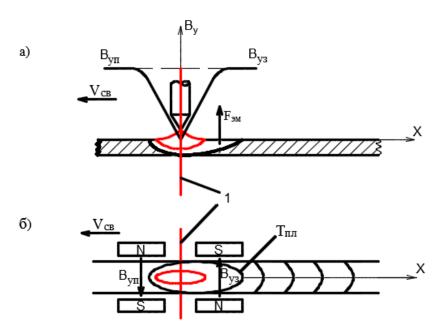


Рис 5. – Дуга в квадрупольном магнитном поле при сварке немагнитных металлов при удержании сварочной ванны:

a) – вид сбоку; б) – вид сверху; 1- ось магнитного поля [Arc in a quadrupole magnetic field when welding non-magnetic metals while holding a weld pool: a) - side view; b) top view; 1- magnetic field axis]

Поперечные магнитные поля перед дугой B_{yn} и за дугой B_{y3} равны.

При сварке ферромагнитных металлов возникает немагнитная область, ограниченная изотермой Кюри (рис. 6).

В этом случае магнитное поле, созданное квадрупольной магнитной системой шунтируется металлом свариваемого изделия. Это приводит к уменьшению магнитного поля в сварочной ванне. Боковые шунтирующие магнитные потоки $\Phi_{\rm m6}$ равны, а шунтирующие магнитные потоки перед дугой $\Phi_{\rm mn}$ и за дугой $\Phi_{\rm 3n}$ не равны из-за несимметричности немагнитной зоны относительно оси дуги. В результате происходит смещение оси магнитного поля в направлении сварки (рис. 6,а) при совпадении оси магнитной системы с осью электрода. Индукция магнитного поля перед дугой оказывается меньше индукции магнитного поля за дугой. Большая часть столба дуги оказывается под воздействием магнитного поля за дугой, и дуга отклоняется в сторону сварочной ванны при удержании жидкого металла (рис. 6,а).

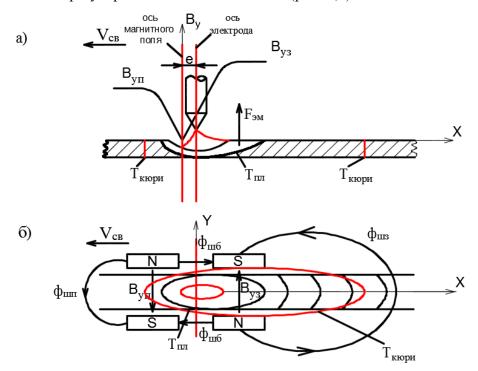


Рис. 6. – Дуга в квадрупольном магнитном поле при сварке ферромагнитных металлов при удержании сварочной ванны:

а) – вид сбоку; б) – вид сверху

[Arc in a quadrupole magnetic field when welding ferromagnetic metals while holding a weld pool: a) - side view; b) top view]

Величину смещения e оси магнитного поля от оси электрода и оси магнитной системы оценивали измерением величины индукции поперечного магнитного поля B_y вдоль оси x.

Исследования магнитного поля проводили на пластине из низкоуглеродистой стали толщиной 3 мм с вырезанной немагнитной зоной. Размеры немагнитной зоны рассчитывали для случая дуговой сварки неплавящимся электродом на режиме: $I=300A,\ U=22B,\ V_{cB}=0,51\ \text{м/ч}$. Для определения области, ограниченной изотермой Кюри, использовали расчёт температурного поля предельного состояния применяя схему линейного источника в бесконечной пластине [15]:

$$T(r,x) = \frac{q}{2\pi\lambda s} \exp\left(-\frac{v_{c\theta}x}{2a}\right) k_0 \left(r\sqrt{\frac{v_{c\theta}^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right) + 273$$

74 ГУ и др.

где Т – температура, К;

q – эффективная тепловая мощность дуги, Вт;

 λ – коэффициент теплопроводности, $Bt/(M \cdot град)$;

s – толщина пластины, м;

 v_{cB} – скорость сварки, м/с;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

 k_0 – функция Бесселя от мнимого аргумента второго рода нулевого порядка;

b – коэффициент, учитывающий теплоотдачу боковой поверхности пластины, c^{-1} .

Измерения проводили цифровым гауссметром GM2, оснащенным поперечным ST щупом с размерами 66x3,6x0,8 мм с установленным на конце датчиком Холла размерами 0,2x0,2 мм. Датчик Холла перемещали вдоль оси OX с помощью суппортов с погрешностью $\pm 0,05$ мм. Погрешность измерения индукции магнитного поля гауссметром GM2 составляла не более 1%.

На рисунке 7 представлены результаты измерений при изменении величины магнитного поля током в катушках магнитной системы. Из-за наличия несимметричной относительно оси электрода вдоль линии сварки немагнитной зоны ось магнитного поля смещается в направлении сварки. Магнитное поле перед дугой становится меньше магнитного поля за дугой.

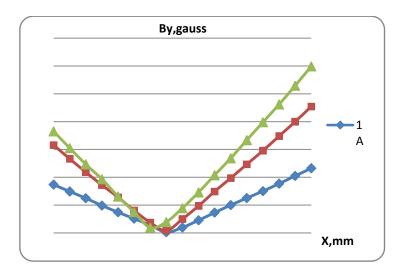


Рис. 7. – Распределение поперечной составляющей индукции магнитного поля вдоль оси шва [Distribution of the magnetic field induction transverse component along the axis of the seam]

Величина смещения растёт с увеличением тока в катушках магнитной системы (рис. 8).

ВЫВОДЫ

- 1. Наличие ферромагнитного свариваемого металла уменьшает магнитное поле в сварочной ванне.
- 2. Использование симметричного четырехполюсного магнитного поля при дуговой сварке ферромагнитных металлов приводит к искажению магнитного поля, определяемому наличием в сварочной ванне несимметричной немагнитной зоны, ограниченной изотермой Кюри.
- 3. Деформация магнитного поля приводит к смещению оси магнитного поля и деформации дуги.

4. Смещение оси магнитного поля зависит от величины используемого магнитного поля.

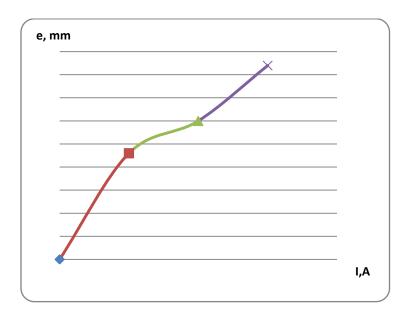


Рис. 8. – Зависимость величины смещения от тока в катушках магнитной системы [Dependence of the displacement magnitude on the current in the magnetic system coils]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Рыжов Р.М.* Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процессы формирования и кристаллизации швов [Текст] / Р.М. Рыжов // Автоматическая сварка. 2007. №2. С. 56–58.
- 2. Завьялов В.Е. и др. Использование продольного магнитного поля при наплавке под флюсом [Текст] / В.Е. Завьялов, Я.П. Звороно, А.Б. Петраков // Сварочное производство. 1990. №2. С. 3—6.
- 3. *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.
- 4. *Акулов А.И. и др.* Особенности формирования шва при сварке в поперечном магнитном поле [Текст] / А.И. Акулов, А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов // Сварочное производство. 1979. №7. С. 11—14.
- 5. *Коновалов А.В. и др.* Теория сварочных процессов [Текст] / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, В.М. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2007. 752 с.
- 6. *Куркин А.С. и др.* Обоснование исключения послесварочной термической обработки кольцевых стыков магистральных газопроводов с толщиной стенки свыше 30 мм из стали к65 [Текст] / А.С. Куркин, С.А. Королев, П.А. Пономарев // Наука и образование. − 2013. − №5. − С. 61−74.
- 7. Райчук Ю.И. Распределение тока по пластине при дуговой сварке [Текст] / Ю.И. Райчук // Автоматическая сварка. 1967. №4. С. 19–22.
- 8. *Рыбачук А.М. и др.* Распределение сварочного тока в изделии и ванне при дуговой сварке [Текст] / А.М. Рыбачук, Г.Г. Чернышов // Сварка и диагностика. 2011. №6. С. 16–20.
- 9. *Рыбачук А.М. и др.* Деформация дуги в квадрупольном магнитном поле [Текст] / А.М. Рыбачук, Ц. Гу, Н.В. Крысько // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015. №8-1. С. 73–78.
- 10. *Крысько Н.В. и др.* Область, чувствительная к внешним магнитным полям при сварке в CO₂ [Текст] / Н.В. Крысько, А.М. Рыбачук // Сварка и диагностика. 2013. №5. С. 36–40.
- 11. *Крысько Н.В. и др.* Особенности области, чувствительной к внешним магнитным полям при сварке в аргоне и смесях [Текст] / Н.В. Крысько, А.М. Рыбачук // Сварка и диагностика. $2014. N \cdot 5. C. 54 56.$
- 12. Nomura K., Ogino Y., Haga T., Hitara Y. Influence of magnet configuration on magnetic controlled

76 ГУ и др.

- TIG arc welding // Transactions of JWRI. 2010. Vol. 39, №2. pp. 209–210.
- 13. *Гу Ц. и др.* Электрическое поле в изделии при дуговой сварке нормально-эллиптическим источником [Текст] / Ц. Гу, А.М. Рыбачук // Глобальная ядерная безопасность. -2015. -№4. C. 77–83.
- 14. *Гу Ц. и др.* Анализ магнитного поля квадрупольной магнитной системы численным моделированием [Текст] / Ц. Гу, Н.В. Крысько, А.М. Рыбачук // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. − 2016. − №11-1. − С. 74–79.
- 15. *Рыкалин Н.Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке [Текст] / Н.Н. Рыкалин. М.: МАШГИЗ, 1951. 296 с.

REFERENCES

- [1] Ryzhov R.M. Vliyaniye impulsnykh elektromagnitnykh vozdeystviy na protsessy formirovaniya i kristallizatsii shvov [Effect of pulsed electromagnetic effects on the formation and crystallization of seam]. Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding], 2007, №2, ISSN 0005-111X, pp. 56–58. (in Russian)
- [2] Zavyalov V.Ye., Zvorono Ya.P., Petrakov A.B. Ispolzovaniye prodolnogo magnitnogo polya pri naplavke pod flyusom [Using the longitudinal magnetic field in surfacing Submerged]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1990, №2, ISSN 0491-6441, pp. 3–6. (in Russian)
- [3] Akulov A.I., Rybachuk A.M. Uderzhaniye zhidkogo metalla svarochnoy vanny poperechnym magnitnym polem [Maintaining a liquid metal of the weld pool by a transverse magnetic field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1972, №2, ISSN 0491-6441, pp. 3–4. (in Russian)
- [4] Akulov A.I., Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Osobennosti formirovaniya shva pri svarke v poperechnom magnitnom pole [Features of formation of the welding seam in a transverse magnetic field]. Svarochnoe proizvodstvo [Welding fabrication], 1979, №7, ISSN 0491-6441, pp. 11–14. (in Russian)
- [5] Konovalov A.V., Kurkin A.S., Makarov E.L., Nerovny V.M., Yakushin B.F. Teoriya svarochnykh protsessov [Theory of welding processes]. M. Pub. "Izdatelstvo MGTU im. N.E. Baumana" [Bauman Moscow State Technical University Publishing House], 2007, ISBN 978-5-7038-3020-8, 752 p. (in Russian)
- [6] Kurkin A.S., Korolev A.S., Ponomarev P.A. Obosnovaniye isklyucheniya poslesvarochnoy termicheskoy obrabotki kol'tsevykh stykov magistral'nykh gazoprovodov s tolshchinoy stenki svyshe 30 mm iz stali k65 [Justification of elimination of post-weld heat treatment of welded circular butts in a gas pipelines made of X80 steel with wall thickness over 30 mm]. Nauka i obrazovaniye [Science and education], 2013, №5, eISSN 2587-9278, pp. 61–74. (in Russian)
- [7] Raychuk YU.I. Raspredeleniye toka po plastine pri dugovoy svarke [Current distribution over the plate during arc welding]. Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding]. 1967, №4, ISSN 0005-111X, pp. 19-22. (in Russian)
- [8] Rybachuk A.M., Chernyshov G.G. Raspredeleniye svarochnogo toka v izdelii i vanne pri dugovoy svarke [Welding current distribution in the product and the bath during arc welding]. Svarka i Diagnostika [Welding and Diagnostics], 2011, №6, ISSN 2071-5234, pp. 16-20. (in Russian)
- [9] Rybachuk A.M., Gu J., Krysko N.V. Deformatsiya dugi v kvadrupolnom magnitnom pole [The deformation of the arc in the quadrupole magnetic field]. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk [Actual problems of humanities and natural sciences], 2015, №8-1, ISSN 2073-0071, pp. 73–78. (in Russian)
- [10] Krysko N.V., Rybachuk A.M. Oblast, chuvstvitelnaya k vneshnim magnitnym polyam pri svarke v CO2 [Area sensitive to external magnetic fields when welding in CO2]. Svarka i diagnostika [Welding and diagnostics], 2013, №5, ISSN 2071-5234, pp. 36–40. (in Russian)
- [11] Krysko N.V., Rybachuk A.M. Osobennosti oblasti, chuvstvitelnoy k vneshnim magnitnym polyam pri svarke v argone i smesyakh [Features of a region sensitive to external magnetic fields during welding in argon and mixtures]. Svarka i diagnostika [Welding and diagnostics], 2014, №5, ISSN 2071-5234, pp. 54–56. (in Russian)
- [12] Nomura K., Ogino Y., Haga T., Hitara Y. Influence of magnet configuration on magnetic controlled TIG arc welding // Transactions of JWRI. 2010. Vol. 39, №2, ISSN 0387-4508, pp. 209-210. Available at: http://hdl.handle.net/11094/5373 (in English)
- [13] Gu J., Rybachuk A.M. Elektricheskoye pole v izdelii pri dugovoy svarke normalno-ellipticheskim istochnikom [The electric field in the work-piece in arc welding normally elliptical source]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2015, №4, ISSN 2305-414X, pp. 77–83. (in Russian)
- [14] Gu J., Krysko N.V., Rybachuk A.M. Analiz magnitnogo polya kvadrupolnoy magnitnoy sistemy

chislennym modelirovaniyem [Analysis of the magnetic field of a quadrupole magnetic system by numerical modeling]. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk [Actual problems of humanities and natural sciences], 2016, №11-1, ISSN 2073-0071, pp. 74–79. (in Russian)

[15] Rykalin N.N. Raschety teplovykh protsessov pri svarke [Calculations of thermal processes during welding]. M. MASHGIZ [MASHGIZ], 1951, 296 p. (in Russian)

External Magnetic Field Deformation in Arc Welding of Magnetic Metals Jieren Gu*, A.M. Rybachuk**

Bauman Moscow State Technical University,
Build 1, Vtoraja Baumanskaya St., 5, Moscow, Russia 105005

* ORCID: 0000-0001-6287-1379

Wos ResearcherID: S-4188-2017

e-mail: gujieren12345@163.com

** ORCID: 0000-0002-9078-2653

Wos ResearcherID: O-6229-2017

e-mail: amrybachuk@mail.ru

Abstract – The paper considers the method of forming joints in an external transverse magnetic field of a four-pole magnetic system in arc welding. The deformation of the magnetic field in the welding of ferromagnetic metals is investigated. The dependence of the axis displacement of the magnetic field on the current in the magnetic system coils is shown.

Keywords: arc welding, four-pole magnetic system, ferromagnetic metal, magnetic field.

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

УДК 621.384.039

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДАХ АЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА LMS Imagine.lab Amesim

© 2017 К.Н. Проскуряков*, А.И. Фёдоров**, М.В. Запорожец*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
** Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная электростанция»,
Нововоронеж, Воронежская обл., Россия

Разработана методика расчёта распространения волн давления жидкости в трубопроводах крупномасштабной экспериментальной теплогидравлической модели двухконтурной парогенерирующей установки типа ВВЭР-440. Показано, что компенсатор давления усиливает пульсации давления подобно резонатору Гельмгольца. Поскольку резонатор Гельмгольца, при определенных условиях является демпфером акустических колебаний заданной частоты, предложено в качестве эффективного средства предотвращения виброакустических резонансов на АЭС использовать акустический фильтр частот типа резонатора Гельмгольца.

Ключевые слова: LMS Imagine.Lab AMESim, волны давления, пульсации давления, схема Лакса-Вендроффа, уравнения Навье-Стокса.

Поступила в редакцию 08.12.2017

Для первого контура AЭC c BBЭP характерно большое число источников пульсации давления, обусловленных сложностью геометрии, а также наличием подключенных к контуру насосов и другого оборудования. Виброшумовая картина имеет сложный характер, обусловленный наличием перекрестных эффектов наложения волн давления теплоносителя, поэтому идентификация источников шума и выделение его составляющих из сигнала шумов давления в условиях эксплуатации первого контура затруднительна. Эффективным методом выявления отдельных составляющих спектра пульсаций давления является проведение экспериментов на действующем энергоблоке, в которых, путем изменения параметров или внесения детерминированных возмущений в теплоноситель, исследуются спектральные характеристики пульсации давления. Такими параметрами являются: давление, температура, расход, уровень воды в компенсаторе давления (КД). Для получения детального описания вибрационного состояния в условиях сложной геометрии необходима установка дополнительных датчиков пульсации давления (ДПД), в том числе в местах, недоступных для измерительной техники по условиям безопасной и эксплуатации действующего энергоблока. Исследование пульсаций надежной контура позволяет детально давления моделях первого виброакустическое состояние теплоносителя в различных режимах эксплуатации.

В 1980-х годах на ТЭЦ МЭИ была создана экспериментальная установка (ЭУ), не имеющая, на тот момент, аналогов в мире. Она моделировала работу двухконтурной парогенерирующей установки и позволяла изучать процесс выработки пара на двухконтурной АЭС с водным теплоносителем [1].

ЭУ состояла из системы трубопроводов, соединяющих топку, главный циркуляционный насос (ГЦН), задвижки, парогенератор (ПГ) и компенсатор объема (КО). Подогрев теплоносителя производился в топке котла, работающего на газе. Теплопередающие поверхности были выполнены в виде пакетов труб, расположенных

на топочных экранах котла.

Второй контур ЭУ имел участок перегрева пара. ГЦН ЭУ по параметрам и конструкции соответствовал ГЦН, установленным на АЭС с ВВЭР-440. Основной конструкционный материал оборудования — углеродистая аустенитная нержавеющая сталь. Поверхность теплообмена парогенератора, по конструкции близка к конструкции поверхности теплообмена парогенераторов Нововоронежской АЭС. Основное отличие заключалось в том, что цилиндрический корпус парогенератора ЭУ был поставлен вертикально.

Паровой КО выполнен в виде двух цилиндрических, вертикально поставленных сосудов, соединенных между собой трубками по воде и пару [2]. КО оснащен встроенными блоками электронагревателей, с помощью которых создавалась и постоянно поддерживалась паровая демпфирующая подушка. Уровень заполнения КО регулировался подпиточными насосами первого контура. В конце 1970-х годов переоборудование промышленного котла №3 ТЭЦ МЭИ под двухконтурную паропроизводящую установку, адекватно воспроизводящую теплогидравлические процессы в одной петле двухконтурной АЭС с реактором ВВЭР-440, предоставило уникальную возможность исследования виброакустических процессов протекающих в контуре теплоносителя и рабочего тела. Подобного масштаба установкой в то время не располагала ни одна страна. В рамках межвузовского сотрудничества между МЭИ и Высшей инженерной школой ЦИТТАУ в 1983/84 г.г. объединенная научная группа каф. АЭС под руководством К.Н. Проскурякова и проф. Высшей инженерной школы ЦИТТАУ А. Штурма впервые провела крупномасштабные виброакустические измерения и теоретический анализ результатов, полученных с использованием лучшей, на тот момент в мире, измерительной аппаратуры, предоставленной германской стороной. В дальнейшем Постановлением Правительства СССР кафедре АЭС была предоставлена аналогичная аппаратура. Это позволило завершить создание на кафедре АЭС МЭИ научной базы виброакустической диагностики АЭС [3], экспериментально подтвердить правомерность применения разработанных методов моделирования колебаний теплоносителя [4, 5] в контурах АЭС с ВВЭР, подтвердить опубликованные ранее результаты расчетно-теоретических оценок акустических характеристик [6]. К числу впервые полученных результатов относятся обнаружение эффекта усиления колебаний давления теплоносителя с определенными частотами в объеме компенсатора давления, приведенными в диссертационной работе аспиранта И. Кобана [7], выполненной под научным руководством К.Н. Проскурякова.

На рисунке 1 изображена пространственная схема ГЦТ (выносками показаны номера участков), а в таблице 1 приведены основные геометрические характеристики.

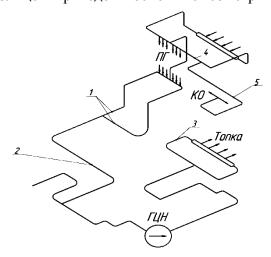


Рис. 1 – Пространственная схема ГЦТ [Main circulation pipeline dimensional diagram]

Название	Длина, м	Внутренний диаметр, м
Первый контур	-	-
ГЦК	179	0,187
- ПГ	24,5	0,135
- участок 1	8,4	0,101
- участок 2	55,65	0,177
- участок 3	6,4	0,101
- топка	77,3	0,222
- участок 4	6,75	0,101
- участок 5	12,1	0,101
КО	4,326	0,37

Таблица 1. — Основные геометрические данные первого контура котла №3 ТЭЦ МЭИ [Basic geometric data of the first circuit of No. 3 MPEI TPP boiler]

Номинальные параметры теплоносителя: давление 12 МПа, температура на выходе из топки котла -300 °C (подогрев 30 °C), расход -180 т/час.

Измерительная система состояла из соединенных экранированным кабелем пьезоэлектрических ДПД и акселерометров, предусилителей, коммутаторов, осциллографа и магнитографа. Основные технические характеристики ДПД приведены в таблице 2.

Таблица 2. — Основные технические характеристики ДПД [Main technical characteristics of pressure pulsation sensors]

	characteristics of pressure pursain	on sensors]	
No	Технические данные	Тип дат	гчика
110	технические данные	150p:	ЛХ -608
2	2	3	4
1	Рабочий диапазон давления	0,1÷15	3÷60
	(динамический), МПа		
2	Максимально допустимое давление,	17,5	60
	МПа		
3	Порог чувствительности, МПа	4.10-4	_
4	Коэффициент передачи	300 пКл/МПа	15 мВ/0,1МПа
5	Собственная частота, кГц	65	30
6	Сопротивление изоляции, Ом	1013	0,9.10-9
7	Емкость датчика, пФ	5	240
8	Измерение чувствительности в	±1	-35÷12
	рабочем диапазоне давления, %		
9	Измерение чувствительности датчика	-0,01	-0,2÷0,5
	при температуре (относительный		
	диапазон $+20$ °C $-+100$ °C), % (°C)		
10	Температурный диапазон, °С	-120÷300 (без охл.)	0÷3000 (прямое
			охл.)

На рисунке 2 представлена схема расположения датчиков пульсаций давления теплоносителя на ЭУ ТЭЦ МЭИ.

Эксперименты проводились в условиях промышленной эксплуатации. В ходе экспериментов регистрировались пульсации давления теплоносителя и виброускорения оборудования.

На рисунке 3 приведена амплитудно-частотная характеристика пульсаций давления в частотном диапазоне от нуля до 50 Гц в точке X03.

Из рисунка 3 видны выраженные пики на частотах 2,5 Γ ц, 9,5 Γ ц, 11,5 Γ ц, 12 Γ ц, 15,3 Γ ц, 17,3 Γ ц.

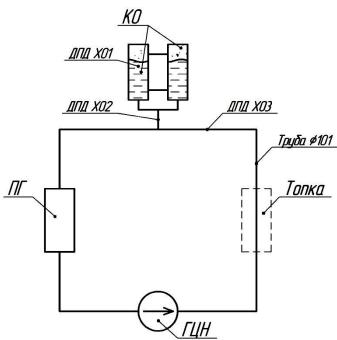


Рис. 2. – Схема расположения датчиков пульсации давления теплоносителя и виброускорения на ЭУ ТЭЦ МЭИ [Configuration of coolant pressure pulsation sensors and vibration acceleration at the MPEI TPP experimental installation]

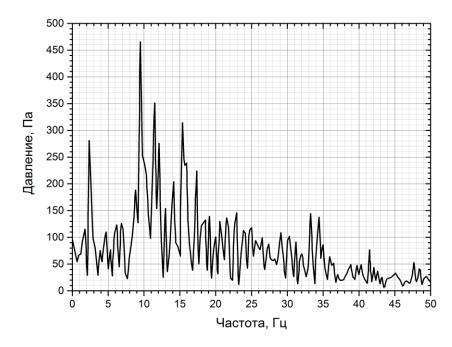


Рис. 3. – АЧХ пульсаций давления в точке X03 [Amplitude and frequency characteristic of pressure pulsations at the X03point]

С использованием результатов измерений пульсаций давления проведен динамический анализ системы. Для этого была построения имитационная модель, которая позволяла оценить её поведение при внесении возмущений, в том числе

изменяющихся во времени.

Имитационная модель описывается системой уравнений, для решения которых применяют нестационарные численные методы. Результатом расчета являются переменные во времени гидравлические параметры потока жидкости в различных расчетных точках системы, характеризующие её реакцию на внешнее возмущение.

Современными учеными и инженерами для исследования и разработки гидравлических систем и их динамического анализа применяются программные продукты, использование которых дает возможность выполнять сложные междисциплинарные расчеты, не требующие больших финансовых и временных затрат.

Для проведения имитационного моделирования наиболее используемыми являются пакеты LMS Imagine.Lab AMESim, Automation Studio, Modelica, MapleSim, SimulationX, MATLAB Simulink. Расчет моделей в данных системах производится с использованием численных методов решения дифференциальных уравнений.

В рамках исследования, в качестве среды для проведения динамического анализа выбран пакет LMS Imagine.Lab AMESim (далее AMESim), разработанный компанией Siemens. AMESim — комплексная платформа 1D междисциплинарного системного моделирования, предназначенная для построения, анализа разнородных систем и прогнозирования их междисциплинарных характеристик.

Для создания имитационной модели в AMESim пользователю доступен широкий набор библиотечных компонентов из различных физических областей: гидравлики, термодинамики, электрике, механике, обработки сигналов и т.д. Программное обеспечение позволяет создать модель, основанную на физических процессах, не требующую полного геометрического 3D представления.

Процесс моделирование в AMESim состоит из трех стадий: моделирование, симуляция и анализ. Стадия моделирования включает в себя:

- построение нодализационной схемы (эскиза модели);
- математическое описание процессов (назначение подмоделей компонентов);
- ввод исходных данных (назначение или ввод параметров компонентов).

На стадии симуляции производится расчет модели, а на стадии анализа – графическая интерпретация полученных результатов и их оптимизация.

Прежде чем поступить к созданию имитационной гидравлической модели необходимо определиться с типом модели гидравлической линии. Модель гидравлической линии должна быть способна описывать волны давления жидкости, учитывать её сжимаемость и гидравлическое трение потока о стенки трубы.

В пакет AMESim включено несколько типов гидравлических моделей, в частности:

- Compressibility and friction hydraulic (сжимаемость и гидравлическое трение);
- Hydraulic line with lumped element;
- Distributive hydraulic line with lumped element;
- Hydraulic line CFD 1D Lax-Wendroff.

Самой элементарной моделью из перечисленных выше, не требующей больших вычислительных затрат, является Compressibility and friction hydraulic. Данная модель используется исключительно для расчета статических потерь на трение и сжатие жидкости и не позволяет оценивать течение и моделировать волны давления, поэтому она не подходит для анализа распространения волн.

Другие две модели основаны на the Lumped Element Method (далее LEM): первая использует один единственный элемент LEM (Hydraulic line with lumped element), другая — «распределенный» LEM (Distributive hydraulic line with lumped element). Основное отличие данных моделей состоит в том, что Distributive hydraulic line with

lumped element делит трубопровод на несколько элементов, в то время как Hydraulic line with lumped element использует только один элемент на весь трубопровод. Каждый элемент моделируется по аналогии с электрическим контуром с подключенными сопротивлением, индуктивностью и емкостью. По данным [8] использование Distributive hydraulic line with lumped element дает более точный результат, по сравнению с Hydraulic line with lumped element ввиду наличия в модели большого количества элементов, однако, это увеличивает вычислительную нагрузку.

Модель Hydraulic line CFD 1D Lax-Wendroff (далее CFD) решает систему уравнений Навье-Стокса в одномерной постановке с использованием вычислительной схемы Лакса-Вендроффа второго порядка точности [9]. Данная модель, предложенная в 1960 г. Лаксом и Вендроффом, позволяет рассчитывать гидродинамические течения с ударными волнами [10] и дает прекрасный результат с минимальными вычислительными усилиями [11],

Модели LEM и модель CFD способны моделировать пульсации давления жидкости с учетом гидравлического трения. Стоит отметить, что в сложных системах с большим числом элементов и протяженными трубопроводами, использование моделей LEM и CFD приводит к увеличению времени вычислений [8].

По рекомендациям [8], для расчета распространения волн давления жидкости в трубопроводе (решения системы уравнений Навье-Стокса) выбрана схема Лакса-Вендроффа.

На рисунке 4 приведена нодализационная схема исследуемой системы, построенная в среде AMESim.

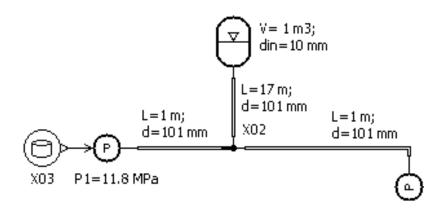


Рис. 4. – Нодализационная схема [Nondation scheme]

Нодализационная схема состоит из ключевых узлов и использует узловую топологию для достоверного моделирования сложной, взаимосвязанной, динамической системы. В схеме используются следующие компоненты: источник динамического давления, источник постоянного давления, трубопровод, гидравлический узел и КО.

Течение вязкой жидкости (сжимаемой и несжимаемой) описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных сохранения массы и импульса (уравнения Навье-Стокса) с учётом трения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} = 0$$
$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + P)}{\partial x} + h_{friction} = 0$$

где ρ – плотность;

t — время;

x — декартова координата;

u – скорость;

P – пьезометрическое давление;

 $h_{friction}$ — слагаемое, учитывающее воздействие силы трения на поток.

Решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса, согласно рекомендациям [8], производится с использованием схемы Лакса-Вендроффа, подробно описанной в [12]

В модели учитывается относительная шероховатость внутренней поверхности трубопровода:

$$rr = \frac{\Delta}{diam}$$

где Δ — средняя шероховатость внутренней поверхности трубопровода; diam — гидравлический диаметр трубы.

Предполагается, что в КО жидкость имеет такое же давление, что и пар (так как в эксперименте на ТЭЦ МЭИ давление в контуре обеспечивалось посредством КО). Паровой объем КО подчиняется политропному процессу:

$$P \cdot V^{\gamma} = const$$

где P – давление пара;

V – объем пара;

 γ — показатель политропы.

 P_0, V_0 — давление предварительного заряда КО, объем жидкости при предварительной зарядке;

 $P_{\it gas},\,V_{\it gas}$ – давление и объем газа;

 P_{out} – давление жидкости на выходе из КО;

 $\frac{dP_{out}}{dt}$ — изменение давления жидкости на выходе из КО.

Предполагается, что в период времени между предварительной зарядкой КО и в момент времени t=0 процесс адиабатный:

$$(P_0 + P_{atm}) \cdot V_0^{\gamma} = (P_{gas(0)} + P_{atm}) \cdot V_{gas(0)}^{\gamma}$$

КО будет полностью заряжен, когда давление газа в нем достигнет величины:

$$P_{\text{max}} = (P_0 + P_{atm}) \cdot (1000^{\gamma}) - P_{atm}$$

где P_{atm} – атмосферное давление (1.013 бар).

Условие полного заполнения КО:

$$P_{out} \ge P_{max}$$

Условие полной разрядки КО:

$$P_{out} \leq P_{gas}$$

Давление газа (Pgas), объем газа (Vgas), и производной от гидравлического давления ($\frac{dP_{out}}{dt}$) устанавливаются в соответствии с этим режимом.

Если КО полностью заряжен, то давление пара в КО находится при своем максимальном значении и минимальном объеме:

$$P_{gas} = P_{max}$$

$$V_{gas} = \frac{V_0}{1000}$$

Если КО полностью разряжен, то давление пара в КО находится при своем минимальном значении и максимальном объеме:

$$P_{gas} = P_0$$
$$V_{gas} = V_0$$

Если КО не полностью заряжен и не полностью разряжен, то давление пара равно давлению жидкости:

$$P_{gas} = P_{out}$$

Объем газа вычисляется с использованием закона политропы:

$$V_{gas} = V_0 \cdot \left(\frac{P_0}{P_{gas}}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

Предполагается, что сжимаемость жидкости незначительна по сравнению с сжимаемостью газа и, следовательно, производная по времени от давления жидкости совпадает с производной по времени от давления пара. Таким образом дифференцируя:

 $P \cdot V^{\gamma} = 0$

Получаем:
$$\frac{dP_{out}}{dt}=\gamma\cdot\left(\frac{P_{out}+P_{atm}}{V_{gas}}\right)\cdot q_{out}$$
 где $\frac{dV_{gas}}{dt}=-q_{out}$

Что эквивалентно объемной упругости:

$$\gamma \cdot \left(P_{out} + P_{atm}\right)$$

На рисунке 5 приведены AЧX пульсаций давления в соединительном трубопроводе в точке X02, полученные экспериментально [7] и расчетом.

Из рисунка 5 следует, что вид АЧХ из расчета и эксперимента имеет схожий характер. На частотах 9,5 Гц, 11,5 Гц, 12 Гц, 15,3 Гц, 17,3 Гц есть выраженные пики,

имеющиеся также на АЧХ сигнала, измеренного в точке X03 (рисунок 3). Пики на частотах 0.5-1.4 Γ ц, а также 2.5 Γ ц обусловлены наличием KO в гидравлической системе первого контура (рисунки 3 и 5).

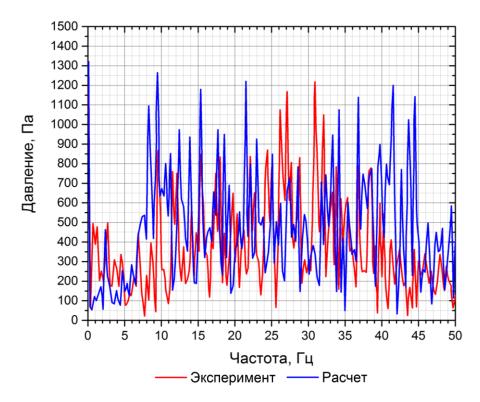


Рис. 5. – АЧХ пульсаций давления в соединительном трубопроводе (точка X02) [Amplitude and frequency characteristic of pressure pulsations in the connecting pipeline (point X02)]

Стоит отметить, что широкополосный характер пиков, вызванных собственными колебаниями теплоносителя, обусловлен тем, что возникновение пульсации давления в определенных источниках является случайным процессом, а избирательные свойства реальной гидравлической системы, состоящие в усилении возмущений на частотах, близких к собственным частотам, проявляются как частотная характеристика реального фильтра. Это приведет к тому, что пики в спектре пульсации давления, вызванные наличием стоячих волн, часто не имеют однозначного максимума, а их небольшое значение выражается в виде размытого набора пиков или ограниченного плато.

Различия вида автоспектров сигналов ДПД X02 и X03 объясняется возможностью расположения соответствующего датчика в месте пучности или узла волны. Кроме того, соединительный трубопровод КО является разветвлением от ГЦК, в котором, в соответствии с геометрией, граничными условиями и скоростью звука могут возникать стоячие волны на своих собственных частотах.

На рисунке 6 приведена временная реализация пульсаций давления в КО (точка X01), а на рисунке 7 – их АЧХ.

Из рисунков 6 и 7 видно, что, в отличие от результатов измерений в точках X03 и X02 (рисунки 3 и 5 соответственно), для КО характерны выраженные низкочастотные колебания (выраженные пики на частотах 1 Гц, 1,5 Гц, 2,3 Гц), тогда как в остальных сигналах преобладают высокочастотные составляющие. Отсутствие тех составляющих, которые в точках X02 и X03 определяют спектры, объясняется наличием в КО паровой демпфирующей подушки, существенно повышающей сжимаемость среды в сосуде. Таким образом, проводимость в выходном узле соединительного трубопровода высока, что, фактически, характеризует неоднородность типа конца трубопровода,

подключенного к большому резервуару, для которой объемный расход — большой, а избыточное давление — маленькое (узел стоячих волн). Стоит отметить, что максимальная величина амплитуды пульсации давления в КО на частоте 1 Гц почти в два раза превышает максимальную величину амплитуды пульсаций давления теплоносителя до КО (в точке X03) на частоте 9,5 Гц. Из чего следует вывод, что КО усиливает пульсации давления подобно резонатору Гельмгольца.

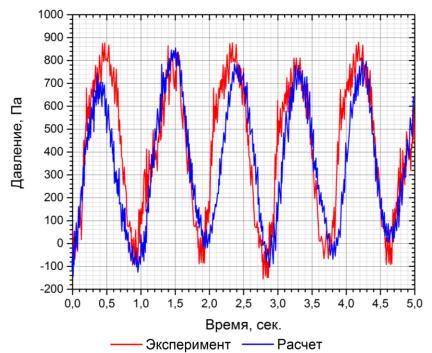


Рис. 6. – Временная реализация пульсаций давления в КО (точка X01) [Temporal realization of pressure pulsations in the volume compensator (point X01)]

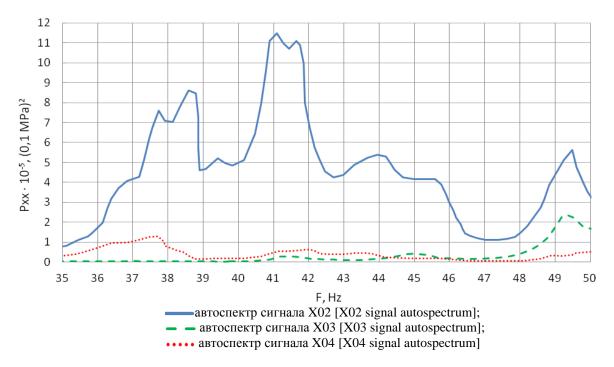


Рис. 7. – Автоспектры пульсации давления теплоносителя сигналов X02, X03 и X04 при давлении 11,8 МПа и температуре 260 °C [Autospectrums of coolant pulsation pressure of signals X02, X03 and X04 at 11,8 MPa pressure and 260 ° C]

Из рисунка 7 видно, что в диапазоне частот 35,0-47,5 Гц наблюдается усиление сигнала X02, точка измерения которого расположена в трубопроводе, соединяющем КО и контур. При перемещении среды, заполняющей соединительный трубопровод, в одну и в другую стороны среда в КО испытывает сжатия и разрежения, а давление в ней изменяется. Разность давлений на концах соединительного трубопровода ускоряет массу среды. При этом скорость движения среды в соединительном трубопроводе больше, чем в КО, кинетическая энергия сосредоточена в соединительном трубопроводе, а упругая энергия – в среде внутри сосуда. Таким образом, кинетическая и потенциальная энергии локализуются в разных частях системы « К – соединительный трубопровод»: в среде в соединительном трубопроводе и в среде в КО. В соединительном трубопроводе происходит диссипация энергии, что обусловливает усиление автоспектра сигнала в точке X02 в диапазоне частот 35,0-47,5 Гц.

При проектировании резонатора важно учитывать воздействие вихревого течения в его тракте. Для чего целесообразным является применение методик конечно-элементного моделирования, с использованием которых проводится расчетное обоснование схемы гасителя и оптимальных значений его акустических характеристик. Подобный метод применяет компания Areva, в публикации [14] отмечается, что при оценке и прогнозировании ресурса необходимо учитывать гидродинамическое и акустические параметры потока теплоносителя, а также текущее состояние контактов оборудования с его внутрикорпусными устройствами и со строительными конструкциями. Недостатком данного подхода является привязанность результатов к текущему состоянию, затрудняющего прогнозирование ресурса, сложность и затратность проведения оценочных расчётов.

В отличие от указанного подхода авторами предложен альтернативный вариант обеспечения несущей способности конструкции оборудования ядерной установки, предусматривающий предотвращение условий возникновения максимально возможных динамических нагрузок, вызванных виброакустическим резонансом. Поскольку резонатор Гельмгольца, при определенных условиях является демпфером акустических колебаний заданной частоты, в качестве наиболее эффективного средства предотвращения виброакустических резонансов предлагается использование акустического фильтра частот типа резонатора Гельмгольца. Данное устройство будет обеспечивать подавление акустических колебаний теплоносителя [15] совпадающими с частотами вибраций оборудования, вынужденными колебаниями давления, вызванными работой ГЦН или внешними ударными и сейсмическими воздействиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности контроля состояния теплоносителя по частоте его собственных колебаний./ Рассохин Н.Г., Проскуряков К.Н., Мухин В.С., Кайль И.И.// Двухфазные потоки. Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1988.
- 2. *Воронова, В.П.* Парогенератор МЭИ. Пособие по производственному обучению на ТЭЦ МЭИ для студентов специальностей 0310 и 0649 [Текст] / В.П. Воронова. М., 1975.
- 3. Создание научной базы акустической диагностики теплогидравлических процессов в оборудовании АЭС [Текст] / К.Н. Проскуряков, А.К. Устинов // Вестник МЭИ. 1996. №3. С. 51–61.
- 4. Теоретическое определение частот собственных колебаний теплоносителя в первом контуре АЭС / К. Н. Проскуряков, студенты: С. П. Стоянов, Г. Нидцбалла, А. В. Грязев и др.// Тр. МЭИ. 1979. Вып. 407. С. 87 92.
- 5. *Проскуряков К.Н.* Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ.-М.:МЭИ, 1984, 67 с.
- 6. Proskuryakov K.N. Early Boiling Detection Method OF Pre-or Post-Accident Situation on WWER and RBMK, SMORN VII, Avignon, France, 19-23 June 1995. Vol. 1, pp. 426–424.
- 7. Кобан, И. Разработка алгоритма моделирования и экспериментальная оценка собственных

- колебаний теплоносителя контура ВВЭР в эксплуатационных режимах [Текст] / И. Кобан: автореф. ... канд. тех. наук. M., 1985. 20 с.
- 8. *Rapp, J.; Turesson, J.* Hydrostatic Transmission in Wind Turbines Development of Test Platform. Dissertation (Master Thesis in Fluid Power). Department of Manegement and Engineering, Division of Fluid Power and Mechatronic Systems, Linköping University, Linköping, 2015.
- 9. LMS Imagine, Contents of the hydraulic lines library: Hlg0020d-hydraulic line cfd 1d lax-wendroff (c-ir-***-c-ir), 2013.
- 10. Lax P.D., Wendroff B. A960. Systems of Conservation Laws. Comms. Pure and Appl. Math., V. 13, pp. 217–237.
- 11. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т. Т. 1 пер. с англ. М.: Мир, 1990. 384 с., ил.
- 12. Winterborne D.E. Theory of engine manifold design: wave action methods for IC engines, Professional Engineering Publishing, 2000.
- 13. *Lari Kela*. Attenuating amplitude of pulsating pressure in a low-pressure hydraulic system by an adaptive Helmholtz resonator. Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, University of Oulu, P.O. Box 4200, FI-90014 University of Oulu, Finland. Acta Univ. Oul., 2010. p. 354.
- 14. *ANP-10306NP*. Comprehensive vibration assessment program for U.S. EPR reactor internals. Technical report. 2013.
- 15. *Проскуряков К.Н.1, Федоров А.И., Запорожец М.В.* Прогнозирование условий возникновения в первых контурах АЭС с ВВЭР виброакустических резонансов с внешними периодическими нагрузками. Теплоэнергетика, 2015, № 8, С. 1–7.

REFERENCES

- [1] Teoreticheskoye i eksperimental'noye obosnovaniye vozmozhnosti kontrolya sostoyaniya teplonositelya po chastote yego sobstvennykh kolebaniy. / Rassokhin N.G., Proskuryakov K.N., Mukhin V.S., Kayl' I.I. // Dvukhfaznyye potoki. L.: Nauka, Leningradskoye otdeleniye, 1988.
- [2] *Voronova V.P.* Parogenerator MEhI. Posobie po proizvodstvennomu obucheniju na TEhC MEhI dlja studentov special'nostejj 0310 i 0649 [Steam Generator MPEI. Manual on Production Training at TPP MPEI for Students of Specialties 0310 and 0649]. M. 1975. (in Russian)
- [3] *Proskurjakov K.H.*, *Ustinov A.K.* Sozdanie nauchnojj bazy akusticheskojj diagnostiki teplogidravlicheskikh processov v oborudovanii AEh [Creation of a Scientific Basis for Acoustic Diagnostics of Thermal Hydraulic Processes in NPP Equipment]. Vestnik MEhI [Bulletin of MPEI], 1996, №3, pp. 51–61. (in Russian)
- [4] Teoreticheskoye opredeleniye chastot sobstvennykh kolebaniy teplonositelya v pervom konture AES / K. N. Proskuryakov, studenty: S. P. Stoyanov, G. Nidtsballa, A. V. Gryazev i dr.// Tr. MEI. 1979. Vyp. 407. S. 87 92.
- [5] *Proskuryakov K.N.* Teplogidravlicheskoye vozbuzhdeniye kolebaniy teplonositelya vo vnutrikorpusnykh ustroystvakh YAEU.-M.:MEI, 1984, 67 s.
- [6] Proskuryakov K.N. Early Boiling Detection Method OF Pre-or Post-Accident Situation on WWER and RBMK, SMORN VII, Avignon, France, 19-23 June 1995. Vol. 1, pp. 426–424. (in English)
- [7] Koban I. Razrabotka algoritma modelirovanija i ehksperimentalnaja ocenka sobstvennykh kolebanijj teplonositelja kontura VVEhR v ehkspluatacionnykh rezhimakh [Development of Modeling Algorithm and Experimental Estimation of the Natural Oscillations of the WWER Circuit Coolant in Operating Conditions]. Avtoreferat na soiskanie uchenojj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Thesis abstract of PhD in Engineering]. M. 1985. 20 p. (in Russian)
- [8] Rapp, J.; Turesson, J. Hydrostatic Transmission in Wind Turbines Development of Test Platform. Dissertation (Master Thesis in Fluid Power). Department of Manegement and Engineering, Division of Fluid Power and Mechatronic Systems, Linköping University, Linköping, 2015. (in English)
- [9] LMS Imagine, Contents of the hydraulic lines library: Hlg0020d-hydraulic line cfd 1d lax-wendroff (c-ir-***-c-ir), 2013. (in English)
- [10] Lax P.D., Wendroff B. A960. Systems of Conservation Laws.— Comms. Pure and Appl. Math., V. 13, pp. 217–237. (in English)
- [11] Vychislitelnaja gidromekhanika i teploobmen [Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer]. In 2 vol. Vol. 1. M.:Pub. Mir, 1990, 384 p. (in Russian)
- [12] Winterborne D.E. Theory of engine manifold design: wave action methods for IC engines, Professional Engineering Publishing, 2000. (in English)
- [13] Lari Kela. Attenuating amplitude of pulsating pressure in a low-pressure hydraulic system by an adaptive Helmholtz resonator. Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering,

- University of Oulu, P.O. Box 4200, FI-90014 University of Oulu, Finland. Acta Univ. Oul., 2010. p. 354. (in English)
- [14] ANP-10306NP. Comprehensive vibration assessment program for U.S. EPR reactor internals. Technical report. 2013. (in English)
- [15] *Proskuriakov K. N., Fedorov A. I., Zaporozhets M. V.*, Predicting the Conditions under Which Vibration-acoustic Resonances with External Periodic Loads Occur in the Primary Coolant Circuits of WWER Based NPPs, Thermal Engineering Vol. 62, No.8, pp. 553–559 (2015). (in English)

Application of LMS Imagine.Lab Amesim Package for Simulation the Propagation of Pressure Waves Liquid in Pipeline

K.N. Proskuryakov*, A.I. Fedorov**, M.V. Zaporozhets*

* National Research University «MPEI», Krasnokazarmennaya St., 14, Moscow, Russia, 111250 ¹ e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru ORCID: 0000-0002-1884-5576 WoS ResearcherID: I-3583-2017 ³ ORCID: 0000-0002-8017-5200 WoS ResearcherID: K-3710-2017

** Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of «Rosenergoatom Concern» JSC Yuzhnaya St., 1, Plant zone, Novovoronezh, Voronezh region, Russia, 396072 ² ORCID: 0000-0002-5661-9502 WoS ResearcherID: K-3752-2017

Abstract – The paper considers the development of a technique for calculating the propagation of liquid pressure waves in pipelines for a large-scale experimental thermohydraulic model of a VVER-440 double-circuit steam generating plant. It is shown that the pressure compensator amplifies the pressure pulsations, as a Helmholtz resonator. As the Helmholtz resonator under certain conditions is a damper for acoustic oscillations of a given frequency, it is proposed to use an acoustic frequency filter of the Helmholtz resonator as an effective means of preventing vibroacoustic resonances at the NPP.A technique for calculating the propagation of pressure waves in the pipelines of the experimental stand of the MPEI TPP is developed. It is shown that the volume compensator can amplify the acting oscillations.

Keywords: LMS Imagine.Lab AMESim, pressure waves, pressure pulsations, Lax-Vendroff scheme, Navier-Stokes equations.

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

УДК 621.039.53

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ПРОЧНОСТЬ РЕАКТОРНОЙ Cr – Ni – Mo – V СТАЛИ

© 2017 Н.Н. Подрезов, И.С. Подрезова

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

В работе рассмотрены вопросы влияния структурной наследственности на комплекс механических свойств обечаек зоны патрубков из реакторной стали в процессе изготовления корпуса водо-водяного реактора. Показано, что проявления структурной наследственности оказывают негативное воздействие при наличии в обечайках первичного аустенитного зерна балла № 3согласно ГОСТ 5639.

Ключевые слова: структурная наследственность, обечайка зоны патрубков, прочность, механические свойства, микроструктура, закалка с отпуском.

Поступила в редакцию: 07.12.2017.

В настоящее время для изготовления корпусов водо-водяных реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ применяется сталь 15Х2НМФА (15Х2НМФА-А, 15Х2НМФА класс 1), обладающая ярко выраженной структурной наследственностью [1]. В ряде случаев полиморфное превращение $\alpha \to \gamma$ в стали не сопровождается перекристаллизацией, что означает сохранение размера зерна стали после такой термообработки [2]. В этом и заключается эффект проявления структурной наследственности. В случае сохранения мелкого зерна — наследственность мелкозернистая, крупного — крупнозернистая.

Сталь 15X2HMФА — теплоустойчивая, легированная, бейнитного класса. Для таких сталей основным способом достижения необходимого комплекса эксплуатационных механических свойств является перекристаллизация с измельчением аустенитного зерна [3]. Отсюда понятно, что если исходная структура поковок является мелкозернистой, то эффект наследования «протащит» высокий уровень механических свойств через термообработки на различных стадиях изготовления обечаек (сварка, штамповка и т.п.), так как наследоваться будет мелкое зерно. Известно [4], например, о положительном опыте использования явления структурной наследственности в низкоуглеродистых мартенситных трубных сталях типа 12X2Г2НМФТ.

К сожалению, несмотря на всю мощь современной металлургии, реакторные стали в крупнотоннажных слитках массой более 150 тонн имеют крупнозернистую основу, а, стало быть, и наследственность. Интенсивный рост аустенитного зерна наблюдается при ковке крупных полуфабрикатов с критической степенью деформации при высокой температуре. Процесс идёт за большое число печных выносов, некоторые части поковки могут подвергаться высокотемпературному нагреву без последующей пластической обработки, что также приводит к значительному увеличению размера зерен и ярко выраженной разнозернистости [5]. По данным ОАО «Ижорские заводы»,

размер зерна в крупногабаритных обечайках из стали марки 15Х2НМФА кл.1 после предварительной термической обработки колеблется от 5-го до минус 3-го балла [6].

Крупнозернистая наследственность может проявляться весьма неожиданно в заводских условиях и приводить к парадоксальным, на первый взгляд, результатам [7]. В качестве иллюстрации ниже приведены результаты исследования причин заниженных значений предела прочности $\sigma_{\rm B}$ и текучести $\sigma_{\rm 0,2}$ основного металла двух обечаек патрубковой зоны реактора ВВЭР-1000 (рисунок 1) при температуре испытаний +350 °C (таблица 1).

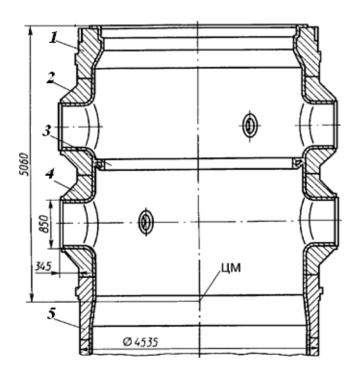


Рис. 1. – Зона патрубков ВВЭР-1000
1 – фланец; 2 – обечайка верхняя зоны патрубков; 3 – кольцо разделительное; 4 – обечайка нижняя зоны патрубков; 5 – обечайка опорная
[The area of WWER-1000 nozzles
1 - flange; 2 - shell of nozzle upper zone; 3 - separating ring;
4 - shell of nozzle lower zone; 5 - support shell]

Механические свойства обечаек до выштамповки патрубков соответствовали требованиям ТУ согласно сертификатным данным. Обечайки после выштамповки патрубков с многократным нагревом до температуры 1100...1150 °C отжигались для снятия напряжений при 600...700 °C в течение 30 часов. Далее для обеспечения необходимого запаса прочностных свойств обечайки прошли основную термическую обработку по режиму А (двойная закалка с отпусками, таблица 1) и дополнительные технологические отпуски, после чего проводили испытания.

По результатам штатных испытаний было установлено, что все показатели комплекса механических свойств (прочность, пластичность, ударная вязкость и температура хрупко-вязкого перехода $T\kappa_0$) при +20 и +350 °C удовлетворяют требованиям ТУ 0893-013-00212179-2003 [8], кроме указанных курсивом $\sigma_{\rm B}$ и $\sigma_{\rm 0,2}$ в таблице 1. Для повышения прочностных характеристик была проведена повторная двойная закалка по режиму A с дополнительными отпусками, которые не дала положительного результата.

По этой причине макро- и микроструктурные исследования проводили

непосредственно на образцах, отобранных с наружной и внутренней стороны каждой из обечаек по штатной технологии (отбором трепанов).

Изучение макроструктуры всех обечаек на микроскопе МБС-9 при увеличении до $^{x}40$ показало, что она одинакова и характеризуется слабой степенью загрязнения неметаллическими включениями. Размер зёрен изменялся по сечению обечайки, постепенно увеличиваясь от внутренней к наружной поверхности.

Результаты микроструктурных исследований на половинках разрывных образцов с удовлетворительными и неудовлетворительными значениями $\sigma_{\rm B}$ при +350 °C приведены на рисунке 2.

Образцы с низким значением $\sigma_{\text{B+350}}$ (рисунок 2a, г) после первой двойной закалки имеют структуру грубоигольчатого бейнита, балл зерна №3, ГОСТ 5639 [9]. На образцах с высоким значением $\sigma_{\text{B+350}}$ (рисунок 2б) выявлена структура верхнего мелкозернистого бейнита, балл зерна № 6. После повторной двойной закалки по режиму A и дополнительных технологических отпусков структура образцов с низкими значениями $\sigma_{\text{B+350}}$ (рисунок 2 в) не претерпевает никаких изменений, а исходный размер зерна сохраняется.

Таблица 1. — Механические свойства обечаек зоны патрубков корпуса реактора [Mechanical properties of the shells of the reactor vessel nozzles]*

No	Dayana manya afinafamen	Температура исп	ытаний +350 °C
л <u>ч</u>	Режим термообработки после выштамповки патрубков	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа
обечайки		(не ниже 540)	(не ниже 440)
1	A + дополнительные	598	520
	технологические отпуски	510	402
I	повторно A + дополнительные технологические отпуски	520 539	397 451
2	A + дополнительные	530	456
	технологические отпуски	539	451
2	повторно A + дополнительные технологические отпуски	530 579	445 520

^{*} Примечания

Таким образом, повысить прочность реакторной стали при +350 °C в зоне патрубков не удалось даже после четырёх закалок — налицо проявление крупнозернистой структурной наследственности. Крупное зерно сформировалось в процессе выштамповки патрубков при многочисленных нагревах под штамповку до температуры 1100...1150 °C. Высокая стабильность переохлажденного аустенита сталей этого класса создает предпосылки для сохранения в них отрицательного влияния крупнозернистости, обусловленной предшествующими высокотемпературными циклами ковки, штамповки, электрошлаковой и других методов сварки [10, 11]. Следовательно очень велико значение предварительной термической обработки

Cr-Ni-Mo-V стали, применяемой для формирования мелкозернистой гомогенной структуры, ещё на стадии получения поковок из крупнотоннажных слитков.

¹⁻ ${
m A}$ - закалка (950 \pm 10 ${
m ^{0}C}$; 10 час), охлаждение в воду + отпуск (650 \pm 10 ${
m ^{0}C}$; 3,5 час) +

⁺ закалка (920 \pm 10 °C; 10 час), охлаждение в воду + отпуск (650 \pm 10 °C; 30 час);

²⁻ курсивом показаны неудовлетворительные свойства

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 1) В Cr Ni Mo V сталях проявление структурной наследственности связано с высокой стабилизацией матричного аустенита и образованием кристаллографически упорядоченных структур по бездифузионному механизму (мартенсит, бейнит) на стадии охлаждения аустенитной фазы и её последующего восстановления при нагреве выше Ac_3 [12, 13].
- 2) Разработка режимов ковки, штамповки и предварительной термической обработки с целью получения мелкого зерна (не ниже балла №6 для крупных поковок) является едва ли не первостепенной задачей на фоне создания в последние годы чистых, т.е. практически беспримесных корпусных сталей.
- 3) Для подавления крупнозернистой наследственности, приводящей в заводских условиях к неудовлетворительным механическим свойствам по прочности или Тко, необходимо применять нетрадиционные подходы [14, 15] по выбору режимов термической или термомеханической обработки.

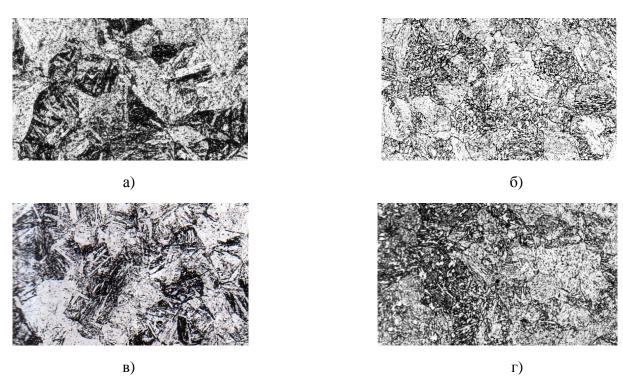


Рис. 2. — Микроструктура металла зоны патрубков, сталь 15Х2НМФА, x 100: а - $\sigma_{\text{в+350}} = 530$ МПа, режим A + дополнительные отпуски, обечайка №1; б - $\sigma_{\text{в+350}} = 598$ МПа, режим A + дополнительные отпуски, обечайка №1; в - $\sigma_{\text{в+350}} = 520$ МПа, повторно режим A + дополнительные отпуски, обечайка № 1; г - $\sigma_{\text{в+350}} = 530$ МПа, режим A + дополнительные отпуски, обечайка №2 [Metal microstructure of the nozzle zone, steel 15Х2НМФА, x100:а - σ в + 350 = 530 MPa, mode A + additional drawbacks, shell №1;b - σ в + 350 = 598 MPa, mode A + additional drawbacks, shell №1;c - σ в + 350 = 520 МПа, again mode A + additional drawbacks, shell №1;c - σ в + 350 = 530 MPa, mode A + additional drawbacks, shell №2]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Чернобаева*, *А.А.* Исследование влияния температурно-временных параметров термической обработки на структурную наследственность стали 15Х2НМФА [Текст] / А.А. Чернобаева : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 22 с.
- 2. *Марков, С.И. и др.* Влияние размера аустенитного зерна на механические свойства стали 15Х2НМФА [Текст] / С.И. Марков, Г.С. Карк, А.А. Чернобаева // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий.

- Запорожье: ЗМИ им. В.Я. Чубаря, 1986. С. 106.
- 3. Бернштейн М.Л. Прочность стали [Текст]/М.Л. Бернштейн. М.: Металлургия, 1974. 200 с.
- Исай С.С. и др. Структурная наследственность в низкоуглеродистых мартенситных сталях / С.С. Югай, Л.М. Клейнер, А.А. Шацов, Н.Н. Митрохович // МиТОМ. – 2004. – № 12. – С. 24– 29.
- 5. *Дурынин, В.А., и др.* Исследование качества крупногабаритной обечайки из 360-т слитка стали 15Х2НМФА для атомного реактора [Текст] / В.А. Дурынин, Т.И. Титова, Г.П. Матвеев, С.Ю. Баландин // Электрометаллургия. 2003. №9. С. 45–48.
- 6. *Филимонов, Г.Н. и др.* Технологические аспекты, обеспечивающие создание корпусных материалов для водо-водяных реакторов повышенной безопасности и ресурса [Электронный ресурс] / Г.Н. Филимонов, В.В. Цуканов, И.И. Грекова, И.И. Теплухина, В.В. Дюков, Т.И. Титова, Н.А. Шульган, И.И. Храпов // База данных Refdb: сетевой журн. 2012. Режим доступа: URL: https://refdb.ru/look/1978467.html 10.11.2017.
- 7. Dang, S.-E., He, Y., Liu, Y., Su, Z.-N. Structural heredity of 30Cr2Ni4MoV steel. Cailiao Rechuli Xuebao. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, №35. pp. 61–65.
- 8. Технические условия ТУ 0893-013-00212179-2003.Заготовки из стали марок15X2HMФA, 15X2HMФA-A, 15X2HMФA класс 1 для корпусов, крышек и других узлов реакторных установок [Текст]. М., 2003. С. 26.
- 9. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна [Текст]. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. С. 16.
- 10. *Марков, С.И.* Металловедческие основы производства заготовок для высоконадежных элементов энергетических и трубопроводных систем [Текст] / С.И. Марков : автореф. дис..... д-ра техн. наук. М., 2012. С. 83.
- 11. *Подрезов Н.Н.* Разработка технологических основ чистых корпусных сталей [Текст] / Н.Н.Подрезов: автореф. дис.... канд. техн. наук. М., 2017. С.160
- 12. *Садовский, В.Д.* Структурная наследственность в стали [Текст] / В.Д. Садовский. М.: Металлургия, 1973. 205 с.
- 13. *Умова, В.М. и др.* Влияние структурной наследственности на рост зерна аустенита при нагреве стали [Текст] / В.М. Умова, В.Д. Садовский // Физика металлов и металловедение. − 1979. − Том 47(4). − С. 802−808.
- 14. *Счастливцев, В.М. и др.* Исправление структуры и изломов перегретой конструкционной стали [Текст] / В.М. Счастливцев, А.Б. Кутьин, М.А. Смирнов. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 190 с.
- 15. Chen J.R., Gu K.F., Han L.Z. et al. Novel process to refine grain size of NiCrMoV steel. Materials Science and Technology. Issue 7: Simulation of alloy structure and properties, 2012, Volume 28, pp. 773–777.

REFERENCES

- [1] Chernobaeva A.A. Issledovanie vlijanija temperaturno-vremennykh parametrov termicheskojj obrabotki na strukturnuju nasledstvennost stali 15Kh2NMFA [Investigation of the effect of temperature-time parameters of heat treatment on structural heredity of steel 15X2HMΦA] Avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Author's abstract. dis. ... cand. tech. Sciences]. M. 1989, 22 p. (in Russian)
- [2] Markov S.I., Kark G.S., Chernobaeva A.A. Vlijanie razmera austenitnogo zerna na mekhanicheskie svojjstva stali 15Kh2NMFA [Influence of the size of austenitic grain on the mechanical properties of 15X2HMΦA steel]. [New structural steels and alloys and methods for their processing to improve the reliability and durability of products]. Zaporozhye: ZMI im. V.Ja. Chubarja [ZMI of them. V.Ya. Chubarya], 1986, p. 106. (in Russian)
- [3] Bernshtejn M.L. Prochnost' stali [The strength of steel]. M. Pub. Metallurgiya, 1974, 200 p. (in Russian)
- [4] Iugai S.S., Kleiner L.M., Shatsov A.A., Mitrokhovich N.N. Strukturnaia nasledstvennost' v izkouglerodistykh martensitnykh staliakh [Structural heredity in the low-carbon martensitic steels]. Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov, 2004, №12, pp. 24–29. (in Russian)
- [5] Durinin V.A., Titova T.I., Matveev G.P., Balandin S.Yu. Issledovanie kachestva krupnogabaritnojj obechajjki iz 360-t slitka stali 15Kh2NMFA dlja atomnogo reaktora [Study of the quality of a large-sized shell of 360-ton of ingot 15X2HMΦA for an atomic reactor]. Ehlektrometallurgija [Electrometallurgy], 2003, №9, pp. 45–48. (in Russian)
- [6] Filimonov, G.N. Tsukanov V.V., Grekova I.I., Teplukhina I.I., Dyukov V.V., Titova T.I., Shulgan N.A., Snoring I.I. Tekhnologicheskie aspekty, obespechivajushhie sozdanie korpusnykh materialov

- dlja vodo-vodjanykh reaktorov povyshennojj bezopasnosti i resursa [Technological aspects that provide the creation of hull materials for water-cooled reactors of increased safety and resource]. Database Refdb: network log, 2012. Available at: https://refdb.ru/look/1978467.html (in Russian)
- [7] Dang, S.-E., He, Y., Liu, Y., Su, Z.-N. Structural heredity of 30Cr2Ni4MoV steel. Cailiao Rechuli Xuebao. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, №35. pp. 61–65. (in English)
- [8] Tekhnicheskie uslovija TU 0893-013-00212179-2003.Zagotovki iz stali marok15Kh2NMFA, 15Kh2NMFA-A, 15Kh2NMFA klass 1 dlja korpusov, kryshek i drugikh uzlov reaktornykh ustanovok [Technical specifications TU 0893-013-00212179-2003. Blanks from steel grade 15Χ2HMΦA, 15Χ2HMΦA-A, 15Χ2HMΦA class 1 for cases, covers and other units of reactor installations]. M. 2003, 26 p. (in Russian)
- [9] GOST 5639-82. Stali i splavy. Metody vyjavlenija i opredelenija velichiny zerna [GOST 5639-82. Steels and alloys. Methods for the detection and determination of grain size]. M. Pub. IPK Izdatelstvo standartov [IPK Publishing house of standards], 2000. p. 16. (in Russian)
- [10] Markov S.I. Metallovedcheskie osnovy proizvodstva zagotovok dlja vysokonadezhnykh ehlementov ehnergeticheskikh i truboprovodnykh sistem [Metal science bases of production of blanks for highly reliable elements of power and pipeline systems]. M. 2012, p. 83. (in Russian)
- [11] Podrezov N.N. Razrabotka tekhnologicheskih osnov chistyh korpusnyh stalej [Development of technological fundamentals of pure hull steels]. M. 2017, p. 160 (in Russian)
- [12] Sadovsky V.D. Strukturnaja nasledstvennost v stali [Structural heredity in steel]. M. Pub. Metallurgy, 1973, 205 p. (in Russian)
- [13] Umov V.M., Sadovskii V.D. The effect of structural heredity in grain growth of austenite during heating of steel. Physics of metals and metallography, 1979, Volume 47(4), pp. 802–808 (in Russian)
- [14] Schastlivcev V.M., Kutin A.B., Smirnov M.A. Ispravlenie struktury i izlomov peregretoj konstrukcionnoj stali [The correction of the structure and fractures of the superheated structural steel]. Ekaterinburg. Pub. Ural branch RAS, 2003, 190 p. (in Russian)
- [15] Chen J.R., Gu, K.F., Han L.Z. et al. Novel process to refine grain size of NiCrMoV steel. Materials Science and Technology. Issue 7: Simulation of alloy structure and properties, 2012, Volume 28, pp. 773–777 (in English)

Influence of Structural Heredity on Strength of the Reactor Cr-Ni-Mo-V Steel

N.N. Podrezov*, I.S. Podrezova**

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

> e-mail: VITIkafMPM@mephi.ru * ORCID: 0000-0002-0314-2413 WoS ResearcherID: G-3892-2017; ** ORCID: 0000-0003-4480-0707 WoS ResearcherID: V-2309-2017

Abstract – The paper considers the influence of structural heredity on the complex of mechanical properties of shells in the zone of branch pipes from reactor steel in the process of manufacturing the hull of a water-cooled reactor. It is shown that the manifestations of structural heredity have a negative effect in the presence in the shells of primary austenitic grains score No. 3 according to GOST 5639.

Keywords: the structural heredity, the shell of the nozzle zone, strength, mechanical properties, microstructure, hardening with tempering.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.55

К ВОПРОСУ О ЗАПАЗДЫВАЮЩИХ НЕЙТРОНАХ В РЕАКТОРАХ С УРАНОВЫМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

© 2017 П.А. Пономаренко, С.С. Безотосный, М.А. Фролова, В.А. Морозова

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

Статья посвящена теоретической оценке физической доли запаздывающих нейтронов в активной зоне реактора на тепловых нейтронах, тепловыделяющие элементы которого содержат только урановое топливо, до начала физического пуска.

Одной из самых ответственных и потенциально опасных ядерных процедур в эксплуатации любого реактора является его первый физический пуск. В процессе первого физического пуска экспериментально определяют величину эффективной доли запаздывающих нейтронов, критическое положение органов СУЗ и их физические характеристики в долях эффективной доли, а также коэффициенты реактивности. Ключевым моментом в этом комплексе мероприятий является эффективная доля запаздывающих нейтронов, являющаяся произведением физической доли и ценности запаздывающих нейтронов.

Ключевые слова: атомная энергетика, ядерный реактор, доля запаздывающих нейтронов, ядерная безопасность, активная зона, реактивность, низкообогащенное топливо, уран, коэффициент размножения, число ядер, первый физический пуск, ценность запаздывающих нейтронов.

Поступила в редакцию: 05.12.2017.

При принудительном делении тепловыми нейтронами ядра $^{235}_{92}$ U в среднем на один акт деления выделяется 2,44 нейтрона.

99,36% нейтронов деления выделяется за время 10^{-14} с, и они называются мгновенными нейтронами деления. 0,64 % нейтронов деления выделяется в отрезок времени $10^{-14} \div 80$ с, и они называются запаздывающими. Число 0,064% (0,0064) называют физической долей запаздывающих нейтронов, и обозначим его $\beta_{\phi \mu 3}$. Эта величина является основой другой величины $\beta_{9\varphi}$ и является главным параметром безопасности.

Как правило, ядерное топливо энергетических реакторов на тепловых нейтронах состоит из $^{235}_{\ 92}$ U и $^{238}_{\ 92}$ U, причем обогащение ураном-235 не должно превышать 20% (решение МАГАТЭ). Если $^{235}_{\ 92}$ U делится нейтронами всех энергий реакторного спектра (0,005 эВ –18 МэВ), то $^{238}_{\ 92}$ U делится только нейтронами с энергией $E_{\ H}^{rp}>1,1$ МэВ. Доля ядер U-238 разделившихся принудительно быстрыми нейтронами учитывается коэффициентом размножения на быстрых нейтронах E, и его величина всегда больше единицы. При делении ядер $^{238}_{\ 92}$ U большая часть нейтронов деления образуется в течении 10^{-14} с, а физическая доля запаздывающих нейтронов при делении ядра урана-238 составляет $\beta_{\ H}^{\phi \mu 3} = 1,55$ % (0,0155) [12]. Следовательно, активная зона энергетического реактора на тепловых нейтронах будет характеризоваться средней физической долей запаздывающих нейтронов, зависящей от $\beta_{\ H}^{\phi \mu 3}$ и $\beta_{\ 8}^{9\varphi}$.

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ

Скорость деления ядер $^{235}_{92}$ U в і-том поколении будет выражаться $\delta_f^5 N_5 \phi_{\text{тн}}$, где $\phi_{\text{тн}}$ – плотность потока тепловых нейтронов.

Скорость образования всех вторичных нейтронов деления данного поколения от деления тепловыми нейтронами выразится $\delta_f^5 N_5 \phi_{\text{тн}} \nu_5$, где ν_5 – среднее число нейтронов деления, образующихся при делении одного ядра урана-235 тепловыми нейтронами. Скорость образования вторичных запаздывающих нейтронов в данном поколении из общей скорости $\delta_f^5 N_5 \phi_{\text{тн}} \nu_5$

выразится $\delta_f^5 N_5 \phi_{\text{тн}} \nu_5 \beta_5^{\phi_{\text{из}}}$. Эти нейтроны не могут принять участие в делении ядер урана-238, т.к. их средняя энергии $E_{\text{ср.}}^{\text{3.H}}$ =0,5 MэB \leq $E_{\text{H}}^{\text{гр}}$ =1.1 МэВ.

Скорость образования мгновенных нейтронов в этом же поколении, которые могут разделить ядро $^{238}_{92}$ U , т.к. их средняя энергия E_{cp} = 2 МэВ, выразится $\delta_f^5 N_5 \phi_{\text{тн}} \nu_5 (1-\beta_5^{\phi_{13}})$. Эти нейтроны начнут замедляться, но прежде чем они замедлятся, они смогут разделить часть ядер U-8. Образовавшиеся при этом нейтроны деления также состоят из нейтронов мгновенных и запаздывающих, и доля последующих составляет $\beta_8^{\phi_{13}}$ = 0,0155. Но важно то, что эти нейтроны относятся к тому же данному поколению. Следовательно, скорость образования нейтронов деления в данном поколении от деления только U-8 выразится $\delta_f^5 N_5 \phi_{\text{тн}} \nu_5 (1-\beta_5^{\phi_{13}}) (\xi-1) \beta_8^{\phi_{13}}$.

Общая же скорость образования запаздывающих нейтронов в данном i-том поколении будет равна сумме скорости образования запаздывающих нейтронов от деления U-5 и U-8:

$$\frac{dn_{i}^{\text{зап.}}}{dt} = \delta_{f}^{5} N_{5} \phi_{\text{TH}} \nu_{5} \beta_{5}^{\phi_{\text{H3}}} + \delta_{f}^{5} N_{5} \phi_{\text{TH}} \nu_{5} (1 - \beta_{5}^{\phi_{\text{H3}}}) (\xi - 1) \beta_{8}^{\phi_{\text{H3}}}$$

Скорость генерации в і-том поколении всех нейтронов выразится $\delta_f^5 N_5 \phi_{\text{тн}} v_5 \mathcal{E}$. Тогда средняя доля запаздывающих нейтронов в і-том поколении в активной зоне, если в ней в качестве ядерного топлива используют U-8 и U-5, будет равна

$$\overline{\beta}_{A3}^{\phi_{\mu3}} = \frac{\delta_{f}^{5} N_{5} \phi_{\tau H} \nu_{5} \beta_{5}^{\phi_{\mu3}} + \delta_{f}^{5} N_{5} \phi_{\tau H} \nu_{5} (1 - \beta_{5}^{\phi_{\mu3}}) (\epsilon - 1) \beta_{8}^{\phi_{\mu3}}}{\delta_{f}^{5} N_{5} \phi_{\tau H} \nu_{5} \epsilon} = \frac{\beta_{5}^{\phi_{\mu3}} \div (1 - \beta_{5}^{\phi_{\mu3}}) (\epsilon - 1) \beta_{8}^{\phi_{\mu3}}}{\epsilon}$$
(1)

В реакторах на тепловых нейтронах $\mathcal{E}=1,001\div1,03$ [2-10] и $\mathcal{E}=1,02\div1,05$ [12].Для урановых реакторов на быстрых нейтронах $\mathcal{E}=1,15\div1,16$ [12].

Используя данные [2-10] и [12] и зависимость формулы (1) числовые значения $\bar{\beta}_{A3}^{\Phi^{H3}}$ от коэффициента размножения на быстрых нейтронах ϵ представлены в таблице 1.

Таблица 1.— Зависимость $\overline{\beta}_{A3}^{\phi \mu 3}$ от коэффициента размножения на тепловых нейтронах ε [Dependence of $\overline{\beta}_{Az}^{phis}$ on the coefficient of multiplication on thermal neutrons ε]

3	1,005	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,1	1,13	1,16
$\bar{\beta}_{A3}^{\phi$ из	0,00644	0,006489	0,006576	0,006676	0,006746	0,006829	0,00696	0,007218	0,007435	0,007641

Учитывая вышесказанное, графическое изображение изменения $\overline{\beta}_{A3}^{\phi$ при заданных условиях представлено на рисунке 1.

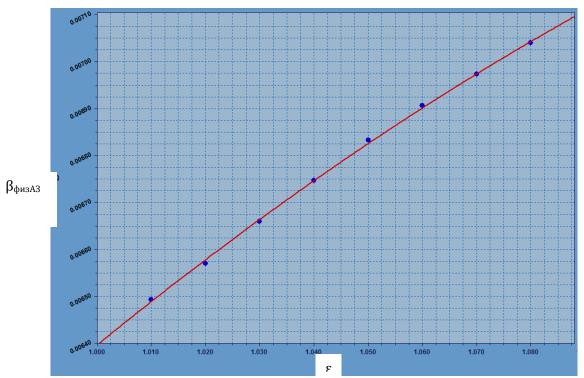


Рис. 1.— Зависимость физической доли запаздывающих нейтронов по активной зоне от коэффициента размножения на быстрых нейтронах [Dependence of the physical fraction of delayed neutrons in the active zone on the multiplication factor on fast neutrons]

Такие значения $\overline{\beta}_{A3}^{\varphi_{и3}}$ имеют место, если в активной зоне кроме U_8^{A3} и U_5^{A3} нет других ядерных топливных материалов. Этот рост $\overline{\beta}_{A3}^{\varphi_{u3}}$ имеет место из-за наличия в активной зоне U-238, большого количества U-8 в активной зоне (N_{U-8} - N_{U-5}) и большой у него физической доли запаздывающих нейтронов ($\overline{\beta}_{A3}^{\varphi_{u3}}$ =0,0155).

Если рассматривать реактор на тепловых нейтронах с урановым ядерным топливом, то рассмотренное явление (увеличение $\bar{\beta}_{A3}^{\Phi^{u3}}$) имеет место только при первом физическом пуске или других пусках вскоре следующих за ни, пока не накопится Pu-239,... которого является U-238. При накоплении влиятельного значения ядер Pu-239 будет иметь место обратная картина: средняя доля запаздывающих нейтронов по активной зоне $\bar{\beta}_{A3}^{\Phi^{u3}}$ будет снижаться из-за $\beta_{Pu-39}^{\Phi^{u3}}$ =0,0021 [13-15].

ВЫВОДЫ

- 1. Физическая доля запаздывающих нейтронов в активной зоне, состоящей из низкообогащенного урана, при первом физическом пуске всегда больше физической доли запаздывающих нейтронов, возникающих при делении ядер 235 U, и является функцией коэффициента размножения на быстрых нейтронах.
- 2. Чем больше коэффициент размножения на быстрых нейтронах смотри рис.1, тем более весомое значение на общую физическую долю запаздывающих нейтронов оказывает физическая доля запаздывающих нейтронов в 238 U.
- 3. При одинаковой ценности запаздывающих нейтронов, приведенные в первых двух пунктах выводов закономерности увеличивают $\beta_{s\varphi}$, следовательно, увеличивают предел 0.7 $\beta_{s\varphi}$, тем самым отодвигая в сторону безопасности предел мгновенной критичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Об утверждении и введении в действие федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций» [Электронный ресурс базы «Консультант Плюс»]: постановление Федеральной службы по технологическому, экологическому и атомному надзору от 10 декабря 2007 г. №4.
- 2. *Саркисов, А.А. и др.* Судовые реакторы и парогенераторы [Текст] / А.А. Саркисов, В.Н. Пучков. М.: Воениздат, 1985.
- 3. *Климов*, *А.Н.* Ядерная физика и ядерные реакторы [Текст] / А.Н. Климов. М.:Атомиздат,1971.
- 4. Γ аланин, Λ .Д. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах [Текст] / Λ .Д. Γ аланин. M.: Атомиздат,1960.
- Тевлин, С.А. АЭС с реакторами ВВЭР-1000 [Текст] / С.А. Тевлин. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
- 6. *Глесстон, С. и др.* Основы теории ядерных реакторов [Текст] / С. Глесстон, М. Эллунд. М: Изд-во иностр. лит., 1954.
- 7. *Белл, Д. и др.* Теория ядерных реакторов [Текст] / Д. Белл, С. Глесстон. Теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1974.
- 8. Рудик, A.П. Физические основы ядерных реакторов [Текст] / A.П. Рудик. M.: Атомиздат,1979.
- 9. Справочник по ядерной физике [Текст] / под редакцией академика А.А. Арцимовича. М.: Госиздат физ-мат литературы, 1963.
- 10. Пучков, В.Н. Пуск, работа, остановка реактора [Текст] / В.Н. Пучков. М.: Военно-морской флот, 1979.
- 11. *Овчинников*, Ф.Я. Эксплуатационные режимы ВВЭЯР [Текст] / Ф.Я Овчинников, В.В. семенов. М.: Атомизат, 1977.
- 12. *Бартоломей*, *Г.Г. и др.* Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов [Текст] / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать и др. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- 13. Справочник по ядерно-физическим константам для расчета реакторов [Текст] / И.В. Гордеев и др. М.: Госатомиздат, 1960.
- 14. *Бурлаков Б.А.* Теплофизические и ядерные свойства материалов, применяемых в реакторостроении [Текст] / Б.А. Бурлаков. ВМФ, 1967.
- 15. *Кипин,Дж.Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов [Текст] / Дж.Р. Кипин. М.: Атомиздат,1967.

REFERENCES

- [1] Ob utverzhdenii i vvedenii v dejjstviefederal'nykh norm i pravil v oblastiispolzovanijaatomnojjehnergii «Pravilajadernojjbezopasnostireaktornykhustanovokatomnykhstancijj» [Approval and Enactment of Federal Norms and Rules in the Sphere of the Use of Atomic Energy "Rules for Nuclear Safety of Nuclear Plant Reactor Facilities"]. Nuclear Safety Rules for Nuclear Power Plant Reactor Units (NP-082-07). M. Pub.Gospromatomnadzor, 2007. (in Russian)
- [2] Sarkisov A.A., Puchkov V.N. Sudovyereaktory i parogeneratory[Ship reactors and steam generators]. M.Pub. Military Publishing, 1985. (in Russian)
- [3] Klimov A.N. Yadernajafizika i yadernyereaktory[Nuclear physics and nuclear reactors]. M. Pub.Atomizdat, 1971. (in Russian)
- [4] Galanin A.D Teorijayadernykhreaktorovnateplovykhnejjtronakh[The theory of nuclear reactors on thermal neutrons]. M. Pub. Atomizdat, 1960. (in Russian)
- [5] Tevlin S.A. Aehs s reaktorami vvehr 1000[NPP with VVER reactors]. M.: Pub.Izdatelskij dom MEHI, 2008. (in Russian)
- [6]Glesston S., Ellund M. Osnovyteoriiyadernykhreaktorov[Fundamentals of the theory of nuclear reactors] M. Pub.Izd-voinostr. lit. [TheFundamentalsofNuclearReactorTheory], 1954.
- [7] Bell D.,Glesston S. Theorijayadernykhreaktorov[Theory of nuclear reactors].M. Pub.Atomizdat, 1974. (in Russian)
- [8] Rudik A.P. Fizicheskieosnovyyadernykhreaktorov[Physical basis of nuclear reactors]. Physical fundamentals of nuclear reactors. M. Pub.Atomizdat, 1979. (in Russian)
- [9] Spravochnik po yadernoj fizike [handbook of nuclear physics] pod redakciej akademika A.A. Arcimovicha. M.: Pub. Gosizdat fiz mat literatury, 1963. (in Russian)
- [10] Puchkov V.N. Pusk, rabota, ostanovkareaktora[Start, work, shutdown of the reactor]. M. Pub. The

- Navy, 1979. (in Russian)
- [11] Ovchinnikov F.Y. Ehkspluatacionnye rezhimy VVEHYAR[Operating modes of the VENR] M.: Pub.Atomizdat, 1977. (in Russian)
- [12] Bartolomei G.G., Bat G.A, etc. Osnovyteorii i metody rascheta yadernykh ehnergeticheskikh reaktorov [Fundamentals of the theory and methods for calculating nuclear power reactors]. M. Pub. Energoatomizdat, 1989.(in Russian)
- [13] Gordeev I.V., et al.Spravochnik po yaderno-fizicheskim konstantam dlja rascheta reaktorov [Handbook on nuclear-physical constants for the calculation of reactors]. M. Gosatomizdat, 1960. (in Russian)
- [14] Burlakov B.A. Teplofizicheskie I yadernye svojstva materialov primenyaemyh v reaktorostroenii [Thermophysical and nuclear properties of materials used in reactor building]. VMF, 1967. (in Russian)
- [15] Kiping J.R. Fizicheskie osnovy kinetiki yadernykh reaktorov [Physical basis of the kinetics of nuclear reactors]. M. Pub. Atomizdat, 1967. (in Russian)

Physical Share of Delayed Neutrons in ReactorActive Zone with Low-enriched Fuel at the First Physical Start-up

P.A. Ponomarenko, S.S. Bezotosny, M.A. Frolova, V.A. Morozova

Sevastopol State University Kurchatov St. 1, Sevastopol, Crimea, Russia, 299016 e-mail: frolova-85@mail.ru

Abstract – The article is devoted to the theoretical estimate of the physical fraction of delayed neutrons in the reactor core by thermal neutrons, the fuel elements which contain only uranium fuel, prior to the physical start-up.

One of the most responsible and potentially dangerous nuclear procedures in operation of any reactor is its first physical start-up. In the course of the first physical start-up experimentally define size of an effective share of delayed neutrons and reactance factors. The key moment in this complex of actions is the effective share of delayed neutrons which are product of a physical fraction and value of late neutrons.

Keywords: nuclear power, nuclear reactor, fraction of delayed neutrons, nuclear safety, active zone, reactivity, low enriched fuel, uranium, multiplication factor, number of nuclei, first physical launch, value of delayed neutrons.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 528.048

КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС ПРИ ПРЕДНАПРЯЖНИИ, ИСПЫТАНИИ И ОПРЕДЕЛЕНИИ ЕЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

© 2017 Ю.И. Пимшин*, Г.А. Науменко**, С.М. Бурдаков*, Ю.С. Забазнов*

- * 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

В работе рассмотрена теория оценки технического состояния защитной герметичной оболочки (ЗГО) и опыт применения мобильной геодезической диагностической системы на энергоблоке №4 Ростовской атомной электрической станции (РоАЭС). Изучены результаты штатной встроенной системы, предназначенной для определения и оценки напряженно деформированного состояния защитных герметичных оболочек в период приёма-сдачи и эксплуатации, и выполнено сравнение с результатами геодезической системы, полученными на тех же этапах существования ЗГО.

Ключевые слова: защитная герметичная оболочка, техническое состояние, преднапряжение, испытание, контроль, мобильная геодезическая диагностическая система, оценка напряженно деформированного состояния.

Поступила в редакцию: 11.12.2017

В 2016 году введено в действие НП-010-16 «Правила устройства и эксплуатации локализующих систем безопасности атомных станций», где указано, что [4]:

- «...Проверка ЛСБ и их элементов на соответствие проектным характеристикам должна обеспечиваться путем проведения следующих видов испытаний:
 - . . .
 - испытание на прочность...»
- «...Испытания ГО на прочность проводятся избыточным давлением, а также разрежением *один раз за весь срок службы* блока АС при подготовке к вводу блока АС в эксплуатацию...»
 - «...При испытаниях ГО на прочность необходимо:
- экспериментально определять динамику изменения параметров напряженнодеформированного состояния в контрольных точках, установленных в проекте AC;
- сопоставлять данные испытаний с расчетными и (или) предельно допустимыми значениями, установленными в проекте AC...»
- $\ll ... B$ процессе испытания ΓO на прочность должны регистрироваться следующие параметры:
- данные визуального осмотра наружных поверхностей ГО, доступных для осмотра;
- параметры напряженно-деформированного состояния ΓO в контрольных точках;
 - температура элементов ГО;
 - усилия в арматурных канатах системы преднапряжения защитной оболочки,

на которых установлены датчики контроля усилия натяжения;

- параметры среды в объеме зоны локализации аварии;
- температура окружающей среды вне ГО;
- данные геодезического контроля перемещений элементов ГО.

Эти параметры (за исключением температуры окружающей среды) следует измерять в контрольных точках ΓO , которые должны быть указаны в проекте AC и программе испытаний...»

Резюмируя данную выдержку, отметим то, что параллельно с результатами встроенной системы датчиков в процессе испытаний оболочки требуется получение перемещений контрольных точек, которые должны быть указаны в проекте АС и в программе испытаний, и сравнивать величины полученных перемещений с расчетными или предельно допустимыми значениями, установленными в проекте АС. В современных реализуемых проектах АС информация по размещению контрольных точек и по их расчетным перемещениям или проектным предельно допустимым значениям отсутствует. Поскольку данные проекты разработаны, прошли экспертизу до введение в действие НП-010-16. Однако требования, изложенные в «Нормах и правилах» не могут не реализовываться на строящихся АС. В соответствии с этим коллективом авторов разработана, реализована и предлагается следующая методика решения данной задачи.

Контролируемые точки располагают непосредственно на поверхности защитной оболочки, при этом, на цилиндрической части размещают в безмоментных зонах на строительных осях оболочки и приурочивая их положение к зонам размещения блоков датчиков встроенной системы [1-7]. На купольной части располагают на четвертных осях, размещают так же в безмоментных зонах, и приурочивая их положение к зонам размещения блоков датчиков встроенной системы (см. рис. 1, рис. 2.)

При поэтапном контроле внешних геометрических параметров гермооболочки положение контролируемых точек, расположенных на цилиндрической части на вертикальных сечениях, определяют методом пространственной полярной засечки, электронными тахеометрами, имеющие следующие параметры точности измерения вертикальных и горизонтальных углов 1" и дальности 0.5 мм. Положение контролируемых точек, расположенных на купольной части защитной оболочки, определяли методом геометрического нивелирования, с точностью не менее 0.5 мм.

Положение контрольных точек определяют на этапах [8-15]:

- до преднапряжения;
- по окончанию полной программы обжатия;
- непосредственно перед испытанием;
- по полкам довления 0.7, 2.0, 3.0, 4.0, 4.6, 4.0, 0.7, 0.

По результатам измеренных значений перемещений ΔR_{nped} , полученных на этапе после реализации полной программы обжатия, вычисляют расчетные предельно допустимые значения перемещений контрольных точек оболочки при ее испытании. При этом первоначально вычислили значение перемещений для полки набора давления 4.6 атм. Для этого согласно СП 52-102-2004.

$$1.5 \leq \frac{\Delta R_{npe\partial}}{\Delta R^*_{ucn}},$$

где ΔR^*_{ucn} . расчетное значение перемещения контрольной точки при наборе давления 4.6 атм.

$$_{\text{Или}} \Delta R^*_{ucn(4.6)} \leq 0,667 \cdot \Delta R_{nped}$$
.

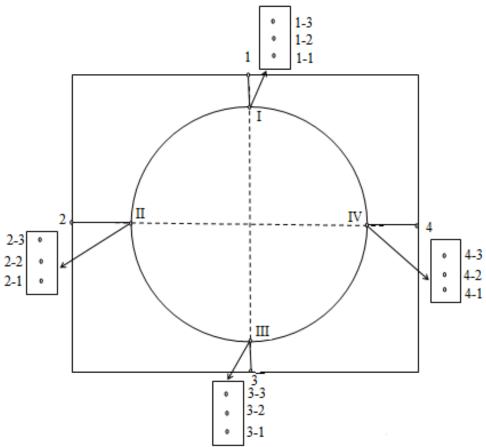
Далее для всех остальных полок давления получают расчетные значения перемещений путем линейного интерполирования:

$$\Delta R^*_{ucn(x_i)} \leq \Delta R^*_{ucn(4.6)} \cdot \frac{x_i}{4.6},$$

где x_i – значение давления на соответствующих полках при испытании.

Данная методика была использована при преднапряжении и испытании оболочки четвертого энергоблока Ростовской АЭС. В результате проведения геодезических работ, выполненных при формировании геодезического обоснования и при обжатии оболочки, получили следующие результаты.

Контроль геометрических параметров цилиндрической части был осуществлен путем поцикловых измерений контрольных расстояний между точками геодезического обоснования и контролируемыми точками, расположенными на поверхности защитной оболочки (см. рис. 1).



Puc. 1. – Схема контроля деформаций цилиндрической части при обжатии оболочки [Scheme of cylindrical part deformation monitoring during shell compression]

Результаты работ приведены в табл. 1.

Контроль геометрических параметров купольной части был осуществлен путем поциклового нивелирования контролируемых точек, расположенных на поверхности защитной оболочки (см. рис. 2). Результаты работ приведены в таблице 3.

Примечание:

- -16.06.2016, 28.06.2016 г. были выполнены два цикла измерений до преднапряжения;
 - 27.04.2017 был выполнен цикл измерений после выполнения полной

программы натяжения канатов.

Непосредственно после завершения полной программы обжатия оболочки (апрель 2017 г.) в ее цилиндрической части на горизонте 47.0 – 50.0 м были зарегистрированы перемещения, направленные на уменьшение радиуса горизонтального сечения, соответствующие величинам порядка -12.6 мм в координатной плоскости осей 3-1 и -14.92 в координатной плоскости осей 4-2.

Таблица 1. – Значения перемещений точек, расположенных на внешней поверхности цилиндра защитной оболочки [Values of point displacements located on the outer surface of the containment cylinder]

							Среднее
№ п/п	Δ_1	Δ_2	Δ_1 - Δ_2	$(\Delta_{1+}\Delta_2)/2$	Δ_3	Δ_{Cp} - Δ_3	по осям
			16.06-				
	16.06.2016	28.06.2016	28.06	$\Delta_{\mathrm{Cp}}.$	27.04.2017	$\Delta_{ m преднапряж.}$	M
Ось-3							оси 3-1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,305402	0,30346	0,001942	0,304431	0,314982	-0,01055	-0,01088
2	0,276165	0,273846	0,00232	0,275006	0,286183	-0,01118	-0,01255
3	0,266165	0,26273	0,003435	0,264448	0,27598	-0,01153	-0,01438
						Cp.	-0,0126
Ось-4							оси 4-2
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,320403	0,321081	-0,00068	0,320742	0,34016	-0,01942	-0,01558
2	0,310294	0,30916	0,001134	0,309727	0,329304	-0,01958	-0,01475
3	0,30595	0,305329	0,000621	0,305639	0,326907	-0,02127	-0,01443
						Cp.	-0,01492
Ось-1							
0	0	0	0	0	0	0	
1	0,28736	0,285967	0,001392	0,286663	0,332872	-0,01121	
2	0,292746	0,289866	0,00288	0,291306	0,340224	-0,01392	
3	0,277634	0,27383	0,003804	0,275732	0,327967	-0,01723	
Ось-2							
0	0	0	0	0	0	0	
1	0,353886	0,354026	-0,00014	0,353956	0,365702	-0,01175	
2	0,340498	0,339632	0,000866	0,340065	0,349986	-0,00992	
3	0,329837	0,329524	0,000314	0,32968	0,337272	-0,00759	-

По этим перемещениям вычислены значения ожидаемых перемещенный для программы испытаний этой оболочки (см. табл. 2).

Контроль геометрических параметров купольной части был осуществлен путем поциклового нивелирования контролируемых точек, расположенных на поверхности защитной оболочки (см. рис. 2). Результаты работ приведены в табл. 3.

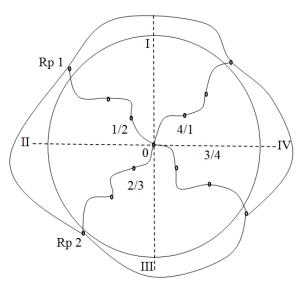
Непосредственно после завершения полной программы обжатия оболочки (апрель 2017 г.) в ее купольной части были зарегистрированы перемещения, направленные на уменьшение отметок центра –19.3 мм.

При испытании гермооболочки контроль геометрических параметров цилиндрической части был осуществлен путем поцикловых измерений перемещений контрольных точек, на соответствующих полах давления, создаваемого внутри оболочки. Результаты работ приведены в таблице 4.

Таблица 2. – Расчетные величины перемещений для этапа испытаний [Estimated values of displacements for the test stage]

№ осей	Α	Расчетные $\Delta_{ucnumanue}$ при давлении							
	Δ преднапряж.	4,6	0,7	2,0	3,0	4,0			
оси 3;1									
	-0,0126*	0,0084	0,00128	0,00365	0,00548	0,00731			
оси 4;2									
	-0,01492*	0,00995	0,00151	0,00432	0,00649	0,00865			
Ср. по									
столбцу	-0,01376	0,009175	0,001395	0,003985	0,005985	0,00798			

^{* –} фактические величины перемещений, полученные после этапа преднапряжения.



Puc. 2. – Схема нивелирования купольной части при обжатии оболочки [Scheme of dome part leveling when compressing the shell]

Таблица 3. — Результаты нивелирования купола защитной оболочки и расчетные величин перемещений для этапа испытаний [Results of containment dome leveling and estimated values of movements for the test phase]

№ точек	H (16.06.2016+ 28.06.2016)/2	H 27.04.2017	$\Delta_{nреднапряж}$	Расчетные значения перемещений точек, расположенных на внешней поверхности купола защитной оболочки при ее испытании						
	M	M	M	4,6	0,7	2,0	3,0	4,0		
Rp1	0	0								
4-1	4,646067	4,628967	-0,0171	-0,0114	-0,00173	-0,00496	-0,00743	-0,00991		
2-1	4,6606	4,6418	-0,0188	-0,01253	-0,00191	-0,00545	-0,00817	-0,0109		
0	4,8952	4,8759	-0,0193	-0,01287	-0,00196	-0,00559	-0,00839	-0,01119		
Rp2	-0,0008	-0,0007								
2-3	4,673067	4,6536	-0,01947	-0,01298	-0,00197	-0,00564	-0,00846	-0,01129		
4-3*	4,682133	4,669066	-0,01307	-0,00871	-0,00133	-0,00379	-0,00568	-0,00758		
0	4,8952	4,8759	-0,0193	-0,01287	-0,00196	-0,00559	-0,00839	-0,01119		
,	* – величины строки, исключенные из обработки.									

Таблица 4. – Результаты контроля цилиндрической части оболочки при ее испытании [Results of shell cylindrical part testing during its testing]

N_0N_0	Пере	мещения і	цилиндрич	еской част	ти ЗГО на с	соответств	ующих по	лкам
точек по				давлені	ий, в м.			
створам	0-0,7	0-2	0-3	0-4	0-4,6	0-4	0-0,7	0-0
1-1	0,002156	0,00354	0,00513	0,007697	0,007084	0,007571	0,002402	0,001469
1-2	0,000683	0,00339	0,006766	0,007668	0,008955	0,008439	0,002538	0,001914
1-3	0,000814	0,002827	0,005786	0,007502	0,00808	0,00741	0,003802	0,001854
Cp.	0,001218	0,003252	0,005894	0,007622	0,00804	0,007807	0,002914	0,001746
2-1	0,002281	0,00321	0,006728	0,0067	0,00731	0,006902	0,002944	0,001155
2-2	0,00034	0,004614	0,005288	0,007018	0,00828	0,006911	0,00338	0,001826
2-3	0,00049	0,004866	0,005316	0,007164	0,008043	0,00761	0,003789	0,00116
Cp.	0,001037	0,00423	0,005777	0,006961	0,007878	0,007141	0,003371	0,001032
3-1	0,00185	0,00429	0,00508	0,008526	0,00842	0,0077	0,00194	0,00142
3-2	0,00157	0,00533	0,00781	0,00903	0,0099	0,00899	0,00223	0,00174
3-3	0,00133	0,00428	0,00698	0,00808	0,00815	0,008047	0,00248	0,00195
Cp.	0,001583	0,004633	0,006623	0,008545	0,008823	0,008246	0,002217	0,001703
4-1	0,00045	0,0031	0,00405	0,006285	0,00674	0,006419	0,00172	0,00117
4-2	0,00169	0,0049	0,00557	0,00851	0,00908	0,007738	0,00323	0,0028
4-3	0,00227	0,00493	0,0062	0,0085	0,00912	0,008629	0,00232	0,00166
Cp.	0,00147	0,00431	0,005273	0,007765	0,008313	0,007595	0,002423	0,001877
Среднее								
по								
столбцу:	0,001327	0,004106	0,005892	0,007723	0,008264	0,007697	0,002731	0,001843

Сравнительные характеристики фактических перемещений, величин определенных на цилиндрической части оболочки и их расчетных значений, полученных по максимальной величине перемещения определенного на этапе после преднапряжения (см. табл. 5, рис. 3).

Контроль геометрических параметров купольной части был осуществлен путем поцикловых измерений контрольных превышений между точками геодезического обоснования и контролируемыми точками, расположенными и закрепленными на купольной части оболочки. Результаты работ приведены в таблице 6.

Таблица 5. – Величины перемещений расчетных и фактических значений на этапе испытаний [Values of calculated and actual data movement during the testing phase]

	Пере	Перемещения цилиндрической части ЗГО по соответствующим полкам давлений, в м.										
	0-0,7	0-2	0-3	0-4	0-4,6	0-4	0-0,7	0-0				
Факт.	0,001327	0,004106	0,005892	0,007723	0,008264	0,007697	0,002731	0,001843				
Расчет.	0,001395	0,003985	0,005985	0,00798	0,009175							

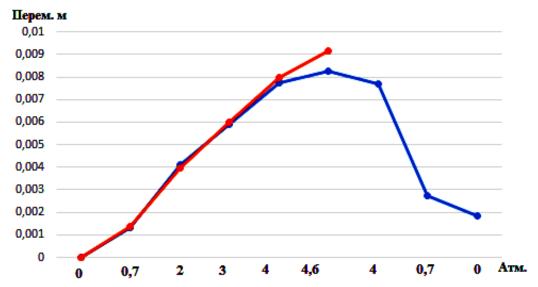


Рис. 3. – График перемещений расчетных и фактических значений на этапе испытаний [Schedule of calculated and actual data movement during the testing phase]

Таблица 6. – Результаты контроля купольной части оболочки [Dome monitoring results]

N_0N_0	Пеј	ремещения	я купольно	ой части 31	О по соот	ветствующ	им полкам	давлений, в	3 M.
точек по створам	0-0,7	0-0,7	0-2	0-3	0-4	0-4,6	0-4	0-0,7	0-0
Rp-1*	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(1/2) 2	0,0004	0,0024	0,0037	0,0043	0,0103	0,0126		0,0046	0,002
(1/2) 1	0,0058	0,0058	0,0075	0,0105	0,01287	0,01325	0,01175	0,0085	0,0025
0	0,0016	0,0028	0,0051	0,0082	0,0097	0,01025	0,00535	0,0002	-0,002
(1/4) 1	0,0064	0,006	0,0092	0,0135	0,0119	0,01325		0,0058	0,0035
(1/4) 2	0,0052	0,0053	0,0078	0,0103	0,01325	0,01435		0,0062	0,0041
Rp2*	-0,0008	0,0006	0,0015	0,0031	0,00173	0,00285		0,0021	0,0035
(4/3) 2	0,002	0,0042	0,0059	0,0081	0,01287	0,01425		0,0046	0,002
(4/3) 1	0,0049	0,0058	0,0084	0,0119	0,01193	0,0125	0,014	0,004	0,0036
0	0,0016	0,0028	0,0051	0,0082	0,00983	0,00105	0,00535	0	-0,002
(3/2) 1	0,0032	0,0049	0,0073	0,0096	0,01145	0,0122			0,0026
(3/2) 2	0,0025	0,0035	0,0064	0,0087	0,0116	0,0137		0,0045	0,0036
Ср. по									
столбцу:	0,00333	0,00435	0,00664	0,00933	0,01157	0,01266	0,009112	0,004278	0,00199
* - ot	метки рег	перов, ись	слюченнь	іе из обра	ботки.				

Сравнительные характеристики фактических величин перемещений, определенных на купольной части оболочки и их расчетных значений, полученных по максимальной величине перемещения определенного на этапе после преднапряжения (см. табл. 7, рис. 4).

Таблица 7. – Величины перемещений расчетных и фактических значений на этапе испытаний [Values of calculated and actual data movement during the testing phase]

	Перемещения купольной части ЗГО по соответствующим полкам давлений, в м.									
	0-0,7	0-2	0-3	0-4	0-4,6	0-4	0-0,7	0-0		
Факт.	0,00333	0,00664	0,00933	0,01157	0,01266	0,009112	0,004278	0,00239		
Расчет.	0,00191	0,00545	0,00817	0,0109	0,01253					

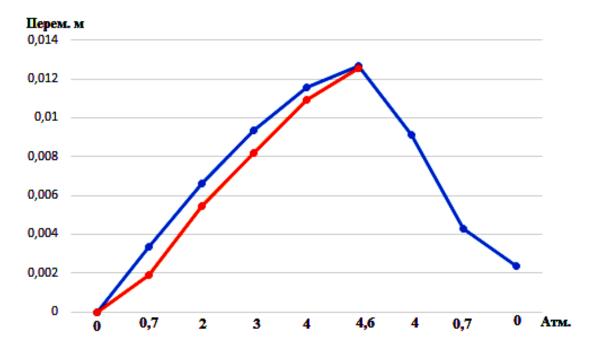


Рис. 4. – График перемещений расчетных и фактических значений на этапе испытаний [Schedule of calculated and actual data movement during the testing phase]

Коэффициенты запаса прочности, определенные по перемещениям, полученным по контрольным точкам, установленным на внешней поверхности ЗГО по цилиндру Кц=1,665, по куполу Кк=1,484. Используя расчетное процентное соотношение (95%) относительных деформаций по поперечному сечению оболочки получим расчетные коэффициенты запаса прочности по внутренней поверхности стены ЗГО[6]:

- цилиндрической части K_B= 1,753;
- купольной части K_B = 1,562.

Результат анализа измеренных приращений напряжений встроенной системой по которым вычислены коэффициенты запаса прочности (см. табл.8) и соответствующие коэффициенты, полученные по величинам перемещений контрольных точек по абсолютной величине в среднем, отличаются не более 8%.

Таблица 8. – Результаты измерений датчиков ПСАС встроенных в окружную арматуру [Results of sensor measurements built into the circumference fittings]

№ п/п	Привязка			Внутреняя (B 3)		
	(усл.отм.), м	створа	$K_{\Pi} = \sigma_{\Pi o} / \sigma_{\Pi u}$	$K_{B}{=}\sigma_{Bo}{/}\;\sigma_{Bu}$		
Цилиндр						
1	32.6	1	1,38	1,59		
2	44.0	1	1,45	1,63		
3	32.6	3	1,41	1,62		
Cp.			1,41	1,61		
Купол						
4	6.0	1	1,30	1,58		
5	12.0	1	1,46	1,60		
Cp.			1,38	1,59		

Таким образом, предложенная методика контроля величин перемещения контрольных точек адекватно отображает техническое состояние оболочки и может быть рекомендована к внедрению на строящихся объектах использования атомной энергии в рамках концерна Росэнергоатом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Серия норм по безопасностии.* № *NS-G-1/10*. Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных электростанций. Руководство по безопасности. [Текст] Вена: Международное агентство по атомной энергии, 2008.— 143 с.
- 2. $C\Pi$ 52-102-2004. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. [Текст] М.: Φ ГУП ЦПП, 2005.—42 с.
- 3. *CTO CPO-C 60542960 00017-2014*. Стандарт организации. Объекты использования атомной энергии. Система предварительного напряжения защитной оболочки реакторного отделения АЭС. Требования к конструированию, строительству, эксплуатации и ремонту. Утверждено решением общего собрания членов СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ», Протокол № 10 от 12 февраля 2014 года. [Текст] М.: СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ», 2014.— 28 с.
- 4. НП-010-16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила устройства и эксплуатации локализующих систем безопасности атомных станций». Приказ Ростехнадзора от 24.02.2016 N 70 (ред. от 17.01.2017) [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». Режим доступа: URL:http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_196163/- 5.12.2017.
- 5. *Пимшин, Ю.И. и др.* Диагностика технического состояния технического состояния защитных оболочек АЭС. [Текст] / Ю.И. Пимшин, Е.Б. Клюшин, В.Н. Медведев, О.А. Губеладзе, В.А. Наугольнов, Ю.В. Заяров, Ю.С. Забазнов // Известия высших учебных заведений «Геодезия и Аэрофотосъёмка». 2016.—№ 4. С.55—59.
- 6. *Пимшин, Ю.И. и др.* Оценка напряженно-деформированного состояния защитных герметичных оболочек на примере блоков Ростовской АЭС. [Текст] / Ю.И. Пимшин, В.Н. Медведев, Г.А. Науменко, В.А. Наугольнов, Ю.С. Забазнов // Известия высших учебных заведений «Геодезия и Аэрофотосъёмка». 2017. № 3. С.36–42.
- 7. *Пимшин, Ю.И. и др.* Анализ работы строительных элементов герметичной оболочки АЭС при ее преднапряжении и испытании. [Электронный ресурс] / Ю.И. Пимшин, Ю.С. Забазнов, Л.Ф. Кирильчик // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона: сетевой журн. − 2014. − №1. − Режим доступа: URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2263 − 5.12.2017.
- 8. Забазнов, Ю.С. и др. Геодезическое обеспечение мониторинга технического состояния защитных герметичных оболочек атомных электрических станций (АЭС) в период их строительства, преднапряжения и испытания [Текст] / Ю.С. Забазнов, Е.Б. Клюшин, Ю.И. Пимшин // Сборник статей по итогам научно-технических конференций. Выпуск 7 (в двух частях) Ч.1. М.: Изд-во МИИГАиК,2014/ Прилож. к журналу «Геодезия и Аэрофотосьемка» 2014.— №6. С. 19—23.
- 9. *Пат. 2426089 Российская Федерация, МПК G01, М 99/00.* Способ определения деформационных характеристик сооружений [Текст] / Пимшин Ю.И., Наугольнов В.А., Пимшин И.Ю., Забазнов Ю.С., Яковлев В.В.; заявитель и патентообладатель Пимшин Ю.И., Наугольнов В.А., Пимшин И.Ю., Забазнов Ю.С., Яковлев В.В. № 2010105351/28; заявл. 15.02.10; опубл. 20.08.11, бюл. №22. 2 с.: ил.
- 10. Пат. 2546990 Российская Федерация, МПК G01, М 99/00. Способ определения деформационных характеристик защитной герметичной оболочки [Текст] / Пимшин Ю.И., Забазнов Ю.С., Губеладзе О.А., Пимшин П.Ю.; заявитель и патентообладатель Пимшин Ю.И., Забазнов Ю.С., Губеладзе О.А., Пимшин П.Ю., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ростовский государственный строительный университет", РГСУ.— № 2013154404/28; заявл. 06.12.13; опубл. 10.04.15, бюл. №10.— 8 с.: ил.
- 11. Пат. 2577555 Российская Федерация, МПК G01, М 99/00. Способ оценки эксплуатационной надежности защитной герметичной оболочки реакторного отделения АЭС [Текст] / Пимшин Ю. И., Клюшин Е. Б., Забазнов Ю. С., Губеладзе О. А., Пимшин П. Ю.; заявитель и патентообладатель Пимшин Ю. И., Клюшин Е. Б., Забазнов Ю. С., Губеладзе О. А., Пимшин П. Ю., федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ростовский государственный строительный университет",

- РГСУ.- № 2014152168/28; заявл. 22.12.2014; опубл. 20.03.2016, бюл. №16.- 2 с.: ил.
- 12. Программа натурных наблюдений за защитной оболочкой энергоблока №3 Ростовской АЭС в период возведения, преднапряжения, приёмо-сдаточных испытаний и эксплуатации [Текст]. -М.: ОАО «Атомтехэнерго», 2011.
- 13. Нормы проектирования железобетонных конструкций локализующих систем безопасности атомных станций. ПНАЭ Г-10-007- 89 [Текст]. – Госпроматомнадзор СССР, 1991.
- 14. Медведев, В.Н. и др. Анализ результатов предварительного напряжения защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС [Текст] / В.Н. Медведев, А.Н. Ульянов, В.Ф. Стрижов, А.С. Киселев // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: тез. Девятой междунар. науч.-техн. конф.: пленарные и секционные доклады. – МНТК-2014, Москва, 21-23 мая 2014 г. – М., 2014. – С. 290–295.
- 15. Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона [Текст] / Н.И. Карпенко. М.: Стройиздат, 1996. – 416 с.

REFERENCES

- [1] NS-G-1/10. Seriya norm po bezopasnosti. Proektirovanie sistem zashchitnov obolochki reaktora dlya atomnykh elektrostantsiy. Rukovodstvo po bezopasnosti. [A Series of Safety Standards. Designing of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants. Safety Guide.]. Vienna. "IAEA" [International Atomic Energy Agency], 2008, 143 p. (in English)
- [2] SP 52-102-2004. Predvaritel'no napryazhennye zhelezobetonnye konstruktsii. [Pre-stressed Reinforced Concrete Structures]. Moscow. "FSUE CDP" [Federal State Unitary Enterprise "Center of design products in construction"], 2005, 42 p. (in Russian)
- [3] STO SRO-S 60542960 00017-2014. Standart organizatsii. Objekty ispolzovaniya atomnoy energii. Sistema predvaritelnogo napryazheniya zashchitnoy obolochki reaktornogo otdeleniya AES. Trebovaniya k konstruirovaniyu, stroitelstvu, ekspluatatsii i remontu. [The standard of the Organization. Objects of Atomic Energy Use. The System of Protective Shell Preliminary Voltage of the Nuclear Power Plant Reactor Compartment. Requirements for the Design, Construction, Operation and Repair.]. Moscow. "SOYuZATOMSTROY" [Self-regulating organization Association "Association of organizations performing construction, reconstruction, major repairs of nuclear facilities" SOYUZATOMSTROY"], 2014, 28 p. (in Russian)
- [4] NP-010-16. Federalnye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoy energii «Pravila ustroystva i ekspluatatsii lokalizuyushchikh sistem bezopasnosti atomnykh stantsiy» [Federal rules and regulations in the field of the use of atomic energy "Rules for the Design and Operation of Localizing Safety Systems for Nuclear Power Plants"], Ofitsial'nyy sayt kompanii «Konsul'tant [Official site of the Consultant Plus company], 2016. https://consultant.ru/document/cons doc LAW 196163. (in Russian)
- [5] Pimshin Yu.I., Klyushin E.B., Medvedev V.N., Gubeladze O.A., Naugolnov V.A., Zayarov Yu.V., Zabaznov Yu.S. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya tekhnicheskogo sostoyaniya zashchitnykh obolochek AES [Diagnosis of the Technical Condition of the Nuclear Power Plant Protective Shells] [Geodesy and Aerophotography], 2016, №4, ISSN 0536-101X, p. 55–59. (in Russian)
- Pimshin Yu.I., Medvedev V.N., Naumenko G.A., Naugol'nov V.A., Zabaznov Yu.S. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya zashchitnykh germetichnykh obolochek na primere blokov Rostovskoy AES [Estimation of the Stress-Strain State of Protective Hermetic Shells on the Example of Rostov NPP Units] [Geodesy and Aerophotography], 2017, №3, ISSN 0536-101X, p. 36–42. (in Russian)
- Pimshin Yu.I., Zabaznov Yu.S., Kiril'chik L.F. Analiz raboty stroitelnykh elementov germetichnoy obolochki AES pri ee prednapryazhenii i ispytanii [Analysis of the Work of Building Elements of the Nuclear Power Plants Hermetic Shell during its Prestressing and Testing] [E-journal 2014, **№**1. journal of Don"], ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2263. (in Russian)
- Zabaznov Yu.S., Klyushin E.B., Pimshin Yu.I. Geodezicheskoe obespechenie monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya zashchitnykh germetichnykh obolochek atomnykh elektricheskikh stantsiy (AES) v period ikh stroitelstva, prednapryazheniya i ispytaniya [Geodetic Support for Monitoring the Technical Condition of Protective Sealed Shells of Nuclear Power Plants (NPPs) during their Construction, Pre-Stress and Testing] [the collection of articles following the results of scientific and technical conferences. Release 7 (in two parts). - Ch1. - M.: MIIGAiK / annex to the "Geodesy and Aerophotography" magazine №6], 2014. p. 19–23. (in Russian)
- [9] Pimshin Yu.I., etc. Sposob opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik sooruzheniy [Way of Definition of Construction Deformation Characteristics]. Patent RF, №2426089, 2011. (in Russian)

- [10] Pimshin Yu.I., etc. Sposob opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik zashchitnoy germetichnoy obolochki [Way of Definition of Deformation Characteristics of a Protective Tight Cover]. Patent RF, №2546990, 2015. (in Russian)
- [11] Pimshin Yu.I., etc. Sposob otsenki ekspluatatsionnoy nadezhnosti zashchitnoy germetichnoy obolochki reaktornogo otdeleniya AES [Method for Assessing the Operational Reliability of the Protective Hermetic Shell of the Nuclear Power Plant Reactor Compartment]. Patent RF, № 2577555, 2016. (in Russian)
- [12] Programma naturnyh nablyudenij za zashhitnoj obolochkoj energobloka №3 Rostovskoj AES v period vozvedeniya, prednapryazheniya, priyomo-sdatochnyx ispytanij i ekspluatacii [The program of natural supervision over the Rostov NPP power unit № 3 protective cover during construction, pretension, acceptance tests and operation]. M. Pub. OAO «Atomtexenergo» [JSC Atomtekhenergo], 2011. (in Russian)
- [13] Normy proektirovaniya zhelezobetonnyh konstrukcij lokalizuyushhih sistem bezopasnosti atomnyh stancij. PNAE G-10-007-89 [Norms of design of ferroconcrete designs of the localizing security systems of nuclear power plants. PNAE G-10-007 89]. Pub. Gospromatomnadzor SSSR [Gospromatomnadzor of the USSR], 1991. (in Russian)
- [14] Medvedev V.N., Ulyanov A.N., Strizhov V.F., Kiselev A.S. Analiz rezultatov predvaritelnogo napryazheniya zashhitnoj obolochki e'nergobloka № 3 Rostovskoj AES [Analysis of results of preliminary tension of a protective cover of the Rostov NPP power unit № 3]. Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoj energetiki [Safety, efficiency and economy of nuclear power]: tez. Devyatoj mezhdunar. nauch.-tehn. konf.: plenarnye i sekcionnye doklady. MNTK [theses of the IX international scientific and technical conference: plenary and section reports] 2014, Moscow, May 21–23, 2014. M. 2014, pp. 290–295. (in Russian)
- [15] Karpenko N.I. Obshhie modeli mexaniki zhelezobetona [General models of mechanics of reinforced concrete]. M. Pub. Strojizdat [Stroyizdat], 1996, ISBN 5-274-01682-0, 416 p. (in Russian)

Geometric Parameter Monitoring of Nuclear Power Plant Protective Shell During Prestressing, Testing and Its Technical State Determining

Yu.I. Pimshin*1, G.A. Naumenko**2, S.M. Burdakov*3, Yu.S. Zabaznov*4

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

e-mail: yipimshin@mephi.ru
ORCID: 0000-0001-6610-8725
WoS ResearcherID: J-6791-2017
e-mail: SMBurdakov@mephi.ru
ORCID iD: 0000-0002-8599-6008
WoS ResearcherID: F-6903-2017
e-mail: Jur-rik@mail.ru
ORCID iD is 0000-0003-1856-5221
Your ResearcherID is: V-3311-2017

** Don state technical university,
Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, Rostov region, Russia, 344000

² e-mail: geodez@aaanet.ru
ORCID: 0000-0002-7512-4687
WoS ResearcherID: J-7170-2017

Abstract – The paper considers the estimation theory of the protective hermetic shell technical condition and the experience of using the mobile geodetic diagnostic system at the Rostov Nuclear Power Plant Unit No. 4. The results of a regular built-in system designed for determining and evaluating the stress-strain state of protective hermetic shells during the take-and-take period and operation are compared. They are compared with the results of the geodetic system obtained at the same stages of the protective hermetic shell.

Keywords: protective hermetic shell, technical condition, prestressing, testing, monitoring, mobile geodetic diagnostic system, stress-strain state evaluation.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039:621.18

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ШИРМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА К РЕАКТОРУ ВВЭР

© 2017 А.М. Беседин, В.М. Коваленко, С.Ю. Чеснакова, А.Ю. Смолин

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

В работе приведены расчетные и экспериментальные исследования по определению параметров вибрации эвольвентных ширм на полномасштабной (по высоте трубчатки) воздухо-водяной модели вертикального парогенератора. Определен ресурс эвольвентных ширм.

Цель работы – определение вибрационных характеристик и ресурса парогенерирующих труб.

Ключевые слова: виброустойчивость, эвольвентные ширмы, трубный пучок, турбулентность, срыв вихрей, гидроупругое взаимодействие, собственная частота, спектр частот, напряжения.

Поступила в редакцию: 30.11.2017

ВВЕДЕНИЕ

Эвольвентные ширмы – перспективный тип теплообменной поверхности, применение которой в вертикальных парогенераторах обеспечивает снижение металлоемкости аппарата, позволяет создавать плотноупакованные трубные пучки, характеризующиеся равномерным заполнением поперечного сечения, постоянным зазором между ширмами, что дает возможность уменьшить неравномерность теплогидравлических характеристик по сечению [1]. В сравнении с радиальными ширмами диаметр трубчатки уменьшается в 1,3 раза, масса одного погонного метра корпуса аппарата – в 1,7 раза. Проходное сечение по второму контуру – в 2,3 раза, что увеличивает коэффициент теплоотдачи на экономайзерном участке в 1,6 раза.

Как показывает опыт эксплуатации АЭС [2], при работе теплообменного оборудования возникают гидродинамические возбуждаемые вибрации различных его элементов. Наименее устойчивые в вибрационном соотношении являются трубные пучки парогенераторов. Этот факт обуславливает необходимость всестороннего исследования вибрации перспективных типов теплообменных поверхностей, которые еще не использовались на практике, в том числе эвольвентных ширм.

В данной работе были проведены расчетно-экспериментальные исследования вибронадежности эвольвентных ширм различных конфигураций. Оценка вибронадежности выполнялась, прежде всего, из условия исключения резонансных колебаний ширм. Задача решена расчетно-экспериментальным методом, предусматривающим опытное определение параметров вибрации: виброускорения, частоты амплитуды смещения и расчет максимального знакопеременного изгибного напряжения трубок.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования выполнены на пятимегаватной модели трубчатки вертикального парогенератора электрической мощностью 250 МВт для реактора ВВЭР-1000.

Модель конструктивно выполнена из трех эвольвентных ширм, расположенных в сегментном канале из двух эвольвентных боковых стенок и двух крайних стенок с радиусом равным соответственно радиусу обечайки опускного участка и радиусу коллектора теплоносителя. В качестве пароводяной смеси, движущейся в межтрубном пространстве, использовалась смесь воздуха и воды. Она была смонтирована на стенде экспериментальной базы ВНИИАМ (г. Москва).

В качестве датчиков использовались двухкомпонентные пьезоакселерометры типа 2ПА-I5 с усилителями зарядов У35-2, изготовленные и откалиброванные в отделе ОНМИМ НПО ЦНИИТМАШ. Они вырабатывают электрический сигнал (напряжение), пропорциональный по амплитуде ускорению. Максимально допустимая температура для датчика равна 350 °C. В датчике расположены два пьезоэлемента, повернутые относительно друг друга на 90°C, что обеспечивает измерение вибрации в двух взаимно перпендикулярных направлениях [3, 4]. Схема расположения датчиков на трубчатке и их ориентация в пространстве приведены на рисунке 1.

На модели, состоящей из трех полномасштабных ширм, были установлены пять датчиков: три — на трубчатке (средней ширме) и два — на раздающем и сорбирующем коллекторах.

Электрический сигнал от датчика усиливался с помощью усилителя заряда УЗ 5-2, подключенного к двухполярному стабилизированному источнику питания (± 6 В). Датчики соединялись с клеммными коробками кабелем КТМС, а они, в свою очередь, с усилителями — антивибрационными проводами. Коэффициент преобразования ускорения движения датчика в выходное напряжение усилителя зарядов для всех десяти каналов измерения равен 2 мВ/м· c^2 .

Виброускорение связано с выходным напряжением усилителя и коэффициентом преобразования K зависимостью:

$$a = \frac{U_{\text{вых}}}{K}.$$

Сигналы с усилителей регистрировались тремя способами.

При определении параметров вибрации сводных колебаний — с помощью шлейфового осциллографа HII5 с предварительно включенным десятиканальным устройством BBM-I3I, предназначенным для оценки уровня сигналов, поступающих с усилителя и выбора масштаба измерения, т.е. регулирования тока шлейфа гальванометра (выбора поля записи). Скорость движения ленты фотобумаги выбиралась такой, чтобы соседние пики гармоник не накладывались друг на друга. В опытах эта скорость была равна 5 м/с.

Сигналы свободных колебаний, а также вынужденных, регистрировались и с помощью измерительно-регистрирующего комплекса, электрическая структурная схема которого показана на рисунке 2.

Коммутатор аналоговых сигналов предназначен для выбора одного из 16-ти измерительных каналов и передачи аналогово сигнала на вход аналогово-цифрового преобразователя.

Аналогово-цифровой преобразователь АЦП-Ф4222 предназначен для выдачи десятиразрядного цифрового кода в буферную оперативную память.

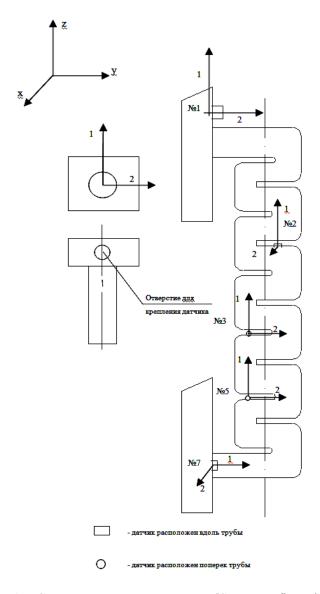


Рис. 1. – Схема расположения датчиков [Sensor configuration]

Буферная оперативная память предназначена для временного хранения ІбК десятиразрядных слов.

Узел управления синхронизации организует работу всей системы в зависимости от выбранного режима.

Генератор сигналов Γ 5-54 предназначен для задания временных интервалов съема аналоговых данных.

Узел сопряжения предназначен для подключения буферной памяти или аналогоцифровой клавиатуры к устройству подготовки данных.

Клавиатура служит для ввода аналого-цифровой информации.

Устройство подготовки данных предназначено для непосредственной записи на магнитную ленту информации, введенной посредством клавиатуры или из буферной памяти.

Максимальная частота опроса, задаваемая генератором импульсов, $50 \cdot 10^3$ Гц. Объем памяти устройства равен 16000 измерений. Продолжительность записи одного сигнала равна $0.2 \cdot 10^{-4}$ сек. Длительность полного заполнения оперативной памяти равна 0.32 сек. Для считывания данных с магнитной ленты и ввода их в оперативную память ЭВМ была разработана специальная программа.

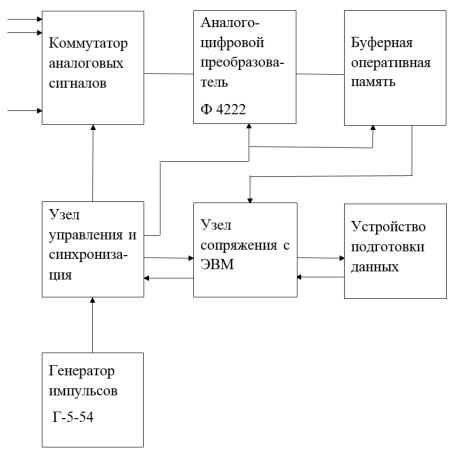


Рис. 2. – Электрическая структурная схема измерительно-регистрирующего комплекса [Electrical structural scheme of the measuring and recording complex]

В режиме вынужденных колебаний ширм одновременно с записью сигналов в измерительном комплексе выполнялись замеры частоты и выходного напряжения с помощью анализатора спектра С4-48.

При определении собственных частот колебания возбуждались в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Параметры вибрации определялись в режимах:

- свободных колебаний;
- генерации пара с нагрузками 50, 80 и 100%;
- течения среды только по первому контуру с нагрузками 50 и 100%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Экспериментальные данные для первых гармоник свободных колебаний, полученные с помощью осциллографа, приведены в таблице 1.

Характерны очень высокие, в сравнении с радиальными ширмами, частоты колебаний: от 1100 до 3720 Гц. Для радиальных ширм частоты первых гармоник находятся в диапазоне 10-200 Гц. Такое отличие объясняется большей жесткостью эвольвентых ширм, что обеспечивается конструкцией их крепления, а также конструкцией модели ширмы. Конструктивно она выполнена полномасштабной по высоте и примерно в 5 раз меньше по ширине и соединена с кожухом, что увеличивает ее жесткость.

Номер	Номер	Направление	Направление	Декремент	
датчика	канала	канала	удара	затухания	Частота, Гц
1	2	y	y	54,3	2500
2	1	Z	X	14,4	3730
2	1	Z	Z	10,2	2240
2	2	X	X	19,1	1720
5	1	Z	Z	39,9	2420
5	2	y	y	58,6	3170
7	1	у	Z	11,9	1100

Таблица 1. — Свободные гармоники при вертикальном расположении ширм [Free harmonics at vertical screen configuration]

Во ВНИИАМ была выполнена реконструкция модели, вследствие чего жесткость ширм уменьшилась. Параметры свободных колебаний были определены с помощью измерительного комплекса. При обработке данных сигнал снимался с датчиков и записывался в форме:

$$U_{\text{BMX}}(t) = \sum_{K=1}^{\infty} \left[C_K cos(ft) + C_C sin(ft) \right] + f_0,$$

где C_K и C_C – коэффициенты Фурье; f – частота.

Из данных, представленных на рисунке 3, следует, что частота первых гармоник уменьшилась до $200~\Gamma$ ц.

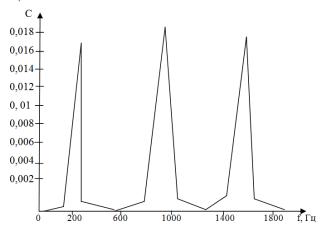


Рис. 3. – Зависимость коэффициентов Фурье от частоты [Fourier Coefficient Dependence on the Frequency]

В таблице 2 приведены параметры вибрации по первым гармоникам для режима циркуляции среды только по первому контуру.

При стопроцентной нагрузке основные частоты находятся в диапазоне от 370 до 470 Γ ц, а при нагрузке 50 % - от 370 до 660 Γ ц. Амплитуды смещения уменьшаются примерно в 2 раза при переходе от стопроцентной к пятипроцентной нагрузке.

В режиме генерации пара количество гармоник становится больше, частота высших достигает 2000 Гц. В режиме прокачки первого контура частота высших гармоник равна 1000-1400 Гц.

Частота основной гармоники в режиме генерации пара равна $290\pm20~\Gamma$ ц, т.е. уменьшается на $80\text{-}190~\Gamma$ ц, а амплитуда возрастает с 0,054~до~0,07~мм.

В опытах с генерацией пара не обнаружено влияния нагрузки на параметры вибрации.

Нагрузка	Номер	Номер	Частота,	Виброускорение,	a/a	Амплитуда
%	датчика	канала	Гц	$^{\rm M}/_{\rm C^2}$	a/g	A, mm
	7	1	480	11,0	1,1	0,048
	7	2	480	15,0	1,5	0,065
100	5	1	470	12,0	1,2	0,054
	5	2	470	9,6	0,98	0,043
	1	1	370	12,0	1,2	0,055
	1	2	660	13,5	1,4	0,031
50	3	2	370	12.75	1,3	0,093
50	7	1	660	12,0	1,2	0,028

Таблица 2. — Опытные и расчетные данные по вибрации модели при прокачке среды только по первому контуру [Experimental and calculated data on model vibration when pumping the field along the first contour only]

ОЦЕНКА ВИБРОПРОЧНОСТИ ТРУБЧАТКИ

10,5

1,1

0.024

660

Прочность трубчатки определена по максимальному значению виброскорости и напряжения [5, 6]:

$$\sigma_{max} = v_{max} \sqrt{C \cdot \frac{E \cdot \rho}{g}},$$

где σ_{max} – максимальное значение знакопеременного напряжения, МПа;

 v_{max} – максимальное значение виброскорости, м/с;

C – коэффициент, учитывающий способ заделки и крепления трубок;

E — модуль упругости материала трубок, МПа;

 ρ – плотность материала трубок, кг/м³.

Максимальная виброскорость равна v_{max} =1050 мм/с.

В первом приближении коэффициент C был принят равным 3 [7]. Рассчитанное для стали 12X18H10T значение $\sigma_{max}=$ 2,5 МПа.

Максимальный предел выносливости для нее равен 100 МПа. В соответствии с работами [8, 9] знакопеременные напряжения с амплитудой, равной менее половины минимального предела выносливости стали (50 МПа) не приводят к повреждению конструкции.

Вибропрочность трубчатки была оценена по методике, приведенной в работе [10]. Допускаемая амплитуда вибронапряжений в металле трубок равна:

$$[\sigma_a] = \frac{\sigma_{-1}^t \cdot k}{n_\sigma \left(1 + \frac{\sigma_{-1}^t}{\sigma_b^t} \cdot \frac{1+r}{1-r}\right)} = \frac{30,4 \cdot 1,2}{10 \cdot \left(1 + \frac{30,4}{392} \cdot \frac{1+0,6}{1-0,6}\right)} = 2,9 \text{ M}\Pi a.$$

Предел выносливости при симметричном чикле рассчитывается по формуле Мэнсона:

$$\sigma_{-1}^t = 1.75 \left(\frac{\sigma_b^t}{N^{0.12}} \right) = 1.75 \left[\frac{392}{(18.9 \cdot 10^{10})^{0.12}} \right] = 30.4 \text{ M}\Pi a.$$

Число циклов нагружения для ресурса трубчатки равного 30 лет:

$$N = 0.946 \cdot 10^9 \cdot f = 0.946 \cdot 10^9 \cdot 200 = 18.9 \cdot 10^9,$$

где f – частота вибрации ширм, Γ ц.

Коэффициент асимметрии ширм цикла:

$$r = \frac{(\sigma_{max} - 2\sigma_a)}{\sigma_{max}} = \frac{(147.9 - 2 \cdot 30.4)}{147.9} = 0.6.$$

Максимальное напряжение цикла:

$$\sigma_{max} = \sigma_{cp} + \sigma_a = 117.5 + 30.4 = 147.9 \text{ M}\Pi a$$
,

где принято: $\sigma_a = \sigma_{-1}^t$, $\sigma_{\rm cp} = [\sigma_{\scriptscriptstyle \rm H}]$.

Коэффициент запаса по напряжению принят равным 10.

Коэффициент напряжений k=1,2.

Из сравнения полученных данных следует, что максимальное значение знакопеременного напряжения практически не превышает допускаемую амплитуду вибронапряжений в металле трубок $[\sigma_a]$, которая рассчитана для ресурса трубок равного 30 лет и десятикратного запаса по напряжению [11].

ВЫВОДЫ

- 1. Согласно результатам расчетного исследования, частота свободных колебаний L образных эвольвентных ширм слабо зависит от длины ее консольной части. Так, при увеличении длины с 0,5 до 2 м частота изменяется на 25-30 %. Длина ширмы в значительной мере влияет на собственную частоту. При увеличении длины ширмы с 4 до 10 м, т.е. в 2,5 раза собственная частота снижается более чем в 6 раз как в случае свободной ширмы, так и с закреплением. Собственная частота ширмы линейно зависит от числа трубок. Амплитуда вынужденных колебаний значительно возрастает с уменьшением числа трубок в ширме. Так при длине ширмы, равной 6 м, и отношении частоты возбуждающей силы к собственной частоте, равной 0,9, уменьшение числа трубок с 75 до 5 приводит к увеличению амплитуды в 5 раз для случая закрепленной ширмы и в 1000 раз для свободной ширмы.
- 2. Оценка вибропрочности L образных эвольвентных ширм выявила отсутствие резонансных колебаний ширм на экономайзерном и испарительном участках парогенератора.
- 3. Собственная частота эвольвентных традиционных ширм, определенная экспериментально на пятимегаватной модели парогенератора, равна 200 Гц. Расчетные частоты гидродинамического возбуждения не превышает нескольких десятков Гц, что свидетельствует о достаточной отстройке ширм модели от резонанса.
- 4. Проведенные исследования показали, что при рабочих условиях модели знакопеременные напряжения в трубках значительно меньше допустимых, что свидетельствует о достаточной вибропрочности конструкции в течение периода эксплуатации.
- 5. Эвольвентные ширмы в сравнении с радиальными обладают большей жесткостью, что повышает их виборопрочность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Петухов, Б. С. и др.* Теплообмен в ядерных энергетических установках [Текст] / Б.С. Петухов, Л.Г. Генин, С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. М.: Изд.-во МЭИ, 2003. 548 с.
- 2. *Зорин, В.А.* Атомные электростанции [Текст] / В.А. Зорин. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 672 с.

- 3. *Дайчак, М.Л. и др.* Методы и средства натурной тензометрии [Текст] / М.Л. Дайчак, М.И. Пригоровский, Г.Х. Хуршудов. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
- 4. Вибрация в технике. Справочник под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение. 1980.
- 5. РТМ 108.302.03-86. Парогенераторы АЭС. Расчет вибрации теплообменных труб [Текст]. / Л.: НПО ЦКТИ, 1987. – 74 с.
- 6. *Корецкий, С.А.* Оптимальный выбор конструкционных параметров прямотрубных теплообменных аппаратов повышенной вибропрочности [Текст] / Корецкий С.А.: дисс... канд. техн. наук. М., 2012.
- 7. *Аксельрод*, $A.\Phi$. u ∂p . Экспериментальная обработка и расчет вибрационной устойчивости труб вертикального парогенератора [Текст] / $A.\Phi$. Аксельрод, Б.С. Фокин // Энергомашиностроение. 1984. Neq 12. C. 25—28.
- Фокин, Б.С. и др. Вибрации теплообменных труб в завихренном однофазном потоке [Текст] / Б.С. Фокин, Е.Н. Гольдберг, А.Ф. Аксельрод // Энергомашиностроение. 1984. №12. С. 21–24.
- 9. *Каплунов, С.М. и др.* Вибрация трубных пучков под действием поперечного потока жидкости [Текст] / С.М. Каплунов, Т.Н. Фесенко, С.А. Корецкий // Проблемы машиностроения и надежности машин. − 2008. − №6. − С. 29–36.
- 10. РТМ 108.031.05-84. Оборудование теплообменное АЭС. Расчет тепловой и гидродинамический [Текст]. / Л.: НПО ЦКТИ, 1985. 87 с.
- 11. ПНАЭ Г-7-002-86 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст]. / М. Энергоатомиздат. 1989.

REFERENCES

- [1] Petuxov B.S., Genin L.G., Kovalev S.A., Solovjev S.L. Teploobmen v yadernyh energeticheskih ustanovkah [Heat transfer in nuclear power plants]. M. Pub. Izdatelstvo MEI [MPEI Publishing house], 2003, ISBN 5-7046-0843-4, 548 p. (in Russian)
- [2] Zorin V.A. Atomnye elektrostancii [Nuclear power plants]. M. Pub. Izdatelskij dom MEI [MPEI Publishing house], 2012, ISBN 978-5-383-00604-7, 672 p. (in Russian)
- [3] Dajchak M.L. Prigorovskij M.I., Hurshudov G.X. Metody i sredstva naturnoj tenzometrii [Methods and means of full strainometry]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical engineering], 1989, 240 p. (in Russian)
- [4] Vibratciia v tekhnike. Spravochnik pod red. V.V. Bolotina. M.: Mashinostroenie. 1980.
- [5] RTM 108.302.03-86. Parogeneratory AES. Raschet vibracii teploobmennyx trub [RTM 108.302.0386. Steam generators of nuclear power plants. Calculation of vibration of heat exchange tubes]. Leningrad. Pub. NPO CKTI [NPO CKTI], 1987, 74 p. (in Russian)
- [6] Koretckii S.A. Optimalnyi vybor konstruktcionnykh parametrov priamotrubnykh teploobmennykh apparatov povyshennoi vibroprochnosti [Optimal choice of design parameters for direct heat pipe heat exchangers of increased vibration resistance]. M. 2012. (in Russian)
- [7] Akselrod A.F., Fokin B.S. Eksperimentalnaia obrabotka i raschet vibratcionnoi ustoichivosti trub vertikalnogo parogeneratora [Experimental processing and calculation of vibration stability of vertical steam generator tubes]. Ehnergomashinostroenie [Power Engineering], 1984, №12, pp. 25–28. (in Russian)
- [8] Phokin B.S., Goldberg E.N., Akselrod, A.F. Vibracii teploobmennykh trub v zavikhrennom odnofaznom potoke [Vibrations of Heat-Exchange Tubes in Swirling Single-Phase Flow]. Ehnergomashinostroenie [Power Engineering], 1984, №12, pp. 21–24. (in Russian)
- [9] Kaplunov, S.M., Fesenko, T.N., Koreckijj, S.A. Vibracija trubnykh puchkov pod dejjstviem poperechnogo potoka zhidkosti [Vibration of Tube Bundle under the Transverse Fluid Flow Action]. Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin [Problems of Machine Building and Machine Reliability], 2008, №6, pp. 29–36. (in Russian)
- [10] RTM 108.302.03-86. Parogeneratory AEhS. Raschet vibracii teploobmennykh trub [NPP Steam Generators. Calculation of Heat Exchange Tube Vibration]. Leningrad, 1987, 74 p. (in Russian)
- [11] PNAE G-7-002-86 Normy rascheta na prochnost oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [Norms for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1989, 350 p. (in Russian)

Experimental Determination of Vibration Characteristics of Vertical Steam Generator Involute Screens for WWER Reactor

A.M. Besedin, V.M. Kovalenko, S.Yu. Chesnakova, A.Yu. Smolin

Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360 e-mail: VITIkafAE@mephi.ru

Abstract – The work shows out calculations and experimental studies on the determination of the vibration parameters. The project of a full-scale air-water model of a vertical steam generator has been completed. The resource of involute screens is determined.

The objective of the work is to determine the vibration characteristics and service life of steam generating pipes, issue recommendations on improving the vibration resistance of the tube bundle.

Keywords: Vibration resistance, involute screens, tube bundle, turbulence, vortex shedding, hydroelastic interaction, natural frequency, frequency spectrum, stresses.

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

УДК 621.039.58: 378.1

ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КУЛЬТУРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ВЫПУСКНИКОВ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА РАБОТУ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

© 2017 Ю.А. Евдошкина, В.А. Руденко

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

Представлены результаты пятилетней работы авторов по внедрению курса «Культура безопасности» в образовательный процесс вуза, которые позволили выявить ряд педагогических условий, способствующих эффективному формированию культуры безопасности у студентов. Что позволило сформировать практико-ориентированную педагогическую технологию с внедрением современных форм и методов преподавания, актуальных современным изменениям и направлениям развития атомной отрасли. (актуальных современных изменений, аправленныхз на развитие атомной отрасли).

Ключевые слова: культура безопасности; педагогическая технология; формирование культуры безопасности в вузе.

Поступила в редакцию: 08.12.2017

Активная деятельность человека в современных условиях придала особый смысл проблемам безопасности. Разработке концепции культуры безопасности и внедрению её на опасных производствах отдается приоритет. Персонал атомных станций постоянно участвует в программах обучения, направленных на развитие и совершенствование культуры безопасности, однако, вузы, осуществляющие подготовку специалистов для атомной отрасли, в учебные планы не включают специальных курсов по формированию компетенций студентов по культуре безопасности. Что указывает на явное противоречие между пониманием необходимости обеспечения безопасности и отсутствием общности взглядов на решение этой проблемы, недостаточной разработанностью педагогических технологий формирования культуры безопасности студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли.

В связи с этим возникает необходимость поиска новых подходов, которые позволили бы сделать более эффективным образование студентов в области культуры безопасности в период их обучения в вузе и активной подготовке к профессиональной деятельности на предприятиях ГК «Росатом».

С учетом актуальности обозначенной проблемы и ее практической значимости на протяжении 5 лет в ВИТИ НИЯУ МИФИ ведется преподавание курса «Культура безопасности» и одновременно проводится исследование в направлении поиска новых подходов, которые позволили бы сделать более эффективным образование студентов в области культуры безопасности в современных условиях.

В соответствии с чем, нами проведен анализ отечественной и зарубежной психолого-педагогической, методической и специальной литературы по данной

проблеме; определены структурные компоненты, критерии оценки и уровни сформированности культуры безопасности у студентов; разработана педагогическая модель формирования культуры безопасности у студентов, опираясь на современные интерактивные технологии обучения; разработан учебно-методический комплекс дисциплины «Культура безопасности».

Теоретическая и практическая значимость данного исследования заключается в том, что его результаты вносят вклад в развитие теории культуры безопасности: расширены существующие в педагогике представления о культуре безопасности и способах ее формирования у студентов, разработана педагогическая модель и выявлены педагогические условия формирования культуры безопасности в вузе; студенты во время прохождения практики и начала профессиональной деятельности имеют представления о культуре безопасности в атомной отрасли и готовы к соблюдению принципов, приемов и методов культуры безопасности на предприятиях атомной отрасли.

В настоящее время в атомной энергетике невозможно представить обеспечение безопасности без «сильной культуры безопасности», которая в документе МАГАТЭ INSAG-13 определена в качестве цели, для которой создается вся система управления обеспечением безопасности [1].

Поэтому основным, данном исследовании, нами был определен компетентностный подход в формировании культуры безопасности студентов, в соответствии с общими подходами к определению культуры безопасности при эксплуатации АЭС, с теми компетенциями по культуре безопасности, которые должны быть сформированными у персонала, с Концепцией образовательной политики в области безопасности и с теми особенностями, в которых развивается процесс обучения в вузе в настоящее время.

Результаты исследований и практических разработок в данном направлении представлены ежегодными публикациями по теме:

- в 2012 году нами были изучены и проанализированы вопросы культуры безопасности в контексте общечеловеческой культуры [2]; социокультурные ориентиры современной молодежи по вопросам культуры безопасности в атомной отрасли [3]; культура безопасности в атомной отрасли в представлениях студентов [4] и определены направления реализации компетентностного подхода в воспитании культуры безопасности в вузе [5];
- в 2013 году рассмотрели вопрос о формирование культуры безопасности личности как нового направления образовательного процесса в техническом вузе[6]; ценностной составляющей культуры безопасности [7]; практические методы формирования приверженности культуре безопасности на индивидуальном уровне у студентов вуза [8];
- в 2014 году был проведен опрос жителей г. Волгодонска по выявлению значимых социально-психологических характеристик работников атомных станций как гаранта обеспечения безопасности [9]; изучена мотивационная составляющая личности в культуре безопасности [10];
- в 2015 году был обобщен вопрос реализации интерактивных технологий обучения в процессе преподавания дисциплин, направленных на обеспечение безопасного функционирования [11]; рассмотрен деонтологический аспект культуры безопасности в профессиональной деятельности работников атомной отрасли [12];
- в 2016 году был проанализирован вопрос культуры безопасности в системе ценностей Госкорпорации «Росатом» [13]:
- в 2017 году нами разработана и апробирована «Педагогическая модель формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в

атомной отрасли» (рис. 1) [14].

Пятилетний опыт работы и исследование в данном направлении, возможности преподавания курса Культура безопасности работникам АЭС на факультете повышения квалификации и студентам вуза, позволили нам разработать и внедрить практико-ориентированную технологию обучения Культуре безопасности студентов вуза, ориентированных на работу в атомной отрасли.

В контексте образовательных проблем моделирование формирования культуры безопасности у студентов рассматривается как определенная педагогическая система, направленная на качество профессиональной деятельности, формируемое в образовательной сфере в рамках курса «Культура безопасности».

Главная цель преподавания курса заключается в том, чтобы дать студентам знания, которые будут способствовать формированию у них основ культуры безопасности, системы ценностных ориентаций и идеалов, позволяющих им развивать как личностное самосознание, так и их практическое применение. Так как, практика реализации проекта показывает, что молодые специалисты обладают достаточно высоким уровнем знаний в вопросах безопасности, но не всегда могут эффективно применять их на практике.

При реализации курса «Культура безопасности» считаем важным активное внедрение инновационных методик и интерактивных технологий, представляющих собой моделирование профессиональной деятельности будущего выпускника. Более того, в отношении вопросов культуры безопасности интерактивные технологии должны быть приоритетными, так как они воздействуют не только на сознание студента, но и на его чувства, эмоции, волевые качества, что значительно активизирует процесс усвоения учебного материала по курсу. Именно они способствуют формированию профессиональных навыков, глубоких знаний в области культуры безопасности, нацеливают на формирование личности с творческим типом мышления, инициативной и самостоятельностью в принятии решений.



Рис. 1. – Модель формирования культуры безопасности у студентов вуза в рамках дисциплины «Культура безопасности» [The model of safety culture formation among university students within the "Safety culture" discipline]

Формирование культуры безопасности подразумевает формирование готовности предупреждать и преодолевать опасные ситуации, сочетание личной безопасности с безопасностью окружающих. В связи с чем, основными направлениями деятельности по формированию культуры безопасности являются: выработка мотивации у студентов к культуре безопасности; ориентация на овладение умениями и навыками безопасного поведения на будущем рабочем месте; воспитание личностных качеств, необходимых в работе по предупреждению и преодолению опасных ситуаций; психологическая подготовка к безопасному поведению [15].

при курса Поэтому реализации «Культура безопасности» наряду академическими формами обучения используются такие инновационные методики и интерактивные технологии, как: лекции-дискуссии, ролевые и деловые игры, тренинги, занятия с использованием ситуационных задач и проективного тестирования, различные творческие задания, мастер-классы с приглашением ведущих специалистов в области культуры безопасности Ростовской атомной станции. В завершении изучения разделов предусмотрено проведение лекций-конференций, позволяющих студентам развить навыки публичных выступлений и ведения дискуссии.

Лекционные и практические занятия проводятся с применением большого количества видеозаписей, учебных фильмов. Таким образом, студенты помимо теоретического материала, имеют возможность увидеть, как на практике используются приобретенные навыки или могут допускаться ошибки от пренебрежения или несоблюдения принципов культуры безопасности.

Практикой аудиторных занятий апробирована такая система организации работы студентов, как тренинги. Этот метод представляет собой комплекс ролевых упражнений, включающий различные, зачастую, противоположные интересы его участников с необходимостью принятия каких-либо решений по окончании или в ходе Тренинги, используемые на практических занятиях по «Культуре безопасности», помогают формировать такие ключевые квалификации, способности, толерантность, коммуникативные умение работать команде, самостоятельность мышления и т.д. Используемые тренинговые упражнения характеризуются направленностью на снятие определенных практических проблем, приобретение навыков выполнения конкретных приемов деятельности в соответствии с принципами культуры безопасности.

Использование творческих заданий, разных по степени сложности, позволяет образовательном применить процессе индивидуальный дифференцированный подход к студентам. Творческие задания – требуют от студентов не простого воспроизводства информации, а творчества, поскольку задания содержат больший или меньший элемент неизвестности и имеют, как правило, несколько подходов. Творческое задание составляет содержание, основу любого интерактивного метода, придает смысл обучению, мотивирует студентов. Неизвестность ответа и возможность найти свое собственное «правильное» решение, основанное на персональном опыте или опыте своих работников АЭС, позволяют создать фундамент для сотрудничества, сообучения, общения всех участников образовательного процесса, включая преподавателя. Выбор творческого задания сам по себе тоже является творческим заданием, поскольку требуется найти такое решение, которое отвечало бы следующим критериям: задание не должно иметь однозначного и односложного ответа или решения; должно являться практическим и полезным для студентов; должно вызывать интерес у студентов; должно максимально служить целям обучения, формировать компетенции по культуре безопасности.

В качестве примера можно привести творческое задание «Создание умной карты». Это задание используется при необходимости на любом практическом занятии для усвоения наиболее сложных понятий, концепций, систем. В качестве контроля самостоятельной работы студентов составляются умные карты по темам: «Личная культура безопасности» и «Нарушения в работе персонала». Данные темы предполагают индивидуальный подход студента. Составление умной карты доставляет студентам не только пользу, но и удовольствие. В чем-то это необычная, близкая к игровой деятельность и, в то же время, весьма эффективный "взрослый" способ работы с информацией. Студенты оформляют краткие (на практическом занятии) или расширенные умные карты по заданной тематике, которые они создали дома, размышляя в одиночестве или привлекая к творчеству близких или друзей.

Особой разновидностью творческих заданий можно считать составление схем аварий, несчастных случаев на производстве, нарушений в работе персонала. Это позволяет успешно систематизировать полученные на лекции знания. Наиболее эффективным методом работы со схемами является следующий: студентам предлагается небольшая выдержка из протокола конкретного события (аварии, нарушения и т.д.) и пустой бланк, который содержит основные элементы анализа ситуации («подсказки»). Например, для темы «Причины нарушений в работе персонала» предлагается при помощи специальных обозначений выбрать и показать во взаимосвязи: коренную причину, непосредственную причину, сопутствующий фактор, корректирующие меры по событию и т.д. Тема «Оценка риска в профессиональной деятельности» предполагает указание на бланке в качестве «подсказки» основных шагов методики оценки риска. Задача студента состоит в том, чтобы, применив теоретические знания в работе с конкретной производственной ситуацией, составить правильную схему. Студентам может быть предложено составление заключения комиссии по расследованию аварии или нарушения, в котором дается полная или частичная оценка рассматриваемого события.

Программа обучения способствует формированию установки у студентов, что вопросам безопасности должно уделяться подобающее внимание. В процессе обучения: характеризуются положения концепции культуры основные безопасности; определяются уровни развития культуры безопасности; объясняются факторы и личные влияющие на культуру безопасности; формируются соответствующие навыки проявления компетенций культуры безопасности. Для того, чтобы быть способными своевременно принимать трудные и критические решения в непредвиденных обстоятельствах, студенты, планирующие работать в атомной энергетике, должны не только знать, «что и как», но и знать «почему». Организуя обучение студентов курсу «Культура безопасности», воспитывая в них культуру безопасности, постоянно делается акцент, что подход к обеспечению безопасности жизни человека должен быть основан на принципе «предвидь и предупреди», а не на принципе «спаси и исправь».

Культура безопасности присуща многим профессиям, но, без сомнения, для работников атомной отрасли культура безопасности является профессионально смыслообразующим понятием. Культуре безопасности необходимо обучать как можно раньше, чем человек придет работать в отрасль. Формирование культуры безопасности означает воспитание у каждого человека, который только планирует свою работу в атомной энергетике и промышленности, такого состояния, при котором он окажется просто неспособным сделать какой—либо, даже малый шаг в ущерб безопасности.

Процесс обучения культуре безопасности важен, однако одного этого процесса недостаточно. Правильное отношение к безопасности формируется воздействием на сознание человека. Большое значение для формирования основ культуры безопасности у студентов имеет обстановка порядка и организованности в вузе, деятельность по профилактике вредных привычек.

Результаты работы по внедрению курса «Культура безопасности» позволили выявить ряд педагогических условий, способствующих эффективному формированию культуры безопасности у студентов с ориентацией преподавателя на прогрессивный индивидуально-творческой самореализации профессиональновариант педагогической деятельности и внедрением вариативных форм и способствующих построению различных траекторий развития учебного процесса.

В результате исследования проблемы заключающейся в необходимости формирования культуры безопасности у студентов и недостаточной разработанностью научно обоснованных подходов к ее формированию в условиях высшего образования, мы пришли к выводу, что формирование культуры безопасности у студентов представляет собой сложный педагогический процесс, он должен сочетать в себе целеполагание, проект и одновременно управление процессом на основе выявленных компонентов, критериев, моделей формирования, обеспечивающих, наряду с объемом сведений и полнотой усвоения учебного материала, способность обучаемых вступать в интеллектуальное, информационное, общественно-политическое, энергетическое и другие взаимодействия. Формирование культуры безопасности у студентов будет осуществляться эффективно при комплексном подходе и если, образовательный процесс выстроить в соответствии со специально разработанной педагогической моделью, учетом формирующего потенциала совокупности структурных компонентов: когнитивного компонента, деятельностного компонента, коммуникативного компонента, аксиологического компонента. Причем их взаимосвязь, координация в процессе формирования культуры безопасности основываются на аксиологическом компоненте, который обеспечивает качественный рост других критериев, установление более тесных связей между ними и, в результате, формирует культуру безопасности у студентов на более высоком уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Девисилов, В.А. Культура безопасности важнейший фактор устойчивого развития России (проект концепции национальной образовательной политики в области безопасности) [Электронный ресурс] / В.А. Девисилов. – [Б.м., б.г.]. – Режим доступа: URL: http://mhts.artinfo.ru/science/Devisilov/prezentacia2.pdf - 05.12.2017.
- Руденко, В.А. и др. Культура безопасности в контексте общечеловеческой культуры [Текст] / В.А. Руденко, Ю.А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 4(5). –
- Руденко, В.А. и др. Социокультурные ориентиры современной молодежи по вопросам культуры безопасности в атомной отрасли [Текст] / В.А. Руденко, Ю.А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – Спец. вып. (3). – С. 93–96.
- Руденко, В.А. и др. Культура безопасности в атомной отрасли в представлениях студентов [Текст] / В.А. Руденко, Ю.А. Евдошкина, И.Д. Полюхович // Ежегодная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна - 2012», Волгодонск, 24-28 апр. 2012 г.: материалы докл. - Волгодонск, 2013. - Ч. 2. - С. 64-70.
- Руденко, В.А. и др. Компетентностный подход в воспитании культуры безопасности в вузе [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. - 2012. -№ 2-3(4). – C. 136–140.
- Евдошкина, Ю.А. Формирование культуры безопасности личности как новое направление образовательного процесса в техническом вузе [Текст] / Ю.А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №2(7). – С. 92–94.
- Руденко, В.А. и др. Ценностная составляющая культуры безопасности [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. -2013. - №4(9). - C. 82-86.
- Руденко, В.А. и др. Практические методы формирования приверженности культуре безопасности на индивидуальном уровне у студентов вуза [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №1(6). – С. 100–103.
- Евдошкина, Ю.А. Значимые социально-психологические характеристики работников атомных станций как гарант обеспечения безопасности (по материалам опроса жителей

- г. Волгодонска) [Электронный ресурс] / Ю.А. Евдошкина // Безопасность ядерной энергетики: тез. докл. X Междунар. науч.-практ. конф., 28-30 мая 2014 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. Волгодонск : [Б. и.], 2014. 1 электрон. опт. диск (CD).
- 10. *Василенко, Н.П.* и др. Мотивационная составляющая личности в культуре безопасности [Текст] / Н.П. Василенко, В.А. Руденко // Глобальная ядерная безопасность. 2014. № 2(11). С. 135—141.
- 11. *Руденко, В.А. и др.* Реализация интерактивных технологий обучения в процессе преподавания дисциплин, направленных на обеспечение безопасного функционирования АЭС [Текст] / В.А. Руденко, Ю.А. Евдошкина // Научная сессия НИЯУ МИФИ 2015 : сб. тез. и ст. науч.-практ. конф., 16–20 февр. 2015 г. Волгодонск : ВИТИ НИЯУ МИФИ. С. 161–164.
- 12. *Василенко, Н.П.* Деонтологический аспект культуры безопасности в профессиональной деятельности работников атомной отрасли [Текст] / Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. 2015. №4(17). С. 129–132.
- 13. *Руденко, В.А.* Культура безопасности в системе ценностей Госкорпорации «Росатом» [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. 2016. №1(18). С. 118–122.
- 14. *Василенко, Н.П. и др.* Педагогическая модель формирования культуры безопасности выпускников, ориентированных на работу в атомной отрасли [Текст] / Н.П. Василенко, Ю.А. Евдошкина // Безопасность ядерной энергетики: тез. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф., 31 мая − 2 июня 2017 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. − Волгодонск: [Б.и.], 2017. ISBN 978-5-7262-2364-3

REFERENCES

- [1] Devisilov V.A. Kultura bezopasnosti vazhnejjshijj faktor ustojjchivogo razvitija Rossii (proekt koncepcii nacionalnojj obrazovatelnojj politiki v oblasti bezopasnosti) [The Safety Culture Is the Most Important Factor in Russia's Sustainable Development (the draft concept of a national educational security policy)]. Available at: http://mhts.artinfo.ru/science/Devisilov/prezentacia2.pdf (in Russian)
- [2] Rudenko V.A., Evdoshkina Yu.A. Kultura bezopasnosti v kontekste obshhechelovecheskojj kultury [Safety culture in the context of human culture]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, № 4(5), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 88–91. (in Russian)
- [3] Rudenko V.A., Evdoshkina Yu.A. Sociokulturnye orientiry sovremennojj molodezhi po voprosam kultury bezopasnosti v atomnojj otrasli [Sociocultural Reference Points of Modern Youth on Safety Culture in the Nuclear Industry]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, Specialny vypusk [Special Issue] (3), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 93–96. (in Russian)
- [4] Rudenko V.A, Evdoshkina Yu.A., Poljukhovich I.D. Kultura bezopasnosti v atomnojj otrasli v predstavlenijakh studentov [Safety Culture in the Nuclear Industry in the Representations of Students]. Ezhegodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Studencheskaja vesna 2012», Volgodonsk, 24–28 aprelja 2012 goda. Materialy dokladov [Annual scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists "Student Spring 2012", Volgodonsk, April 24-28. 2012: materials of the reports]. Volgodonsk, 2013, Chast [Part] 2, pp. 64–70. (in Russian)
- [5] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Kompetentnostnyjj podkhod v vospitanii kultury bezopasnosti v vuze [Competence approach in education of safety culture in University]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, №2-3(4), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 136–140. (in Russian)
- [6] Evdoshkina Yu.A. Formirovanie kultury bezopasnosti lichnosti kak novoe napravlenie obrazovatel'nogo processa v tekhnicheskom vuze [The formation of safety culture as a new direction of the educational process at a technical university]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2013, №2(7), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 92–94. (in Russian)
- [7] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Cennostnaja sostavljajushhaja kultury bezopasnosti [Value Component of Safety Culture]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2013, №4(9), pp. 82–86. (in Russian)
- [8] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Prakticheskie metody formirovanija priverzhennosti kulture bezopasnosti na individualnom urovne u studentov vuza [Practical methods for promoting safety culture at the individual level to the students of higher education institution]. Globalnaya

- yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2013, №1(6), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 100–103. (in Russian)
- [9] Evdoshkina Yu.A. Znachimye socialno-psikhologicheskie kharakteristiki rabotnikov atomnykh stanciji kak garant obespechenija bezopasnosti (po materialam oprosa zhitelejj g. Volgodonska) [Significant Socio-Psychological Characteristics of Employees of Nuclear Power Plants as a Guarantor of Security (based on the survey of residents of Volgodonsk)]. Bezopasnost yadernoji ehnergetiki. tezisy dokladov X Mezhdunarodnojj nauchno-prakticheskojj konferencii, 28–30 maja 2014 goda [Nuclear Power Safety: reports of X International. scientific-practical. Conf., May 28-30, 2014]. Volgodonsk, 2014. (in Russian)
- [10] Vasilenko N.P., Rudenko V.A. Motivacionnaja sostavljajushhaja lichnosti v kulture bezopasnosti [Individual's Motivational Component in Safety Culture]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2014, № 2(11), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 135-141. (in Russian)
- [11] Rudenko V.A., Evdoshkina Yu.A. Realizacija interaktivnykh tekhnologiji obuchenija v processe prepodavanija disciplin, napravlennykh na obespechenie bezopasnogo funkcionirovanija AEhS Implementation of Interactive Learning Technologies in the Teaching of Disciplines Aimed at Ensuring the Safe Operation of Nuclear Power Plants]. Nauchnaja sessija NIJaU MIFI – 2015: sbornik tezisov i stateji nauchno-prakticheskoji konferencii, 16–20 fevralja 2015 goda [Scientific session of the NRNU MEPhI - 2015: a collection of abstracts and articles of the scientific and practical conference, February 16-20. 2015]. Volgodonsk. Pub. VITI NIJaU MIFI, pp. 161-164.
- [12] Vasilenko N.P. Deontologicheskijj aspekt kultury bezopasnosti v professionalnojj dejatelnosti rabotnikov atomnoji otrasli [Safety Culture Deontological Aspect in Professional Activity of Nuclear Industry Personnel]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2015, №4(17), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 129–132. (in Russian)
- [13] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Kultura bezopasnosti v sisteme cennostejj Goskorporacii «Rosatom» [Safety Culture in Value System of «Rosatom» State Corporation]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №1(18), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 118–122. (in Russian)
- [14] Vasilenko N.P., Evdoshkina Yu.A. Pedagogicheskaya model formirovaniya kultury bezopasnosti vypusknikov, orientirovannyx na rabotu v atomnoj otrasli [Pedagogical forming model of safety culture in the graduating students oriented to work in atomic industry]. Bezopasnost' yadernoj e'nergetiki: tezisy dokladov XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii 31 maya – 2 iyunya 2017 g. [Nuclear Power Safety: materials of the XIII International Scientific and Practical Conference, 31, May – 2 June, 2017]. Volgosonsk, 2017, ISBN 978-5-7262-2364-3, Available at: http://nps.viti-mephi.ru/files/page/file/xiii_mnpk.zip (in Russian)

Pedagogical Model of Forming Safety Culture of Graduating Students Oriented to **Work in Atomic Industry**

Y.A. Evdoshkina*, V.A. Rudenko**

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

> * e-mail: YAEvdoshkina@mephi.ru ORCID: 0000-0002-6704-0643 WoS ResearcherID: G-8379-2017 ** e-mail: VARudenko@mephi.ru ORCID iD: 0000-0002-6698-5469 WoS ResearcherID:B-7730-2016

Abstract – The article presents the results of the five-year work of the authors on the introduction of the "Safety culture" course in the educational university process, which allowed to identify a number of pedagogical conditions that contribute to the effective formation of a safety culture among students and to form practical and oriented pedagogical technology with the introduction of modern forms and methods of teaching relevant to contemporary changes and directions of the nuclear industry development.

Keywords: safety culture; pedagogical technology; formation of safety culture in the university.

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

УДК 621.039.58: 378.1

КОПИНГ-СТРАТЕГИИ В ФОРМИРОВАНИИ ДОЛЖНОГО ПОВЕДЕНИЯ СТУДЕНТОВ, ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА РАБОТУ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ В РАМКАХ КУРСА «КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ»

© 2017 И.С. Василенко

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

Представлены результаты исследований авторов по проблеме. Приведены практические примеры по формированию должного поведения в подготовке специалистов для атомной отрасли на основе диагностики стратегий поведения личности в стрессовых ситуациях, ситуациях неопределенности. Представлен сравнительный анализ копинг — стратегий поведения студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли до изучения курса «Культура безопасности» и по окончании.

Ключевые слова: человеческий фактор, копинг – стратегии, формирование культуры безопасности, кадры атомной отрасли.

Поступила в редакцию: 08.12.2017

Повышение уровня обеспечения безопасности на объектах, использующих ядерные технологии, было и есть наиболее значимой целью в развитии атомной энергетики, что обуславливает высокую заинтересованность всех участников атомной отрасли в формировании и развитии культуры безопасности. Поэтому, как отмечалось на 11-м Международном ядерном форуме «Безопасность ядерных технологий: культура безопасности», одним из «приоритетных направлений деятельности при обеспечении безопасности ядерных технологий является повышение культуры безопасности и надежности персонала на предприятиях отрасли» [1].

Рассматривая культуру безопасности как набор характеристик и особенности деятельности и поведения работников, руководство Концерна «Росэноргоатом» отмечает, что культура безопасности является неотъемлемой частью образа действий при исполнении работниками Концерна своих обязанностей», становится ясным значимость вопросов психологической направленности в формировании культуры безопасности работников отрасли [2].

Анализ нарушений в работе АЭС, проводимый в различные периоды, подтвердил продуктивность и логическую обоснованность классификации типов неправильных действий персонала по признакам осознанности и неосознанности их выявления и по определению причин их совершения. В Энциклопедии по нарушениям в работе АС[3], анализируются различного рода причины в 150 нарушений по схеме: Событие – Почему произошло? (непосредственная причина, коренные причины) – Почему это не было предотвращено? Независимо от того, какое это событие, что явилось непосредственной причиной, в разделах «Почему это не было предотвращено?», мы встречаем следующие характеристики:

– ситуация ...была для работников неожиданной и неизвестной, потому их действия были ошибкой по незнанию;

- персонал не был проинструктирован о ...;
- оперативный персонал был невнимателен при выполнении должностных обязанностей;
- в инструкции не было прописано ..., работник должен был ориентироваться только на свою интуицию и иметь привычку всегда выполнять свою работу тщательно и качественно;
 - на АС не были разработаны методические указания для ...;
- перед началом работ не был проведен анализ ситуаций, которые могли привести к ...;
 - инструкции о ... не включали указание о ...;
 - не был проведен инструктаж о ...;
 - не был установлен порядок, по которому могут эффективно решаться проблемы ...;
- персонал показал недостаточное осознание и принятие ответственности в своей области деятельности;
- система ...была для персонала новой, и персонал не имел практических навыков работы с ней;
 - у всего персонала отсутствовал критический подход к предстоящей работе;
 - в инструкции по эксплуатации ...не было описания процедуры ...;
- не были конкретизированы действия при отказе ..., персонал действовал не с критической позиции;
- в эксплуатационной документации не были указаны ясные и однозначные требования по управлению

J.Reason, в своей работе «Managing maintenance error: a practical guide», рассматривая отношения между деятельностью и человеческим фактором в условиях АЭС, отмечает что доля проблем эффективности работы человека, связанные с деятельностью технического обслуживания намного превышают те, которые касаются других видов человеческой деятельности, так, на ошибки обслуживания приходилось более половины всех главных причин потенциальных опасностей. И выделяет в своей работе ситуационные нарушения, нарушения которые допускает персонал, попав в ту или иную ситуацию [4].

Все это говорит о том, что во многих случаях, нештатных ситуациях на АЭС персоналу приходится действовать в ситуации неопределенности, стресса. И от того, какое предпринято действие, какая стратегия поведения персонала проявилась в данной неопределенной ситуации, зависит предотвращение аварии.

Поэтому, предметом рассмотрения данного исследования являлось изучение поведения студентов в стрессовых ситуациях или в ситуации неопределенности, выявление механизмов совладания, или копинг-стратегий, определяющих когнитивные, эмоциональные и поведенческие стратегии их личности, стратегии их поведения.

Раннее нами рассматривались мотивационная и ценностная составляющие, поведенческих реакций работников, адекватных требованиям культуры безопасности, коучинг как средство содействия, помощи другому человеку в поиске его собственных решений, реализацию потенциала самого человека, создание условий, чтобы он понял, что ему надо делать, сам определил цели и способы для их достижения[5].

Учитывая, что копинг-стратегии личности — динамичные, определяющиеся, как «непрерывно меняющиеся когнитивные и поведенческие попытки справиться со специфическими внешними и/или внутренними требованиями, которые оцениваются как чрезмерные или превышающие ресурсы человека» [6], мы считаем, что именно в вузе, ориентированном на подготовку персонала для атомной отрасли, необходимо уделять этому вопросу должное внимание.

Это обусловлено еще и тем, что формирование профессиональной

компетентности работника атомной станции тесно сопряжено с процессами формирования его личности, «включая в качестве обязательного условия формирование психологической готовности к работе» [7]. Кроме того, именно в критических ситуациях в большей степени проявляется индивидуальность человека, его «личностные качества в тех установках, которые затем реализуются в его конкретных действиях и поступках» [8].

В настоящее время можно подобрать различные методики диагностирования копинг-стратеий поведения личности через перечень заданных реакций на стрессовые ситуации или ситуации неопределенности для выявления доминирующих копингстратегий поведения [9]. Для нашего исследования был выбран опросник «Копингстратегии» Р.Лазаруса, который считается первой стандартной методикой в области измерения копинга (1988 г.) и адаптирован (2004 г.) [10].

Исследование проводилось среди студентов еще не изучающих «Культуру безопасности» и студентов, прошедших обучение по данной дисциплине.

Испытуемому предлагаются 50 утверждений касающихся их поведения в сложных для них ситуациях, ситуациях неопределенности и необходимо оценить, как часто проявляются данные варианты поведения.

В результате подсчёта баллов выявлялись следующие стратегии поведения:

- *Конфронтация*. Агрессивные усилия по изменению ситуации. Предполагает определенную степень враждебности и готовности к риску.
- *Дистанцирование*. Когнитивные усилия отделиться от ситуации и уменьшить ее значимость.
 - Самоконтроль. Усилия по регулированию своих чувств и действий.
- *Поиск социальной поддержки*. Усилия в поиске информационной, действенной и эмоциональной поддержки.
- *Принятие ответственности*. Признание своей роли в проблеме с сопутствующей темой попыток ее решения.
- *Бегство-избегание*. Мысленное стремление и поведенческие усилия, направленные к бегству или избеганию проблемы.
- *Планирование решения проблемы*. Произвольные проблемно-фокусированные усилия по изменению ситуации, включающие аналитический подход к проблеме.
- *Положительная переоценка*. Усилия по созданию положительного значения с фокусированием на росте собственной личности.

Подсчет баллов — суммируя по каждой субшкале: никогда — 0 баллов; редко — 1 балл; иногда — 2 балла; часто — 3 балла. Итоговая сумма баллов в соответствии с рекомендованными таблицами, позволяет определить:

- низкий уровень напряженности, который говорит об адаптивном варианте копинга;
 - средний, адаптационный потенциал личности в пограничном состоянии;
 - высокая напряженность копинга, свидетельствует о выраженной дезадаптации.

Как показало исследование, у студентов, изучивших курс «Культура безопасности», стратегии «конфронтация», «дистанцирование», «бегство-избегание» проявляются в меньшем процентном соотношении, чем у тех студентов, которые еще не изучали данный курс, а стратегии «самоконтроль», «принятие ответственности» и «планирование решения проблемы» – наоборот [10].

Учитывая, что задача «совладания» в трудной ситуации или ситуации неопределенности состоит в том, чтобы «либо преодолеть трудности, либо уменьшить их отрицательные последствия, либо избежать эти трудности, либо вытерпеть их», определяют «совладающее поведение как целенаправленное социальное поведение, позволяющее справиться с трудной жизненной ситуацией (или стрессом) способами,

адекватными личностным особенностям и ситуации, — через осознанные стратегии действий» [11] и направлено на активное взаимодействие с ситуацией — ее изменение (когда она поддается контролю) или приспособление к ней (в случае, когда ситуация не поддается контролю) [12].

Эффективным, в формировании стрессоустойчивости в ситуациях неопределенности, считается проведение психологических тренингов для развития навыков самоконтроля и саморегуляции психоэмоционального состояния [13]. Если субъект не владеет этим видом поведения, возможны неблагоприятные последствия для его продуктивности, здоровья и благополучия

Поэтому основными копинг-технологиями в формировании культуры безопасности у студентов вуза, ориентированного работу выпускников в атомной отрасли, в процессе изучения дисциплины «Культура безопасности», так же являются тренинговые упражнения. Данные упражнения направленны на диагностику копинг-стратегий личности через наблюдение за их поведением в ситуации неопределенности, при выполнении определенных заданий, и на отработку необходимых копинг-стратегий, адекватных требованиям и принципам культуры безопасности в атомной отрасли.

Копинг-технологии в формировании культуры безопасности применяются нами и в процессе повышения квалификации работников атомной отрасли [10].

Это тренинг «5 шагов оценки риска», так как оценка рисков является важным шагом, направленным на защиту работников и предприятия, а также на соответствие требованиям законодательства. Она помогает руководителям, работникам и студентам сосредоточить свое внимание на тех рисках, которые действительно могут возникнуть на рабочем месте — на тех, которые потенциально могут причинить реальный вред. По окончании занятия, обучаемые должны продемонстрировать безошибочное умение проводить оценки риска по методике «5 шагов оценки риска», проанализировать возможные формы поведения работников в ситуации оценивания риска. Тренинг «Навыки командной работы» очень важен в условиях работы, где командная форма организации работ является основным или единственным типом организации технологического процесса и выполнения работь, а потому считается закономерным явлением. На развитие навыков командной работы, сопутствующих формированию данных компетенций и соответствующих копинг-стратегий направлены практические занятия.

Аналогичные занятия проводятся по теме: «Последствия сознательного упрощения задачи при неадекватной оценке возможных последствий действий (бездействий) для безопасности». Тренинговые упражнения по данной теме позволяют проанализировать действия персонала в соответствии с инструментами предотвращения ошибок, а в теме: «Человеческий фактор. Процедура наблюдений и обратной связи» — через отработку умений по «шести ключевым этапам успешной обратной связи».

Кроме того, данные тренинговые занятия дополняют диагностики копинг-поведения:

- 1) субъективный отчет испытуемого о своем поведении, выраженный через ответы на вопросы опросников и интервью;
 - 2) наблюдение за действиями в конкретной ситуации;
 - 3) фиксация очевидных признаков;
 - 4) изучение документов и продуктов деятельности индивида.

Причем, субъективный отчет является как самой распространенной, так и наименее трудоемкой стратегией диагностики: большинство западных исследователей используют самоотчет испытуемых о своем поведении как основную технологию измерения копинг-реакций и конкретных действий[14].

Особого внимания в диагностики копинг-поведения заслуживают и свободные ответы на вопросы опросника, которые дают исследователю обширные и

разнообразные данные. Так в опросе среди слушателей курсов повышения квалификации работников АЭС по культуре безопасности, предлагалось высказать свое мнение по тому как они понимают слово «подготовленность» в определении культуры безопасности: «квалификационная и психологическая подготовленность всех лиц, при которой обеспечение безопасности АС является приоритетной целью и внутренней потребностью». В своих ответах слушатели трактовали понятие «подготовленность» как формы должного поведения и личностные качества работников АС, обеспечивающие данную линию поведения:

- быть готовым морально к действиям в любой нештатной ситуации;
- способность принимать верные решения в соответствующих ситуациях;
- адекватное поведение в критической ситуации;
- не может совершить действия во вред безопасности;
- четкость в командах и действиях;
- в любой нештатной ситуации мог принять решение и действовать соответствующе регламента и инструкциям, несмотря на стресс и растерянность;
- понимание работником важности выполнения своих обязанностей, осознание ответственности;
- осознание того, что безответственность может привести к необратимым последствиям;
- способность логически мыслить и принимать правильные решения в условиях ограниченного времени;
- иметь хорошие квалификационные навыки, позволяющие принимать правильные решения в критической ситуации;
- знание инструктажей, технических регламентов, правил поведения в любой ситуации;
- способность к правильной оценке ситуации, что не позволит сделать неправильный выбор;
- способность контролировать рабочий процесс и принимать верные решения в соответствующей ситуации;
 - компетентность в действиях в штатных и внештатных ситуациях;
 - выработка умений действий в нештатных ситуациях до автоматизма;
 - активная позиция при выполении текущей работы
 - самоосознание ответственности при работах, влияющих на безопасность и т.п. [15].

Таким образом, анализ исследований по проблеме копинг-стратегии в формировании должного поведения студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли в рамках курса «Культура безопасности» показал необходимость системной работы в вузе по схеме:

Комплексная диагностика: как субъективный отчет испытуемого о своем поведении, выраженный через ответы на вопросы опросников и интервью; наблюдение за действиями в конкретной ситуации; изучение документов и продуктов деятельности студентов в процессе практических занятий, тренингов.

Формирование копинг-стратегий студентов как форм должного поведения работников АЭС в процессе практических занятий, тренингов, деловых и ролевых игр по отработке различных стратегий совладающего поведения или их совмещения с выявлением наиболее эффективных в различных ситуациях.

Коррекционная деятельность, включающая: повторную диагностику, так как копинг стратегии – динамический процесс; коррекцию форм и методов формирование копинг-стратегий студентов с учетом деонтологического аспекта работы в атомной отрасли, и выделения наиболее эффективных копинг-технологии по формированию культуры безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. XI Международный ядерный форум «Безопасность ядерных технологий: культура безопасности [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: http://rosatom-cipk.spb.ru 19.11.2017.
- Шутиков, А. Неотъемлемая часть образа действий [Текст] / А. Шутиков // РЭА. 2016. №12. – С. 4–12.
- 3. Энциклопедия по нарушениям в работе АС [Текст]. М.: ООО «НИЦПК Восход-А», 2009. 436 с.
- 4. Managing Maintenance Error: A Practical Guide, Reason, J. and Hobbs, A. Ashgate (2003).
- 5. *Руденко, В.А. и др.* Компетентностный подход в воспитании культуры безопасности в вузе [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. 2012. №2-3(4). С. 136–141.
- 6. *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.
- 7. Абрамова, В.Н. Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике. Часть 11. Психология формирования и повышения организационной культуры и культуры безопасности на атомных станциях [Текст] / В.Н.Абрамова. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2011. 314 с.
- 8. *Абрамова*, *В.Н.* Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике. Часть 1. Психология и методы оценки организационной культуры и культуры безопасности на атомных станциях [Текст] / В.Н. Абрамова. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 257 с.
- 9. Психодиагностика стресса. Практикум. Казань, 2012. 210 с.
- 10. *Руденко В.А., Василенко И.С.* Ценности госкорпорации "Росатом" как мотивирующий фактор профессионального самосовершенствования работников атомной отрасли [Текст] / В.А. Руденко, И.С. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. 2016. №2(19). С. 77–82.
- 11. *Крюкова, Т.Л. и др.* Опросник способов совладания (адаптация методики WCQ) [Текст] / Т.Л. Крюкова, Е.В. Куфтяк // Журнал практического психолога. -2007. -№ 3 С. 93-112.
- 12. Совладающее поведение: Современное состояние и перспективы [Текст] / Под ред. А.Л. Журавлева, Т.Л. Крюковой, Е.А. Сергиенко. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2008. 474 с.
- 13. *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.
- 14. *Крюкова, Т.Л.* Методы изучения совладающего поведения: три копинг шкалы [Текст] / Т.Л. Крюкова. Кострома: Авантитул, 2007. 60 с.
- 15. Василенко, Н.П. Деонтологический аспект культуры безопасности в профессиональной деятельности работников атомной отрасли [Текст] / Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. -2015. -№4(17). -C. 129–132.

REFERENCES

- [1] XI Mezhdunarodnyjj jadernyjj forum «Bezopasnost jadernykh tekhnologijj: kultura bezopasnosti [XI International Nuclear Forum "Safety of Nuclear Technologies: Safety Culture"]. 2017. Available at: http://rosatom-cipk.spb.ru (in Russian).
- [2] Shutikov A. Neotemlemaja chast obraza dejjstvijj [An Integral Part of the Course of Action]. Rosehnergoatom [Rosenergoatom], 2016, №12, pp. 4–12. (in Russian).
- [3] Enciklopediya po narusheniyam v rabote AS [Encyclopedia on Violations in the Work of Nuclear Power Plants]. M., 2009, 436 p. (in Russian).
- [4] Managing Maintenance Error: A Practical Guide, Reason, J. and Hobbs, A. Ashgate (2003). (in English)
- [5] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Kompetentnostnyjj podkhod v vospitanii kultury bezopasnosti v vuze [Sompetence approach in education of safety culture in University]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, №2-3(4), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 136–141. (in Russian)
- [6] Aliushin M.V., Kolobashkina L.V., Khazov A.V. Professionalnyi otbor personala po psikhologicheskim kachestvam na osnove metodov, razrabotannykh v ramkakh teorii priniatiia reshenii [Professional Selection of Personnel on Psychological Qualities on the Basis of the Methods Developed within a Decision Theory]. Voprosy psikhologii [Psychology Issues], 2015, №2, ISSN

- 0042-8841, pp. 88–94. (in Russian)
- [7] Abramova V.N. Organizacionnaya psixologiya, organizacionnaya kul'tura i kul'tura bezopasnosti v atomnoj e'nergetike. Chast 11. Psixologiya formirovaniya i povysheniya organizacionnoj kul'tury i kul'tury bezopasnosti na atomnyh stanciyah [Organizational Psychology, Organizational Culture and Safety Culture in Nuclear Energy. Part 11. Psychology of Formation and Enhancement of Organizational Culture and Safety Culture at Nuclear Power Plants]. M. Obninsk, 2011, 314 p. (in Russian).
- [8] Abramova V.N. Organizacionnaya psixologiya, organizacionnaya kul'tura i kul'tura bezopasnosti v atomnoj e'nergetike. Chast' 1. Psixologiya i metody ocenki organizacionnoj kul'tury i kul'tury bezopasnosti na atomnyh stanciyah [Organizational Psychology, Organizational Culture and Safety Culture in Nuclear Energy. Part 1. Psychology and Methods for Assessing the Organizational Culture and Safety Culture at Nuclear Power Plants]. M. Obninsk, 2009, 257 p. (in Russian).
- [9] Psikhodiagnostika stressa. Praktikum [Psychological Diagnosis of Stress]. Kazan, 2012, 210 p. (in Russian).
- [10] Rudenko V.A., Vasilenko I.S. Tsennosti goskorporacii "Rosatom" kak motivirujushhijj faktor professionalnogo samosovershenstvovanija rabotnikov atomnojj otrasli [Values of the Rosatom State Corporation as the Motivating Factor of Professional Self-Improvement of Employees of Nuclear Branch]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №2(19), pp. 77–82. (in Russian).
- [11] Krjukova T.L., Kuftjak E.V. Oprosnik sposobov sovladanija (adaptacija metodiki WCQ) [Questionnaire of Ways of Coping (Adaptation of the WCQ Methodology)]. Zhurnal prakticheskogo psikhologa [Journal of Practical Psychology], 2007, № 3, ISSN 1990-9349, pp. 93–112. (in Russian).
- [12] Sovladajushhee povedenie: Sovremennoe sostojanie i perspektivy [Conforming Behavior: Current State and Prospects]. Pod redakciejj A.L. Zhuravleva, T.L. Krjukovojj, E.A. Sergienko [Edited by A.L. Zhuravlev, TL. Kryukova, E.A. Sergienko], M. Pub. Izd-vo «Institut psikhologii RAN» [Publishing House "Institute of Psychology RAS"], 2008, 474 p. (in Russian).
- [13] Aljushin M.V. Abramova V.N., Kolobashkina L.V. Psikhologicheskijj trening stressoustojjchivosti na osnove distancionnykh nekontaktnykh tekhnologijj registracii bioparametrov [Psychological training of resistance to stress on the basis of distance no-contact technologies of registering biological parameters]. Voprosy psikhologii [Psychology Issues], 2014, №6, pp. 144–152. (in Russian).
- [14] Krjukova T.L. Metody izuchenija sovladajushhego povedenija: tri koping shkaly [Methods for Studying Coping Behavior: Three Copying Scales]. Kostroma. Pub. Avantitul, 2007, 60 p. (in Russian).
- [15] Vasilenko N.P. Deontologicheskijj aspekt kultury bezopasnosti v professionalnojj dejatel'nosti rabotnikov atomnojj otrasli [Safety Culture Deontological Aspect in Professional Activity of Nuclear Industry Personnel]. Global'naja jadernaja bezopasnost' [Global nuclear safety], 2015, №4(17), pp. 129–132. (in Russian).

Copying Strategies for Forming Proper Behavior of Students Intended to Work in the Nuclear Industry within the Framework of the "Safety Culture" Course

I.S. Vasilenko

Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI", Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360 e-mail: isv.trener@gmail.com

Abstract – The paper presents results of the authors' research. It gives practical examples of proper behavior forming in the training of specialists for the nuclear industry based on the diagnosis of strategies for individual behavior in stressful situations, situations of uncertainty. The article shows a comparative analysis of coping strategies of students' behavior intended to work in the nuclear industry before studying the course "Safety Culture" and at the end of it.

Keywords: human factor, coping strategies, safety culture formation, nuclear industry personnel.

РЕЦЕНЗИИ ОБЪЯВЛЕНИЯ

УДК 621.039:351.862.82

ЯДЕРНОЕ НАСЛЕДИЕ: НОВАЯ КНИГА О ВОЗДЕЙСТВИИ ЯДЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ЭКОЛОГИЧЕСКУЮ СИТУАЦИЮ В УРАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

(Рецензия на монографию:

Толстиков В.С., Кузнецов В.Н. Ядерное наследие на Урале: исторические оценки и документы. – Екатеринбург: «Банк культурной информации», 2017. – 400 с.)

© 2017 Д.В. Гаврилов

Институт истории и археологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Свердловская обл., Россия

В монографии анализируются события на Южном Урале, произошедшие в процессе производственной деятельности Государственного химического завода имени Д. И. Менделеева (ныне - Производственное объединение «Маяк»), вследствие которых произошло радиоактивное загрязнение бассейна реки Теча, а после радиационной аварии 1957 г. на территории Челябинской, Свердловской и Тюменской областей образовался «Восточно-Уральский радиационный след».

Ключевые слова: ПО «Маяк», радиационная авария, радиоактивное загрязнение, ликвидация последствий.

Поступила в редакцию: 11.12.2017

История атомного проекта СССР уже привлекла большое количество исследователей, созданы научные труды общегосударственного и регионального масштаба. Несмотря на это, все существующие исследования являются фрагментарными. Большинство авторов — специалисты в определенной области специальных знаний, их публикации основываются преимущественно на воспоминаниях ветеранов отрасли, выводы зачастую являются необъективными.

Монография д.и.н. В.С. Толстикова и к.и.н. В.Н. Кузнецова является всесторонним исследованием производственной деятельности Государственного химического завода имени Д. И. Менделеева, в результате которой были достигнуты выдающиеся результаты по изготовлению компонентов для ядерного оружия, но и неизбежно получены негативные последствия радиационного загрязнения окружающих территорий.

Авторы монографии – известные уральские ученые-историки:

В.С. Толстиков возглавляет кафедру истории Челябинской государственного института культуры, доктор исторических наук, профессор, одним из первых историков страны стал заниматься исследованием проблем создания и развития атомной промышленности России и воздействия ядерного производства на население и окружающую природную среду, участвует в разработке государственных программ по радиационной реабилитации населения и территории Урала, является членом ряда комиссий, занимающихся проблемами экологического воспитания и образования населения, опубликовал около 200 научных работ и научно-методических разработок.

138 ГАВРИЛОВ

В.Н. Кузнецов — кандидат исторических наук, старший научный сотрудник и главный юрисконсульт Института истории и археологии Уральского отделения Российской академии наук, автор 10 монографий по истории атомной промышленности и закрытых административно-территориальных образований Урала, опубликовал по этой тематике более 100 научных статей.

В.С. Толстиков и В.Н. Кузнецов проделали масштабную по объему научноисследовательскую работу. Ими исследованы, проанализированы и обобщены многочисленные рассекреченные архивные фонды, в том числе Президента РФ, Министерства среднего машиностроения СССР, Челябинского областного Совета депутатов трудящихся, Муниципального архива Озерского городского округа и Группы фондов научно-технической документации ПО «Маяк», освещающие ликвидацию последствий производственной деятельности химкомбината и радиационной аварии. Большое количество этих документов впервые вводятся в научный оборот.

При анализе документов авторами проанализирована и обобщена многогранная работа государственных и партийных органов по атомной проблематике, связанной с созданием первого предприятия атомной промышленности, получения на нем компонентов для отечественной плутониевой атомной бомбы и возникших проблемах в ходе производственной деятельности, которые негативно сказались на экологической обстановке в регионе.

На основе новых архивных материалов объективно освещены производственная деятельность Государственного химического завода имени Д.И. Менделеева до и после аварии, меры, принятые руководителями атомной отрасли и предприятия по защите производственного персонала, населения, природной среды, подвергнувшихся радиационному заражению, постоянный поиск ученых и специалистов в решении возникших проблем. Особенностью монографии является насыщение её текста копиями архивных документов, а также их обработка в современном изложении, с комментариями, сносками и научным аппаратом.

Кроме архивных источников, ими исследованы широкий спектр научных публикаций по атомной тематике, опубликованные воспоминания ветеранов атомной отрасли, непосредственных участников событий по ликвидации последствий деятельности предприятия, что придает книге наибольшую достоверность и убедительность. В публикации собраны уникальные исторические факты, многие из которых не были известны прежде, представлена информация о людях, внесших неоценимый вклад в становление химкомбината «Маяк» и непосредственно участвовавших в ликвидации экологических последствий его производственной деятельности.

Благодаря этому авторам удалось всесторонне, с привлечением большого количества опубликованных и неопубликованных источников, дать полномасштабною картину описываемых исторических событий.

Авторами дан подробный историографический анализ публикаций по истории ликвидации последствий радиационной аварии, отмечен весомый вклад в изучение этих проблем учёных А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева, Г.Н. Романова, Д.А. Спирина, Р.М. Алексахина, Б.В. Никипелова, Е.И. Микерина, Ю.Б. Холина, Л.А. Булдакова, А.К. Гуськовой, Г.Д. Байсоголова, П.В. Голощапова, М.О. Дегтева, М.М. Косенко, В.А. Костюченко, П.М. Малкина, Р.И. Погодина, Г.Н. Романова, В.Л. Шведова, В.Н. Новоселова, Л.П. Сохиной, О.Ю. Жаркова и др., которые свои исследования сосредоточили в основном на технических, политико-экономических, медицинских и экологических аспектах функционирования ядерных объектов в Челябинской области.

Использованные источники позволили авторам создать комплексное научное

исследование, раскрыть основные факторы, повлиявшие на неблагоприятную экологическую обстановку в Уральском регионе до и после радиационной аварии.

В первой главе основное внимание уделено внешним факторам, предшествовавшим началу полномасштабных работ в Советском Союзе по реализации атомного проекта, показана роль советской разведки в ускорении работ по созданию отечественного ядерного потенциала. Подробно проанализированы причины размещения предприятий атомной отрасли на Урале и первые экологические последствия производственной деятельности Государственного химического завода имени Д. И. Менделеева, в результате которой происходило радиационное заражение окружающей среды в 1949–1956 гг.

Отдельный раздел посвящен режиму особой секретности и сохранения государственной тайны, установленный на объекте, который обусловил особенности деятельности как руководителей предприятия и строительного управления, так и местных органов советской власти.

Во второй главе анализируются причины радиационной аварии, произошедшей 29 сентября 1957 г., принятые меры по ликвидации последствий радиационного загрязнения больших территорий, получивших название «Восточно-Уральский радиоактивный след», проанализированы экологические последствия аварии, усилия ученых и руководителей атомной отрасли по переселению жителей населенных пунктов, подвергнувшихся радиационному заражению, оказанию им медицинской помощи, а также мерам по оздоровлению производственного персонала и и других участников ликвидации последствий аварии.

В третьей главе исследованы материалы и принятые меры по предотвращению возможных аварий в повседневной деятельности ПО «Маяк», использованию накопленного опыта при ликвидации последствий радиационной аварии на Чернобыльской АЭС. Подробному анализу подвергнуты меры по реабилитации территорий, подвергнувшихся радиационному заражению, улучшению экологии в местах проживания населения, меры государственной поддержки участников ликвидации последствий аварии и жителей региона.

Авторы сделали 455 сносок на использованные источники и оформили 31 приложение с обработанными текстами архивных документов с указанием источника их хранения, что позволит читателю лично ознакомиться с их полным текстом. Документы, касающиеся различных аспектов деятельности государственных органов и предприятия по ликвидации последствий его производственной деятельности и радиационной аварии, подобраны в хронологической последовательности.

Авторами успешно решены поставленные исследовательские задачи, получены научно обоснованные выводы. Указывая на негативные последствия производственной деятельности ПО «Маяк», авторы отмечают:

В результате ликвидации последствий загрязнения бассейна реки Течи и аварии 1957 г. руководство страны и атомной отрасли обратили серьезное внимание на разработку комплекса мер по безопасной эксплуатации промышленных объектов и минимизацию их воздействия на население и окружающую среду, переработку и хранение радиоактивны отходов.

Был дан импульс для энергичного развития таких наук как радиоэкология и радиационная медицина, значительно возрос объем знаний о воздействии радиации на природу и организм человека, разработаны эффективные методики лечения людей, пострадавших от переоблучения, выяснившие влияние уровня радиации на здоровье человека, животных и растительный мир, в том числе в динамике последующих поколений.

Приобретенный опыт оказался полезным при ликвидации последующих

140 ГАВРИЛОВ

техногенных радиационных аварий, таких как Чернобыль и Фукусима.

В результате принятых и реализованных государственных целевых программ по ликвидации последствий аварии 1957 г. территории, подвергнувшиеся радиоактивному загрязнению, были возвращены в сельскохозяйственный и промышленный оборот, стали пригодны для проживания человека.

Однако, оценивая высоко результаты проведенного авторами исследования необходимо отметить, что они практически не уделили внимания анализу роли и места местных органов партийной и советской власти в минимизации экологических последствий производственной деятельности предприятия, не отметили, что роль областных партийных и советских структур была сведена к минимуму по причине особой секретности, а экологические последствия от его деятельности были катастрофичными для окружающей среды.

Книга богато иллюстрирована фотографиями копий архивных документов.

Выполненное авторами исследование прошло экспертизу ведущих уральских ученых в области истории атомной отрасли, получило их положительную оценку. Содержание монографии проверено постоянно действующей Технической комиссией по защите государственной тайны $\Phi\Gamma$ УП «ПО Маяк», которой сделано заключение о возможности её открытого опубликования.

Монография адресована широкому кругу читателей, интересующихся историей атомного проекта СССР и последствиями техногенных катастроф на Урале. Она будет востребована читателями – ветеранами атомной отрасли и жителями закрытых городов, может активно использоваться в образовательном процессе в региональном изучении истории России, займет видное место в числе опубликованных работ по истории атомной отрасли.

Nuclear Heritage: New Book about the Impact of Nuclear Production on Environmental Situation in the Ural Region

D.V. Gavrilov

Federal State Budgetary Institution of Science Institute of History and Archeology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IAI UB RAS)

Kovalevskaya St., 16, Ekaterinburg, Sverdlovskaya region, 620990, Russia

e-mail: iia-history@mail.ru

Abstract – The monograph analyzes the events in the South Urals that occurred during the production activity of the Mendeleyev State Chemical Plant (now the Mayak Production Association), which resulted in radioactive contamination of the Techa River basin, and the "East Urals Radiation Trail" was formed after the 1957 radiation accident in the territory Chelyabinsk, Sverdlovsk and Tyumen regions.

Keywords: Mayak Production Association, radiation accident, radioactive contamination, liquidation of consequences.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Алалем Е.А.	23	Подрезов Н.Н.	91
Безотосный С.С.	97	Подрезова И.С.	91
Беляков А.А.	61	Пономаренко П.А.	97
Беседин А.М.	113	Портнов А.А.	18
Бурдаков С.М.	102	Проскуряков К.Н.	78
Василенко И.С.	130	Руденко В.А.	122
Гаврилов Д.В.	134	Рыбачук А.М.	70
Гу Ц.	70	Семенов В.К.	61
Евдошкина Ю.А.	122	Серебряков А.А.	18
Елохин А.П.	23	Смолин А.Ю.	113
Забазнов Ю.С.	102	Тюрин Е.М.	18
Запорожец М.В.	78	Убаськина Ю.А.	48
Коваленко В.М.	113	Ульянов В.Ю.	7
Ксенофонтов А.И.	23	Фёдоров А.И.	78
Морозова В.А.	97	Федосеев В.Н.	18
Науменко Г.А.	102	Фролова М.А.	97
Панкратова Е.В.	48	Чеснакова С.Ю.	113
Парагузов П.А.	48	Шарова Н.В.	48
Пимшин Ю.И.	102	Яковлев Л.И.	18
Писаревский М.И.	18		

AUTHOR INDEX OF VOL. 4, 2017

Alalem E.A.	23	Pisarevskij M.I.	18
Beliakov A.A.	61	Podrezov N.N.	91
Besedin A.M.	113	Podrezova I.S.	91
Bezotosny S.S.	97	Ponomarenko P.A.	97
Burdakov S.M.	102	Portnov A.A.	18
Chesnakova S.Yu.	113	Proskuryakov K.N.	78
Elokhin A.P.	23	Rudenko V.A.	122
Evdoshkina Y.A.	122	Rybachuk A.M.	70
Fedorov A.I.	78	Semenov V.K.	61
Fedoseev V.N.	18	Serebryakov A.A.	18
Frolova M.A.	97	Sharova N.V.	48
Gavrilov D.V.	134	Smolin A.Yu.	113
Gu Jieren	70	Tyurin Ye.M.	18
Kovalenko V.M.	113	Ubaskina J.A.	48
Ksenofontov A.I.	23	Ulyanov V.Y.	7
Morozova V.A.	97	Vasilenko I.S.	130
Naumenko G.A.	102	Yakovlev L.I.	18
Pankratova E.V.	48	Zabaznov Yu.S.	102
Paraguzov P.A.	48	Zaporozhets M.V.	78
Pimshin Yu.I.	102		

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.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, 2017 №4(25), С. 143

The authors are responsible for the contents of their paper or short communication and it's 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 it's 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 ekspluatacii 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)

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, 2017 №4(25), С. 144

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 razvitia 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 initsiirovaniya svetochuvstvitelny vzryvchatykh sostavov nekogerentnym izlucheniyem [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 800х600, 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. 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;

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, 2017 №4(25), С. 146

- 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 редколлегией 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.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, 2017 №4(25), С. 147

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: Гущин, 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. : Магма, 1993. – С. 19-25.

Для патентов: Пат. 2187888 Российская Федерация, МПК⁷ Н 04 В 1/38, Н 04 Ј 13/00. Приемопередающее устройство [Текст] / Чугаева В. И. ; заявитель и патентообладатель Воронеж. научисслед. 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

2017, 4(25)

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

Сдано в набор 15.12.2017 г. Компьютерная верстка Вишнева М.М. Подписано к печати 22.12.2017 г. Бумага «SvetoCopy» 80 г/м². Объем 16,28 усл.печ.л. Гарнитура «TimesNewRoman», Тираж 300 экз. Отпечатано в типографии ВИТИ(ф) НИЯУ МИФИ