

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2018, 2(27)

Founded in November, 2011

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

Quarterly

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial Staff:

M.N. Strikhanov (Editor-in-Chief, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)),

V.A. Rudenko (Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Sociology, Professor (*Russia*)),

Denis Flory (Deputy CEO of IAEA (*Austria*)),

Liu Daming (Professor of the Chinese Nuclear Power Institute (CIAE (*China*)),

Nancy Fragoyannis (Senior Counsellor of the USA Nuclear Regulation Commission (*USA*)),

Buhach Andrzej (Doctor of Technical sciences, Professor (*Poland*)),

M.K. Skakov (Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Kazakhstan*)),

A.D. Malyarenko (Doctor of Technical sciences, Professor (*Belarus*)),

S.E. Gook (PhD (Technical Science) (*Germany*)),

P.D. Kravchenko (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),

A.P. Elokhin (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),

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

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2018, 2(27)

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

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

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

С.Э. Гоок (к-т техн. наук (Германия)),

П.Д. Кравченко (д-р техн. наук, проф. (Россия)),

А.П. Елохин (д-р техн. наук, проф. (Россия)),

А.В. Чернов (д-р техн. наук, проф. (Россия)),

Ю.И. Пимишин (д-р техн. наук, проф. (Россия)),

Ю.П. Муха (д-р техн. наук, проф. (Россия)),

В.В. Кривин (д-р техн. наук, проф. (Россия)),

В.И. Ратушный (д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)),

Ю.С. Сысоев (д-р техн. наук, проф. (Россия)),

А.В. Паламарчук (к-т техн. наук (Россия)),

В.Е. Шукинунов (д-р техн. наук, проф. (Россия)),

В.П. Поваров (к-т физ.-мат. наук (Россия)),

С.М. Бурдаков (к-т техн. наук, доц. (Россия)),

И.А. Бубликова (к-т техн. наук, доц. (Россия)),

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

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

Адрес типографии: 347360, Россия, Ростовская обл., г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94.

Москва

CONTENTS

2018, 2(27)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

A Method for Mean Energy Estimation of Gamma Radiation Spectrum in the Conditions of Radiation Accidents in the Nuclear Power Plant Premises <i>A.P. Elokhin, A.I. Ksenofontov, E.A. Alalem, S.N. Fedorchenko</i>	7
A Study of Loss of Coolant Accident (LOCA) in NPPs: a Case of Safety in VVER-1000 <i>Idakwo Ako Paul</i>	18
The Influence of Nanoparticles Bacterial Ferrihydrite Doped with Aluminum on Oil-Pollution <i>M.E. Baranov</i>	26

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

Calculation of Stressed State and Durability of Bending Element Taking into Account Radiation Environment Influence <i>R.B. Garibov, I.G. Ovchinnikov</i>	36
The Results of the Expert Examination of the KM-30 Bridge Crane Operated at the Facility Decommissioned at the Novovoronezh NPP by the Results of its Technical Diagnosis <i>Yu.I. Pimshin, V.A. Naugolnov, S.M. Burdakov, I.Yu. Pimshin</i>	47
Ferroerezonans Emergency in the 24 kV Generator Voltage Circuits of NPP Units <i>S.A. Baran, V.V. Nechitajlov, V.V. Krasnokutskij</i>	56

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Modelling of Gamma-Scan Detector with Collimator for Investigating Differential Radioactive Contamination <i>Agyekum Ephraim Bonah (Ghana), Yu. Daneykin</i>	66
Development the Methods of Standing Wave Frequency Calculation in Operating of NPP with WWER Reactor <i>K.N. Proskuryakov, A.V. Anikeev, K.I. Belyaev, D.A. Pisareva</i>	74
Vibroacoustical Certification of Operating Modes of WWER Fuel-Handling Machines <i>A.A. Lapkis, V.N. Nikiforov, L.A. Pervushin</i>	82

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

Experimental Studies of Bio Mouse Usage Efficiency during Educational and Training
Classes

M.V. Alyushin, L.V. Kolobashkina 91

Social Adaptability Features of Technical University Students in Polycultural
Environments (on the Example of Working with Foreign Students within the Work
Practice in the Resource Center on the Basis of Rosatom Enterprises)

L.V. Zakharova, L.A. Gunina, I.V. Zarochintseva, Yu.A. Lupinogina 98

Kyshtym Radiation Accident of 1957: the First Assessment of the Radiation Situation
after the Explosion

V.S. Tolstikov, V.N. Kuznetsov 107

Author Index of vol. 2, 2018 116

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2018

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Метод экспресс-оценки средней энергии спектра γ -излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС
А.П. Елохин, А.И. Ксенофонтов, Исса Алалем, С.Н. Федорченко.....7
- Исследование аварийных ситуаций с потерей теплоносителя на АЭС: вопросы безопасности ВВЭР-1000
Идакво Ако Пол.....18
- Влияние наночастиц бактериального ферригидрита допированного алюминием на нефтезагрязнение
М.Е. Баранов.....26

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

- Расчет напряженного состояния и долговечности изгибаемого элемента с учетом влияния радиационной среды
Р.Б. Гарибов, И.Г. Овчинников.....36
- Результаты экспертного обследования мостового крана КМ-30, эксплуатируемого на объекте выводимого из эксплуатации на Нововоронежской АЭС, по результатам его технического диагностирования
Ю.И. Пимиин, В. А. Наугольнов, С.М. Бурдаков, И.Ю. Пимиин.....47
- Возникновение феррорезонанса в цепях 24 кВ генераторного напряжения энергоблоков АЭС
С.А. Баран, В.В. Нечитайлов, В.В. Краснокутский.....56

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Моделирование гамма-сканирующего детектора с коллиматором для исследования дифференциального радиоактивного загрязнения
Агьекум Эфраим Бонах (Гана), Ю. Данейкин.....66
- Разработка методики расчета частоты АСВ в эксплуатационных режимах АЭС с ВВЭР
К.Н. Проскуряков, А.В. Аникеев, К.И. Беляев, Д.А. Писарева.....74
- Виброакустическая паспортизация режимов работы машин перегрузочных энергоблоков ВВЭР
А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, Л.А. Первушин.....82
-

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

Экспериментальные исследования эффективности использования биомышки при проведении учебных и учебно-тренировочных занятий <i>М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина</i>	91
Особенности социальной адаптивности студентов технического вуза в поликультуральных средах (на примере работы с иностранными студентами в рамках производственной практики в Ресурсном центре на базе предприятий Росатома) <i>Л.В. Захарова, Л.А. Гунина, И.В. Зарочинцева, Ю.А. Лупиногина</i>	98
Кыштымская радиационная авария 1957 года: первые оценки радиационной обстановки после взрыва <i>В.С. Толстиков, В.Н. Кузнецов</i>	107
Авторский указатель номера 2, 2018.....	116

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК: [504.5:628.4.047]:519.245

МЕТОД ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ СПЕКТРА γ -ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ В ПОМЕЩЕНИЯХ СПЕЦКОРПУСА АЭС

© 2018 А.П. Елохин*, А.И. Ксенофонов*, Исса Алалем*, С.Н. Федорченко**

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

** ЗАО «СНИИП-РАДМЕД» («Закрытое акционерное общество «СНИИП-РАДМЕД»), Москва, Россия

В работе с помощью детекторов БД БДРГ-47Р, обладающих высокой радиационной стойкостью к ионизирующему излучению, высоким диапазоном регистрации мощностей доз и широким диапазоном энергий γ -квантов рассчитываются значения средних энергий γ -излучения радионуклидов, возникающих, например, в помещениях спецкорпуса АЭС в случае аварийного выброса в условиях тяжелой радиационной аварии. При указанных условиях спектрометрическая аппаратура, как показали аварии в Чернобыле и на Фукусиме-1, не может обеспечить качественные измерения. Поэтому для оценки средней энергии спектра γ -излучения целесообразно использовать лишь 4 детектора БД БДРГ-47Р, три из которых следует помещать в защитные оболочки (фильтры) из вольфрама, свинца и висмута, а четвертый оставить без защиты.

Оценка средней энергии спектра γ -излучения основывается на идее слоя половинного ослабления материала фильтра. Расчёты показали, что погрешность оценки восстановленной средней энергии γ -излучения зависит от спектра и изменяется от 5% (0,25 МэВ) до 36% (МэВ 1,25 МэВ), что позволяет получить нижнюю и верхнюю оценки дозовых нагрузок на персонал, который должен проводить ремонтные работы в аварийных помещениях.

Предлагаемая методика даёт возможность оценить предельно-безопасное время работы персонала в зоне радиоактивного загрязнения, минимальное число работников для проведения ремонтных работ, а также составить рабочую карту проведения ремонтных работ, т.е. минимизировать материальные потери, которые могут возникнуть в подобных ситуациях.

Ключевые слова: радиационная авария, средняя энергия спектра, мощность дозы внешнего облучения, ионизирующее излучение, радиоактивное загрязнение окружающей среды, радиационный мониторинг, помещение спецкорпуса АЭС.

Поступила в редакцию: 24.05.2018

Одной из задач автоматизированных систем радиационного контроля (АСРК) АЭС, которые содержат аварийные блоки детектирования, является обнаружение и контроль развития аварийных ситуаций в помещениях энергоблока (спецкорпуса), где расположено спецоборудование, а также подготовка рекомендаций об экстренных мерах защиты населения.

Согласно требованиям отечественных нормативных документов и стандартов Международной электротехнической комиссии (МЭК) на АЭС должны быть предусмотрены средства радиационного контроля (СРК), сохраняющие работоспособность в условиях тяжелых запроектных аварий (ЗПА) и позволяющие получать информацию, необходимую для подготовки рекомендаций по экстренным

мерам защиты населения и ликвидации последствий аварии.

Основной задачей размещенных в гермообъёме аварийных блоков детектирования является получение данных, необходимых для расчета состава и активности аварийного выброса в случае тяжелой радиационной аварии с целью подготовки рекомендаций об экстренных мерах защиты населения.

Помимо основной цели посредством аварийных блоков детектирования должны решаться и другие задачи:

- достоверное обнаружение начала развития аварий;
- получение данных о состоянии активной зоны (разгерметизации и/или плавлении топлива);
- получение данных о потере теплоносителя;
- контроль и прогнозирование радиационной обстановки в защитной оболочке и др.

Наиболее простое решение подобных задач состоит в установке детекторов ионизирующего излучения в указанных помещениях и выводе их результатов измерений на центральный щит радиационного контроля с целью получения оперативной информации. Эти детекторы должны иметь высокую радиационную стойкость, широкий диапазон измерения мощности дозы, чтобы иметь возможность (косвенно, по изменению величины мощности дозы γ -излучения) наблюдать возникновение аварийной ситуации, её развитие и деградацию. Для целей прогнозирования развития радиационной аварии необходима информация о радионуклидном составе выброса и его полной активности.

Для оперативной оценки радионуклидного состава выброса обычно используют спектрометрическое оборудование (γ -спектрометр) в комплекте с математическим обеспечением, позволяющим в режиме реального времени (on-line) получить спектральный состав γ -излучения, по которому и проводится оценка радионуклидного состава выброса и его полной активности. К сожалению, подобная аппаратура для получения качественной картины требует низкоактивных сред, обеспечивающих низкую величину мощности дозы, и низкотемпературного оборудования для охлаждения детекторов. При высоких уровнях мощности дозы спектрометрическая аппаратура даст заведомо неверную картину спектров γ -излучения или просто выйдет из строя.



Рис. 1. – Блок детектирования БДРГ-47Р [Detection unit BDRG-47R]

Решение задачи по разработке детекторов γ -излучения, обладающих широким диапазоном измерения мощностей доз, в России осуществлено ЗАО «СНИИП-РАДМЕД», которое разработало и выпускает аварийные блоки детектирования (БД) БДРГ-47Р [1-3] (рис.1), предназначенные для контроля мощности дозы γ -излучения в воздушном пространстве системы локализации аварии (СЛА) энергоблока, которые не только в полной мере соответствуют международным и российским требованиям к этому типу оборудования, но и превосходят зарубежные аналоги (табл. 1). Основными преимуществами БД БДРГ-47Р являются следующие:

- 1) в отличие от аналогов сохраняют работоспособность в условиях максимально тяжелых запроектных авариях на АЭС с энергоблоками ВВЭР (температура 250°C, давление 0,7 МПа);
- 2) диапазон измерения ($10^{-6} \div 10^5$) Гр/ч позволяет проводить непрерывные измерения мощности дозы γ -излучения в течение развития аварии, начиная от нормальной эксплуатации (начальный уровень развития аварии 10^{-6} Гр/ч) до максимально возможной величины аварии (10^5 Гр/ч). Аналоги блоков БДРГ-47Р с диапазоном измерения от 10^{-3} Гр/ч не позволяют оценить ни момент начала развития аварии, ни нормализацию обстановки;
- 3) удовлетворяют основным российским и международным требованиям (МЭК 60951-3, МЭК 60951-1 [4], МЭК 60780 [5]) к аварийным блокам детектирования. Разработан в соответствии с техническим заданием, согласованным всеми проектными институтами и ВНИИАЭС;
- 4) удовлетворяют требованиям эксплуатации по дистанционной диагностике работоспособности и поставочной комплектации;
- 5) сертифицированы в системе ОИТ и внесены в Госреестр СИ;
- 6) повышают техническую и экономическую конкурентоспособности российской аппаратуры.

Таблица 1. – Технические характеристики блоков БДРГ-47Р и их отечественных и зарубежных аналогов [Technical characteristics of the BDRG-47R units and their domestic and foreign analogues]

Параметр	Тип блока детектирования. Предприятие (фирма) исполнитель.				
	БДРГ-47Р, ЗАО «СНИИП-РАДМЕД»	УДМС-20Р ФГУП «ПСЗ»	GIM-206K “Mirion technologies”	RS-23D “General Atoms”	БДРГ-52 ООО «НПО «Доза»
Верхнее значение рабочей температуры, °C (время работы)	250 (1 ч), 207 (длительно)	200 (2 ч), 90 (длительно с орошением)	205 (3 ч), 135 (длительно)	180	250 (1 ч), 207 (длительно)
Рабочее давление, МПа	0,7	0,62	0,6	0,5	0,7
Нормируемое сопротивление изоляции, Ом	Не менее: 10^{11} при 20°C 10^{10} при 250°C	Не менее: $5 \cdot 10^9$ при 20°C	---	---	---
Диапазон измерения, Гр/ч	$10^{-6} \div 10^5$	$5 \cdot 10^{-3} \div 10^5$	$10^{-3} \div 10^5$	$10^{-2} \div 10^5$	$10^{-3} \div 10^5$
Основная погрешность, %	20	-	-	-	-
Радиационная стойкость, Гр	до 10^6	10^6	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	-
Диапазон энергий, МэВ	0,06 ÷ 3	0,06 ÷ 8	0,06 ÷ 7	0,08 ÷ 3	0,06 ÷ 3
Дистанционная проверка без р/а источника работоспособности электронного тракта, линий связи с проходкой и конструкции детектора	Есть	Нет	Нет	Нет	-

В настоящее время блоки детектирования БДРГ-47Р используются на ряде АЭС АО «Концерн Росэнергоатом»:

- Калининской АЭС по 3 блока БДРГ-47Р на каждый блок АЭС;
- Кольской АЭС – 2 блока БДРГ-47Р на 2 блоке АЭС;
- Ростовской АЭС – 3 блока БДРГ-47Р на 2 блоке АЭС и 4 блока БДРГ-47Р на 3 блоке АЭС;
- Нововоронежской АЭС – 2 блока БДРГ-47Р на 3 блоке АЭС.

К сожалению, в настоящее время в случае радиационной аварии на АЭС возможности БД БДРГ-47Р будут использованы в ограниченном объеме. Данные с установленных на АЭС блоков выводятся только на центральный щит РК в необработанном виде и не могут быть интерпретированы оператором. Отсутствует возможность эффективного использования данных с БД БДРГ-47Р в условиях радиационной аварии (отсутствуют соответствующие инструкции, руководящие документы и программное обеспечение). В аварийные центры, на щит БЩУ, на другие важнейшие участки аварийного реагирования информация с БД БДРГ-47Р не поступает и, скорее всего, окажется невостребованной в случае возникновения радиационной аварии. Таким образом, в настоящее время БД БДРГ-47Р присутствуют на АЭС лишь формально, не решая задач аварийного реагирования, предусмотренных нормативными документами СП АС-03 (п. 6.4), НП-001-15 (п. 4.4.3) и стандартом МЭК 60951-3 (п. 4.3). Требования нормативных документов, по существу, нарушаются.

Таким образом, для полного внедрения γ -детектора БД БДРГ-47Р на АЭС требуются лишь административные меры. Значительно хуже дела обстоят относительно вопроса оценки и прогнозирования радионуклидного состава выброса и его полной активности.

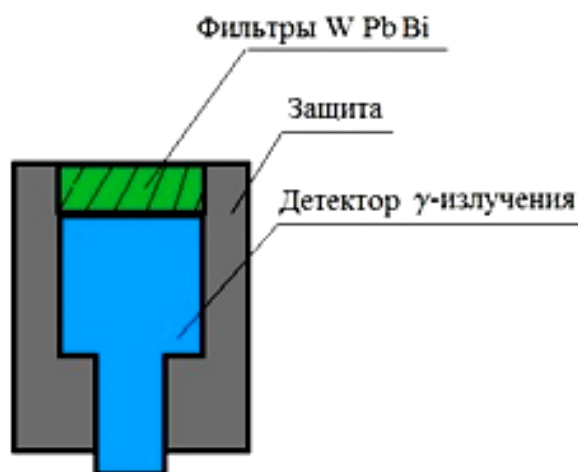


Рис. 2. – Измерение мощности дозы детектором γ -излучения за фильтром из W, Pb, Bi разной толщины [Measurement of the dose rate by the γ -radiation detector behind a filter of W, Pb, Bi of different thicknesses]

Как отмечалось выше это связано с тем, что требуемая аппаратура для проведения такого рода измерений является слишком высокочувствительной и не может работать в высоких полях ионизирующего излучения. Специальные разработки ВНИИАЭС [6], предназначенные для решения задач оценки радионуклидного состава выброса в условиях запроектных радиационных аварий, к сожалению, не дают полной картины решения этой задачи, поскольку требуют априорной информации относительно возможного радионуклидного состава в этих условиях. Однако, следует отметить, что без знания полной активности радиоактивных продуктов выброса и хотя бы средней энергии γ -излучения всей совокупности радионуклидов невозможно получить хоть какие-нибудь прогностические оценки дозовых нагрузок на персонал в условиях радиационной аварии.

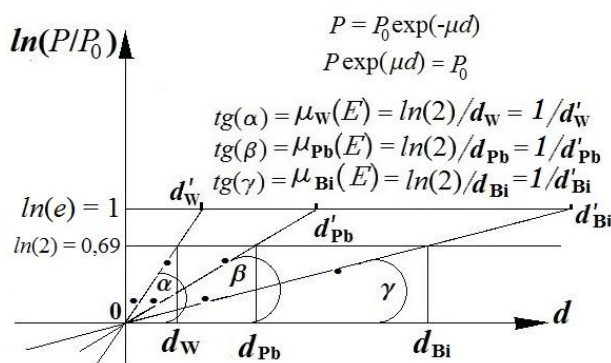


Рис. 3. – К оценке средней энергии γ -излучения, определяемой по измерению толщины фильтра d_i . Точки на прямых определены либо экспериментально, либо расчётом методом Монте-Карло [To estimate the average energy of the γ -radiation, determined from the measurement of the filter thickness d_i . The points on the lines are determined either experimentally or by Monte Carlo calculation]

Выход из положения может быть найден на основе экспресс-метода оценки средней энергии спектра γ -излучения радионуклидов, суть которого приводится ниже.

Будем полагать, что радиационный контроль помещений осуществляется указанными блоками детектирования БД БДРГ-47Р. Разместим в одном месте контролируемого помещения 4 детектора, боковая часть которых помещается в защитную оболочку из свинца (см. рис. 2), а со стороны падения ионизирующего излучения, т.е. на торцевую область каждого из трёх детекторов устанавливают фильтры толщиной d_i : на один детектор из вольфрама W, на другой из свинца Pb, на третий из висмута Bi, четвёртый детектор остаётся без фильтра. Толщину каждого из фильтров d_i ($i = 1, 2, 3$) выбираем меньшим толщины среднего пробега l_i для каждого материала с энергией 1 МэВ (средняя энергия спектра γ -излучения продуктов деления). P_0 , P_i – мощности дозы γ -излучения, непосредственно определяемые детектором или вычисляемые методом М-К.

Регистрируя мощность дозы P , на каждом из детекторов при различной толщине фильтров d_i из указанных материалов в соответствии с законом ослабления излучения получаем зависимости:

$$P_i = P_0 \exp(-\mu d_i), \quad (1)$$

где $\mu = \mu(E_\gamma)$ – коэффициент линейного ослабления γ -излучения;

E_γ – энергия γ -излучения.

Воспользуемся понятием слоя половинного ослабления материала, т.е. толщины материала, при которой $P_i = P_0/2$. Логарифмируя зависимости, определяемые формулой (1) при различных i , строим соответствующие графики, представленные на рисунке 3. Семейство прямых, приведённых на рисунке 3, при $d_i = 0$ всегда будет проходить через точку начала координат, поскольку в этом случае $P_i = P_0 \rightarrow P_i/P_0 = 1$, а $\ln(P_i/P_0) = 0$. Поэтому для построения семейства прямых достаточно всего лишь 1-2 точки, определяемых при различной толщине материала фильтра. Если, например, при фильтре толщиной d_1 регистрируется мощность дозы P_1 , то в координатах $[\ln(P/P_0), d]$ можно построить прямую $y = ax$, где $y \equiv \ln(P/P_0)$; $x = d$; a – постоянная, значение которой находят в точке с координатами $[\ln(P_1/P_0), d_1]$. Таким образом, в общем случае зависимость будет иметь вид $\ln(P/P_0) = -[\ln(P_1/P_0)/d_1]d$, в котором P_1 , P_0 – измеряемые величины, а выражение в квадратных скобках представляет собой коэффициент

линейного ослабления γ -излучения в виде tg угла наклона прямой, как это показано на рис.3. Если прямую $y = ax$ продолжить до пересечения с постоянной $\ln(P/P_0) = \ln 2$, то в этом случае коэффициент линейного ослабления γ -излучения определится tg угла наклона прямой и будет равен $\mu(E) = \ln 2/d$ или $\mu(E) = 1/d'$, где величины d и d' будут равны значениям на оси абсцисс в точках пересечения прямых $y = ax$ с постоянными $y = \ln 2$ или $y = 1$ соответственно. Зная зависимости $\mu(E_\gamma)$ для каждого из материалов фильтра, определяемые таблицами [7], нетрудно найти значение эффективной энергии γ -излучения, сравнивая найденное значение коэффициента линейного ослабления для соответствующего материала фильтра с энергетической зависимостью $\mu(E_\gamma)$, представленной таблицей. Табличное значение $\mu(E_\gamma)$, которое будет наиболее близким к найденному из графика или полученное путём линейной интерполяции, и определит искомую эффективную энергию γ -излучения, прошедшего через соответствующий фильтр.

Если детекторы расположить на стене, на высоте h_d , а помещение представить цилиндром высотой H и радиусом R_0 , то при известной энергии γ -излучения величину мощности дозы P_0 можно найти по формуле:

$$P_0 = 1,456 \cdot 10^3 \cdot \mu_a(E) E v(E) Q_V \int_V (B(E, R)/R^2) \exp(-\mu(E)R) dV, \quad (2)$$

где $\mu_a(E)$ – линейный коэффициент передачи энергии;
 $v(E)$ – эффективный квантовый выход энергии γ -излучения;
 Q_V – объёмная активность выброшенной в помещение радиоактивной примеси;
 $B(E, R)$ – фактор накопления, величину которого можно принять постоянной ($B(E, R) \cong 1,27$), согласно результатам расчёта работы [8];
 V – область определения подынтегральной функции, $dV = 2\pi r dr dh$;
 $R = \sqrt{(R_0 - r)^2 + (h - h_d)^2}$ при $0 \leq h \leq H$, $0 \leq r \leq R_0$; r и h – переменные интегрирования. Таким образом, величина P_0 окажется равной выражению:

$$P_0 = 1,456 \cdot 10^3 2\pi \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \varphi(E) \mu_a(E) E \int_0^{R_0} \int_0^H \frac{\exp\left(-\mu(E) \sqrt{(R_0 - r)^2 + (h - h_d)^2}\right)}{(R_0 - r)^2 + (h - h_d)^2} r dr dh dE, \quad (3)$$

где $\varphi(E) = v(E) Q_V$ – значение средней эффективной энергии спектра γ -излучения, проходящей через соответствующий фильтр.

При размещении детекторов за фильтрами толщиной d_W из W (вольфрама) определяется энергия γ -излучения E_1 , для другого d_{Pb} из (свинца) для оценки энергии E_2 и третьего d_{Bi} из (висмута) для оценки E_3 .

Таким образом, по найденной E_i , полученной при определении $\mu_W(E_i)$, находят линейный коэффициент передачи энергии $\mu_a(E_i)$ и линейный коэффициент ослабления γ -излучения в воздухе $\mu_s(E_i)$, что, в конечном итоге, позволит найти спектральную линию $\varphi(E_i)$ из формулы (3), в которой $v(E_i)$ – эффективный квантовый выход, Q_V – объёмная активность радиоактивной примеси, вышедшей в помещение (контеймент) АЭС.

$$\varphi(E_i) = \nu(E)Q_V = \frac{P_i \exp[\mu_w(E_i)d_i]}{1,456 \cdot 10^3 2\pi\mu_a(E_i)E_i \int_0^{R_0} \int_0^H \frac{\exp\left(-\mu(E_i)\sqrt{(R_0-r)^2 + (h-h_d)^2}\right)}{(R_0-r)^2 + (h-h_d)^2} r dr dh} . \quad (4)$$

Аналогично находим $\varphi(E_2)$ и $\varphi(E_3)$ при использовании фильтров из свинца и висмута. Найденные значения φ_i , в конечном итоге, позволят найти среднюю энергию спектра радиоактивной примеси, выброшенной в помещение АЭС, при радиационной аварии по формуле:

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^3 \varphi_i E_i / \sum_{i=1}^3 \varphi_i . \quad (5)$$

Это значение энергии γ -излучения может быть рекомендовано для прогностической оценки мощности дозы в любой точке загрязненного помещения.

Таблица 2. – Априорный спектр [Priori View]

Индекс j	Энергия E_j , МэВ	$\varphi_1(E_j)$	$E_{\text{ср}}, \text{ МэВ}$	$\varphi_2(E_j)$	$E_{\text{ср}}, \text{ МэВ}$
1	0,25	2,359	$E_{\text{ср, апр}} 0,458$	0,638	$E_{\text{ср, апр}} 0,487$
2	0,364	1,618		1,178	
3	0,497	1,178	$E_{\text{ср, вост}} 0,435$	1,618	$E_{\text{ср, вост}} 0,371$
4	0,605	0,638		2,359	

Следует отметить, что рассматриваемая задача по физическому смыслу аналогична *методу восстановления спектра и средней энергии γ -излучения, создаваемого облаком радиоактивной примеси, образующимся при несанкционированных выбросах АЭС и других ОИАЭ* [8]. Однако использование указанного метода, требует разработки специализированного математического обеспечения, продолжительность работы которого при получении окончательного результата, различается по времени в зависимости от вида спектра γ -излучения, а потому требует некоторой приближенной априорной информации о радионуклидном составе радиоактивной примеси, в отличие от рассматриваемого метода, который можно использовать в режиме on-line.

При найденном значении $\bar{E}$ величину объёмной активности Q_V можно найти из формулы (4.4), полагая $\nu(\bar{E}) = 1$.

Для проверки изложенного метода проводился численный «бумажный» эксперимент, в котором в качестве исходных спектров γ -излучения использовались априорные спектры φ_1 и φ_2 из работы [8], приведённые в таблице. 2 (см. также [9,10]). В подобных условиях значение мощности дозы P_0 будет представлять собой интегральную сумму по индексу $j = 1, 2, 3, 4$ и определится выражением (6), в котором линейные коэффициенты передачи энергии μ_a и ослабления μ_b определены для воздушной среды. Значение мощности дозы после каждого из фильтров P_i $i = 1$ (W), 2 (Pb), 3 (Bi) будет также представлять собой интегральную сумму по индексу $j = 1, 2, 3, 4$ ($\Delta E = 50$ кэВ), но с учётом ослабления фильтром (см. выражение (7)). Поэтому значение μ_a , μ_b в формуле (7) должно определяться воздушной средой, а коэффициенты

линейного ослабления μ_i , $i = 1, 2, 3$ – соответствующими материалами.

$$P_0 = 1,456 \cdot 10^3 2\pi \sum_{j=1}^4 \varphi(E_j) \mu_a(E_j) E_j \int_0^{R_0} \int_0^H \frac{\exp\left(-\mu_b(E_j) \sqrt{(R_0-r)^2 + (h-h_d)^2}\right)}{(R_0-r)^2 + (h-h_d)^2} r dr dh \Delta E, \quad (6)$$

$$P_i = 1,456 \cdot 10^3 2\pi \sum_{j=1}^4 \varphi(E_j) \mu_a(E_j) E_j \exp(-\mu_i(E_j) d_i) \int_0^{R_0} \int_0^H \frac{\exp\left(-\mu_b(E_j) \sqrt{(R_0-r)^2 + (h-h_d)^2}\right)}{(R_0-r)^2 + (h-h_d)^2} r dr dh \Delta E. \quad (7)$$

Вычисляя для каждого фильтра значение P_i , строим семейство прямых до их пересечения с постоянной $\ln(P_i/P_0) = \ln 2$, после чего, для каждого i находим $\mu_i = \ln(P_i/P_0)/d_i$ или $\mu_i = \ln 2/d_i$, согласно рисунка 3, и по таблицам работы [7] – значения эффективных энергий для которых, найденные μ_i , будут близки к табличным. Промежуточные значения находили методом линейной интерполяции. Значения $\varphi(E_i)$ $i = 1, 2, 3$ находим по формуле (4), а среднюю энергию – по формуле (5).

При выборе толщин фильтров соответственно равных $d_1, W = 0,1$; $d_2, Pb = 0,2$; $d_3, Bi = 0,3$ см. значения полученных энергий для спектра типа Φ_1 , оказались равными: $E_1 = 0,45$ МэВ, $E_2 = 0,45$ МэВ, $E_3 = 0,376$ МэВ, а весовой состав спектральных линий: $\Phi_1 = 2,02$; $\Phi_2 = 1,59$; $\Phi_3 = 0,96$, так что величина средней энергии, вычисленной по формуле (5), оказалась равной $\bar{E} = 0,435$ МэВ при заданной (априорной $\bar{E}_{\text{апр}} = 0,458$ МэВ), а погрешность оценки составила 5%. Для спектра типа Φ_2 после проведения аналогичной процедуры величина средней энергии, вычисленной по формуле (5), оказалась равной $\bar{E} = 0,371$ МэВ при заданной (априорной $\bar{E}_{\text{апр}} = 0,487$ МэВ), а погрешность оценки – 24%. При проведении подобного численного эксперимента с монолиниями ^{137}Cz ($E_\gamma = 0,661$ МэВ) и ^{60}Co ($E_\gamma = 1,25$ МэВ) энергия первой восстановленной монолинии составила 0,496 МэВ с относительной погрешностью $\delta = 25\%$, а второй 0,801 МэВ при $\delta = 36\%$.

Таким образом, результаты расчётов показывают, что относительная погрешность δ восстановленной энергии γ -излучения зависит от характера спектра γ -квантов и в диапазоне 0,25-1,25 МэВ и изменяется от 5 до 36%, что даёт возможность получить нижнюю и верхнюю оценки дозы, которую может получить персонал, находящийся в помещении при проведении ремонтных работ за предполагаемое время работы, т.е. предлагаемая методика даёт возможность оценить предельно-безопасное время работы персонала в зоне радиоактивного загрязнения, минимальное число работников для проведения ремонтных работ, а также составить рабочую карту проведения ремонтных работ, т.е. минимизировать возможные материальные потери, неизбежные в подобных ситуациях. При этом, необходимо отметить, что оценку распределения мощности дозы в любой точке указанного помещения можно будет получить расчётным путём, основываясь только на показаниях блоков детектирования БД БДРГ-47Р, в рамках предложенной методики. С другой стороны, рассматриваемый метод оценки средней энергии γ -излучения радионуклидов, при его дальнейшей проработке и усовершенствовании, может дать определённую информацию о состоянии активной зоны реактора в различных условиях его работы, в том числе и аварийных. Действительно, проводя аналогичные исследования, начиная с физпуска, и, осуществляя их в различные моменты времени в течение всей кампании, можно набрать статистический материал (в условиях безаварийной работы), который можно затем использовать при получении каких-либо отклонений, которые могут

свидетельствовать о возникновении и развитии радиационной аварии. Последнее указывает на целесообразность использования рассмотренного метода оценки мощности дозы в высоких полях ионизирующего γ -излучения в реальных условиях на АЭС, начиная с физпуска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорченко, С.Н. и др. Блок детектирования мощности дозы фотонного излучения для работы в условиях запроектной аварии на атомных станциях» [Текст] / С.Н. Федорченко, С.В. Волков, А.С. Книжник // Сб. документов конференции, г. Пенза 11-13 сентября 2002 г. – Пенза: Изд-во ФГУП «НИИ физических измерений», 2002.
2. Волков, С.В. и др. Блок детектирования для контроля мощности дозы фотонного излучения при авариях на АЭС» [Текст] / С.В. Волков, С.Н. Федорченко, А.С. Книжник // Приборы и системы управления. Контроль. Диагностика. – 2002. – №12.
3. Бусаров, А.П. и др. Аппаратура для измерения мощности дозы фотонного излучения в воздухе гермообъема реактора типа ВВР-1000 при авариях и в послеаварийный период [Текст] / А.П. Бусаров, Г.П. Кириченко, С.И. Маслов, А.А. Сорока, С.П. Киянов, С.Н. Федорченко // Сб. документов конференции «Аппаратура обеспечения ядерной и радиационной безопасности объектов Росатома». СНИИП, 12–19 апреля 2007. [Б.м.], 2007.
4. МЭК 60951-1. Аппаратура для контроля радиоактивности атомных электростанций в условиях аварии и после нее. Часть 1: Общие требования. [Б.м.], 1989.
5. МЭК 60780. Атомные электростанции. Электрическое оборудование системы безопасности. Квалификационная оценка [Б.м.], 1988.
6. Иванов, Е.А. и др. Программное средство “QUASAR” расчета утечки продуктов деления в атмосферу из защитной оболочки в случае аварии на АЭС с ВВЭР-1000 [Текст] / Е.А. Иванов, А.Д. Косов, С.С. Поляnceв // Пятая Международная Научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Сборник трудов. – М., 2006. – С. 343–345.
7. Машкович, В.П. и др. Защита от ионизирующих излучений [Текст] / В.П. Машкович, А.В. Кудрявцева: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.
8. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
9. Елохин, А.П. и др. Метеорологические характеристики района АЭС «Бушер» в Иране А.П. Елохин, Алалем Исса, А.И. Ксенофонов // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – №4(25). – С. 23–47.
10. 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.

REFERENCES

- [1] Fedorchenko S.N., Volkov S.V., Knizhnik A.S. Blok detektirovaniya moshhnosti dozy fotonnogo izlucheniya dlya raboty v usloviyah zaproektnoj avarii na atomnyh stanciyah [Detecting Unit for Dose Rate of Photon Radiation for Operation in the Conditions beyond the Design-Basis Accident at Nuclear Power Plants]. Penza. Pub. FGUP «NII fizicheskikh izmerenij» [FSUE "Research Institute of Physical Measurements"], 2002. (in Russian)
- [2] Volkov S.V., Fedorchenko S.N., Knizhnik A.S. Blok detektirovaniya dlya kontrolya moshhnosti dozy fotonnogo izlucheniya pri avariayah na AES [The Detection Unit for Monitoring the Dose Rate of Photon Radiation in Accidents at Nuclear Power Plants]. Pribory i sistemy upravleniya. Kontrol. Diagnostika [Devices and Control Systems. Control. Diagnostics], 2002, №12. (in Russian)
- [3] Busarov A.P., Kirichenko G.P., Maslov S.I., Soroka A.A., Kiyarov S.P., Fedorchenko S.N. Apparatura dlya izmereniya moshhnosti dozy fotonnogo izlucheniya v vozduhe germoobjema reaktora tipa VVR-1000 pri avariayah i v posleavarijnij period [Apparatus for Measuring the Dose Rate of Photon Radiation in the Air of Hermetic Volume of WWR-1000 Reactor during Accidents and in the Post-Accident Period]. Sbornik dokumentov konferencii «Apparatura obespecheniya yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti obhektov Rosatoma» [Collection of documents of the conference "Equipment for Nuclear and Radiation Safety of Rosatom Facilities".]. Pub. SNIIP, 2007. (in Russian)
- [4] MEK 60951-1. Apparatura dlya kontrolya radioaktivnosti atomnyh elektrostancij v usloviyah avarii i posle nee [IEC 60951-1. Equipment for Monitoring the Radioactivity of Nuclear Power Plants in

- the Event of an Accident and after it.]. Chast 1 [Part 1] «Obshhie trebovaniya» [General Requirements], 1989. (in Russian)
- [5] MEK 60780. Atomnye elektrostancii. Elektricheskoe oborudovanie sistemy bezopasnosti. Kvalifikacionnaya ocenka [IEC 60780. Nuclear Power Plants. Electrical Safety System Equipment. Qualification Evaluation]. 1988. (in Russian)
- [6] Ivanov E.A., Kosov A.D., Polyancev S.S. Programmnoe sredstvo "QUASAR" rascheta utechki produktov deleniya v atmosferu iz zashhitnoj obolochki v sluchae avarii na AE`S s VVER-1000 [Software Tool "QUASAR" for Calculating The Leakage of Fission Products into the Atmosphere from the Containment in the Event of an Accident at WWER-1000 NPP]. Pyataya Mezhdunarodnaya nauchno-texnicheskaya konferenciya «Bezopasnost, effektivnost i ekonomika atomnoj energetiki» [Fifth International Scientific and Technical Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy"]. J. M. 2006, pp. 343–345. (in Russian)
- [7] Mashkovich V.P., Kudryavceva A.V. Zashhita ot ioniziruyushhih izluchenij. Spravochnik [Protection against Ionizing Radiation. Reference Book]. M. Pub. Energoatomizdat, 1995, 496 p. (in Russian)
- [8] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushhej sredy [Methods and Means of Radiation Monitoring Systems of the Environment]. M. Pub. NIYaU MIFI [NRNU MEPhI], 2014, 520 p. (in Russian)
- [9] Elokhin A.P., Issa Alalem, Ksenofontov A.I. Meteorologicheskie xarakteristiki rajona AES «Bushehr» v Irane [Meteorological Characteristics of the Bushehr Nuclear Power Plant in Iran]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2017, №4(25), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 23–47. (in Russian)
- [10] Elokhin A.P. Optimizaciya metodov i sredstv avtomatizirovannyh sistem kontrolya radiacionnoj obstanovki okruzhayushhej sredy [Optimization of Methods and Means of the Automated Control Systems of Environment Radiation Situation]. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni doktora texnicheskix nauk [The thesis for the Doctor of Engineering]. M. Pub. MIFI, 2001, 325 p. (in Russian)

A Method for Mean Energy Estimation of Gamma Radiation Spectrum in the Conditions of Radiation Accidents in the Nuclear Power Plant Premises

A.P. Elokhin ^{*1}, A.I. Ksenofontov ^{*2}, E.A. Alalem ^{*3}, S.N. Fedorchenko ^{}**

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

¹ ORCID: 0000-0002-7682-8504

WoS ResearcherID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru ;

² ORCID: 0000-0002-6864-9805

WoS ResearcherID: H-1833-2017

e-mail: AIKsenofontov@mephi.ru ;

³ ORCID: 0000-0002-7207-5939

WoS ResearcherID: G-9489-2017

e-mail: issaalem2@yahoo.com ;

*^{**} The joint- stock company "Specialized Scientific and Research institute of Instrumentation"
(JSC "SNIIP")*

5 Raspletina st., Moscow, Russia

e-mail: info@sniip.ru

ORCID iD: 0000-0001-6144-915X

ResearcherID: F-3804-2018

Abstract – In this work the values of the mean γ -radiation energies of radionuclides are calculated using BDRG-47R OBD detectors with a high dose rate registration range and a wide range of gamma-ray energies, for example, in the case of emergency emission in a severe radiation accident in the nuclear power plant. Under these conditions, spectrometric equipment, as shown in Chernobyl and Fukusem-1 accidents, can't provide qualitative measurements. Therefore, to estimate the average energy of the γ -radiation spectrum, only four BDRG-47P DB detectors are used, three of which were used filters made of tungsten, lead, and bismuth. The fourth one remains without filter.

The estimation of the average energy of the γ -radiation spectrum is based on the idea of using half value layer of the filter material. The calculations show that the error in estimating the average γ -radiation spectrum energy depends on the spectrum and varies from 5% (0.25 MeV) to 36% (MeV 1.25 MeV), which allows to obtain a lower and upper estimate of the dose rate for personnel who must carry out repairs in premises.

The proposed methodology makes it possible to assess the maximum safety time of personnel in the zone of radioactive contamination, the minimum number of workers for repair work, and also to draw up a working plan for repair work, i.e. minimize the material losses that may arise in such situations.

Keywords: radiation accident, average spectrum energy, dose rate of external radiation, ionizing radiation, radioactive contamination of the environment, radiation monitoring, nuclear power plant.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.039.571.58

**ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ
С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА АЭС:
ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ВВЭР-1000**

© 2018 Идакво Ако Пол

Томский государственный университет, Томск, Томская обл., Россия

Принятые процедуры и нормы не являются полностью адекватными, если выполняются просто механически. Уроки трех крупных ядерных аварий, в том числе, на Три-Майл-Айленд, в Чернобыле и на Фукусима Дайичи, продемонстрировали недостаточность существующих методов, стандартов и правил для предотвращения аварий. Поэтому постоянно ведется работа по предотвращению повторения таких бедствий или минимизации их последствий. Многие критерии и проекты были предложены и использованы в новых поколениях АЭС. В настоящей работе основное внимание уделяется изучению аварий с потерей теплоносителя и различным способам работы ученых и инженеров по её предотвращению и безопасному удержанию теплоносителя.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР-1000, ядерная безопасность, авария с потерей теплоносителя.

Поступила в редакцию: 14.04.2018

INTRODUCTION

In water cooled reactors there are two types of potential accidents in terms of safety analysis [1]: loss of coolant accidents (LOCA) and transients. LOCA refer to “those postulated accidents that result from the loss of reactor coolant at a rate in excess of the capability of the reactor coolant makeup system from breaks in the reactor coolant pressure boundary, up to and including a break equivalent in size to the double-ended rupture of the largest pipe of the reactor coolant system” [3] while transients are events that causes reactor trip without loss of coolant as a result of human error or equipment failure including main circulation pump. These accidents have radiological consequences to the public if not contained and controlled appropriately. VVER-1000 is equipped with emergency core cooling system (ECCS) and containment spray systems to solve any event that will cause pressure drop beyond design including LOCA and transient. These systems have 3x100% redundancy with the exception of ECCS water storage tank [2] located under the containment.

The lessons learnt from major nuclear accidents including “Three Mile Island” in USA, the Chernobyl NPP in USSR and “Fukushima” NPP in Japan, are now considered in the safety design of NPPs. The Three Mile Island on March 28, 1979 involves Pressurized Water Reactor (PWR) of western type, the Chernobyl disaster on April 26, 1986 involves RBMK (Реактор Большой Мощности Канальный) and Fukushima Daiichi accident on March 11, 2011 involves a Boiling Water Reactor (BWR). 67 reactors have been constructed in different parts of the world since 1960 [3] and VVER has no record of any major accident.

TYPES OF LOCA

There are two types of LOCA: large break LOCA and small break LOCA [2]. For VVER-1000, the initiating event for a large LOCA is a guillotine break of the reactor main

circulation pipeline with a diameter of 850 mm at the reactor inlet while the initiating event for small break LOCA is a small leak in the primary pipeline or rupture of the main circulation pipeline with equivalent diameter of less than 100 mm.

Reactor will go subcritical immediately in case of large break LOCA due to blow-out of large quantities of coolant leading to a pressure drop in the primary circuit and reduction in neutron moderation. Loss of unit power, tripping of the main circulation pump and loss of steam removal to turbine will occur with dire consequences on the cladding material (zirconium alloy) with design maximum temperature of 355°C. To avoid fuel meltdown, a reactor protection system (RPS) is actuated leading to flooding of the reactor core by ECCS and containment spray system. Considerable thermal energy will still be generated in the fuel from decay of radioactive fission products after shutdown with generation rate of 7% of the thermal power during normal operation [1]. The failure of the RPS will result in energetic chemical reactions between cladding material and residual water-steam in the reactor pressure vessel as a result of high temperature. This reaction leads to generation large quantities of hydrogen in the reactor core, melting of the core and release of the fission products to the containment and possibly to the environment.

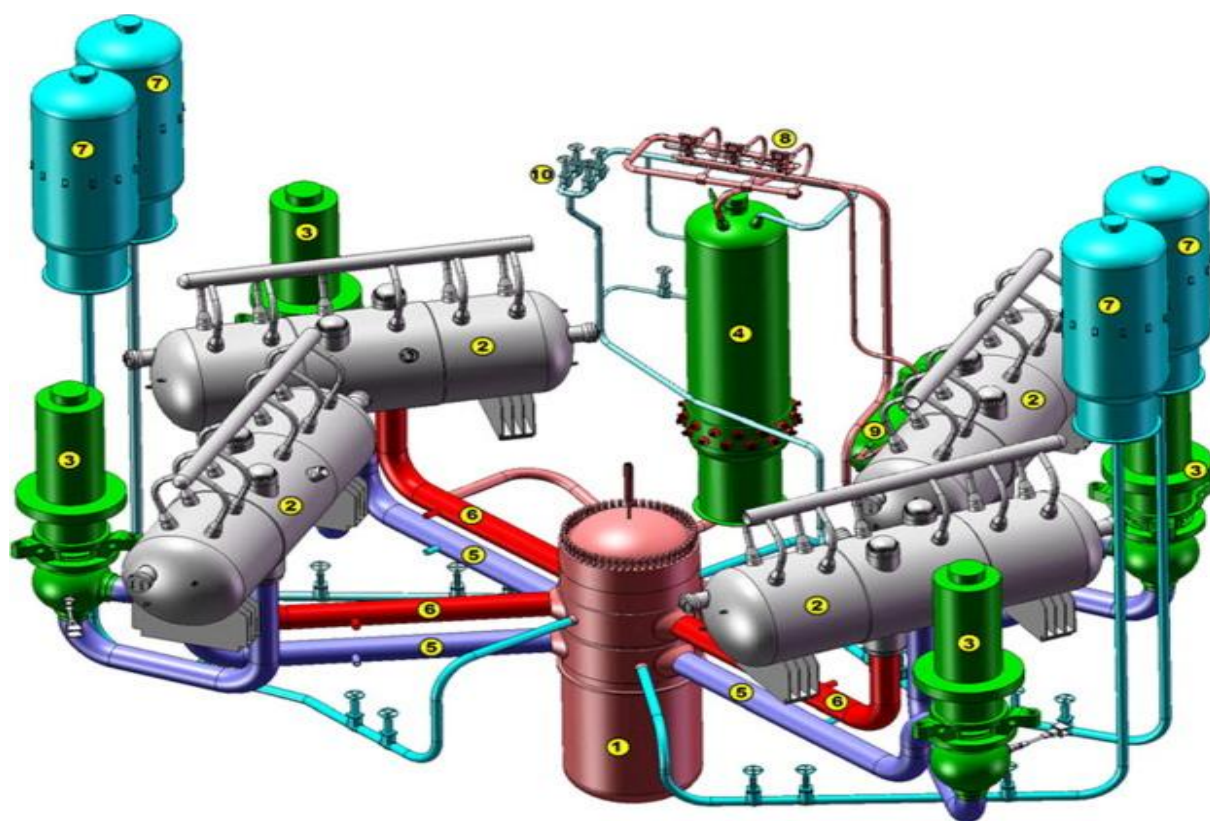


Fig. 1. Primary circuit of VVER-1000 plant; (1) reactor, (2) SG, (3) main coolant pump, (4) pressurizer, (5) cold leg, (6) hot leg, (7) accumulator, (8) PRZ pulse safety device valve, (9) relief tank, (10) injection system [4].

Safety systems should be designed to withstand the adverse effect of the environment during accidents and should follow the criterion stated in [1] that “structures, systems, and components important to safety must be designed to accommodate the effects of and to be compatible with the environmental conditions associated with normal operation, maintenance, testing, and postulated accidents including loss of coolant accidents.”

The function of the containment spray system reduces containment pressure and temperature under LOCA. It should also remove radioactive fission products from the containment atmosphere in order to prevent the accumulation of combustible gases including

hydrogen. The system of hydrogen removal is to prevent uncontrollable hydrogen ignition thereby adding to the problem of LOCA.

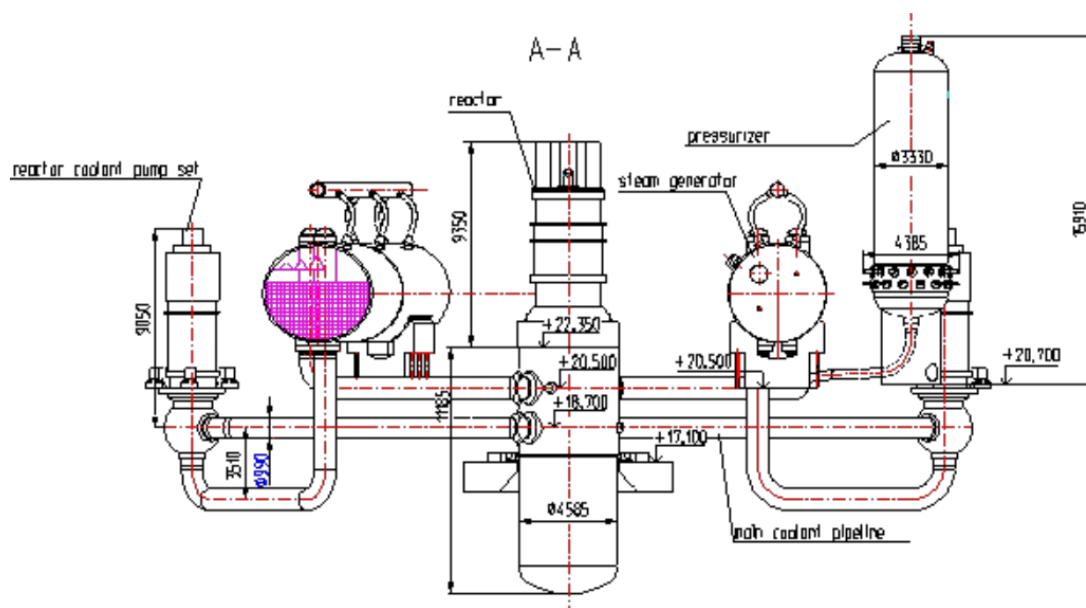


Fig. 2. Layout of the reactor coolant system

The function of the ECCS is to inject water into the core (via spray and/or flooding systems) to remove heat from the core in the event of design basis accidents. It includes four (4) channels with each having two emergency makeup pumps and a delivery pipeline (nominal diameter of 100mm) supplying borated water into the non-disconnected parts. Its consideration include isolation from RCS, redundancy to meet reliability targets and safety function within the prescribed limits for accident conditions. ECCS consists of the following:

- a. High pressure emergency cooling system
- b. Passive emergency core cooling system
- c. Low pressure emergency cooling system

The high pressure emergency cooling system is responsible for supplying borated water to the primary circuit under LOCA conditions and leaks from the secondary circuit including the steam generator. Passive ECCS is responsible for quick supply of boric acid to the reactor under LOCA when pressure drops to below 6MPa. If the pressure drops to 2.5MPa, the low-pressure emergency cooling system will supply borated water to the primary circuit for reactor core cooling.

SEQUENCE OF EVENTS DURING A LOCA

A typical LOCA sequence in a light water reactor including VVER-1000 is well documented in [5]. It has the following phases:

1. Depressurization of the primary system followed by an automatic scram. This will trigger the oscillation of the fuel temperature depending on the position, power reduction time and depressurization time. Due to pressure decrease of water the temperature of the water and that of the fuel cladding will also decrease because of the cooling capacity of water.

2. Heat-up of the core caused by heat generation (decay heat) in the fuel and loss of water inventory. The rate of heat-up varies with fuel design, operating power at the time of the LOCA and plant design. When the temperature exceeds 600°C, the cladding material will be prone to plastic deformation and may balloon under the effect of the inner pressure of the

rod. The fuel rod will burst open, breaking the first barrier to radiation containment, if the ballooning exceeds a certain size. The zircaloy cladding can undergo phase transition from α phase to β phase at temperature exceeding 900°C.

3. The cladding temperature will continue to increase gradually due to increase in radiative and convective heat transfer. This is reversed under the ECCS effect and a period of gradual temperature decrease, the cladding will cool down to comfortable level due to rise of ECCS water in the core.

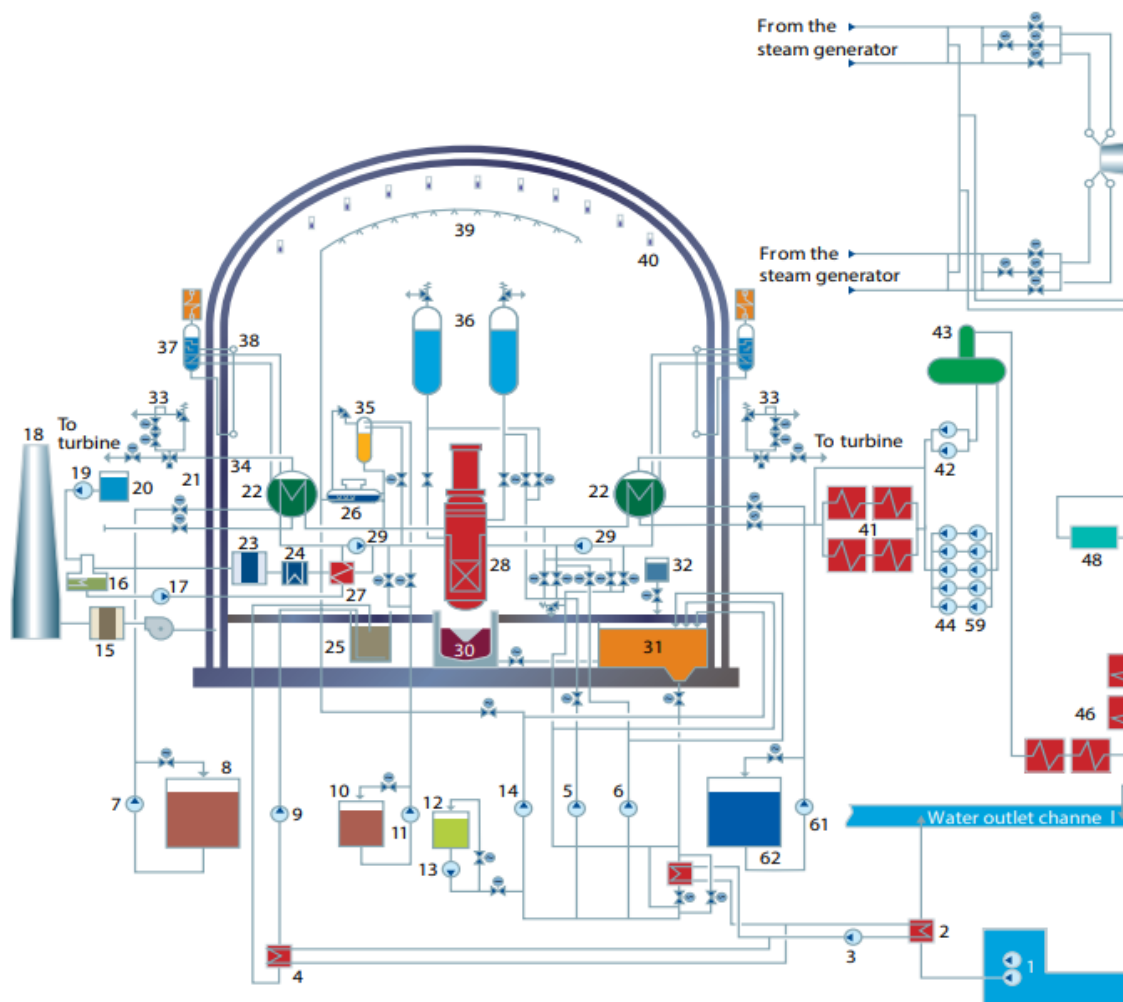


Fig. 3. Layout of VVER-1000 reactor building. 1-service water pump, 2-intermediate cooling circuit heat exchangers, 3-intermediate circuit pump, 4-spent fuel pool heat exchanger, 5-emergency injection system, low pressure pump, 6-emergency injection system, high pressure pump, 7-emergency feed water pump, 8-storage tank for high concentration boric acid, 9-spent fuel cooling pump, 10-storage tanks for boric solution, 11-emergency boration system pump, 12-storage tank for chemical reagent, 13- supply pump for chemical reagents, 14-containment spray system pump, 15-filter, 16-volume and chemical control system deaerator, 17-volume and chemical control system pump, 18-ventilation stack, 19-controlled-leak pump, 20-controlled-leak tank, 21-external containment, 22-steam generator, 23-water-treatment plant, 24-after-cooler, 25-spent fuel pool, 26- bubble tank, 27-regenerative heat exchanger for volume and chemical control, 28-reactor, 29-reactor coolant pump, 30-core catcher, 31-emergency core cooling system sump and refueling water storage, 32-alkali (NaOH) emergency reserve tank, 33-MSIV, safety and relief valve assembly, 34-containment, 35-pressurizer, 36-ECCS hydroaccumulators, 37-passive heat removal system tank, 38-condenser for the containment passive heat removal system, 39-spray system, 40-passive hydrogen recombiner, 41-high pressure heaters, 42-electric-powered auxiliary feed water pump, 43-deaerator, 44-electric-powered feed water pump, 59-boost pump, 60-condensate pumps for unit demineralization plant, 61-emergency feed water pump

ACCEPTANCE CRITERIA FOR LOCA

The acceptance criteria of a LOCA for PWRs [6] include:

1. The fuel rod cladding temperature should not exceed the prescribed value (typically 1200°C).
2. The maximum local cladding oxidation should not exceed a prescribed value (typically 17-18% of the initial cladding thickness before oxidation).
3. The total amount of hydrogen generated from the chemical reaction of the cladding with water or steam should not exceed a prescribed value (typically 1% of the hypothetical amount that would be generated if all the cladding in the core were to react).

The purpose of the first two criteria is to ensure that the cladding will remain sufficiently ductile so that it does not shatter into pieces during and after the quench phase of the LOCA transients or the fuel cladding entering into a regime of runaway oxidation and uncontrollable core heatup [2]. These criteria were violated in the accident of Three Mile Island in 1979.

The acceptance criteria for all accidents leading to containment depressurization in addition to that of LOCA include:

1. The calculated peak containment pressure needs to be lower than the containment design pressure and the containment pressure needs to be higher than the corresponding acceptable value.
2. Differential pressures acting on containment internal structures have to be maintained at acceptable values.

LONG TERM PRESSURE-TEMPERATURE TRANSIENTS

The pressure-temperature behaviour of the post-accident containment atmosphere analyzed for a time period of several hours results from an imbalance between heat sources and heat sinks [5 loca iaea]. The heat sources include reactor residual heat released, the accumulated heat in structures of both primary and secondary circuits and heat released by potential hydrogen burning or explosions. The heat sinks include heat absorption in the containment walls and other heat absorbing structures, spray system operation, fan and vent cooler operation, pressure suppression heat sinks, and ECCS operation.

The acceptance criteria include:

1. the excess pressure in the containment can lead to radioactivity releases through containment leakages therefore, the calculated doses should be below the limits for design basis accidents (DBA).
2. The acceptance criteria for LOCA stated above.
3. There should be no failure of the containment.
4. There should be no immediate health hazards on the population
5. The effects of ^{137}C release limit should not exceed the prescribed value (100TBq) and the other nuclides should not cause any danger after the specified period.

CALCULATION OF HYDROGEN GENERATION AND PEAK CLAD TEMPERATURE

As stated in the safety criteria for LOCA, the calculated total amount of hydrogen generated from chemical reaction of the cladding with water or steam shall not exceed 0.01 times the hypothetical amount that will be generated if all the metal in the cladding surrounding the fuel were to react. The hydrogen released when zircaloy is oxidized in steam is directly proportional to the oxygen consumed or zircaloy reacted. The amount of hydrogen produced at any time is expressed as

$$W_H = 2 * \frac{M_H}{M_{Zr}} (Kpt)^{0.5}$$

Where W_H is the mass of hydrogen produced per unit (cm^2) of zircaloy surface, M_H is molar mass of hydrogen gas (2.016) mg/mg mol, M_{Zr} is molar mass of zircaloy (91.22) mg/mg mol, t is the time in seconds, and Kp is the parabolic rate constant (mg Zr/cm^2) $^2\text{s}^{-1}$. If the oxidation does not deviate significantly from a parabolic rate, $Kp = 3.33 \cdot 10^5 \cdot \exp(-140600/RT)$.

The LOCA peak cladding temperature limit limits the maximum pellet linear power density [1267]. The LOCA linear power density limit on the pellet for PWRs is expressed in terms of the total peaking factor defined as

$$F_Q = \frac{Power_{peak}^{pellet}}{\langle Power_{pellet} \rangle} = \frac{\frac{Max_{x,y,z} P(x,y,z)}{V_{core}}}{\frac{1}{V_{core}} \iiint_{V_{core}} P(x,y,z) dx dy dz}$$

Which in practice is likely to have an axial dependence due to LOCA blowdown and reflooding characteristics obtained by completing the numerator's maximization over x, y .

SAFETY SYSTEM AND DISTINCTIVE FEATURES OF VVER

The safety systems of VVER include the protective, localizing, supportive and control safety systems which are provided for preventive or to limit reactor damage and localization of radioactive substance within the NPP [2313]. The technical data for "Tianwan" NPP design with V-428RP are given below in tables (1) and (2).

Tab. 1. Characteristics of high-pressure emergency injection pump

Parameter	Value
Nominal capacity, t/h	150
Pressure head at nominal supply, MPa	6.5
Maximum capacity, t/h	260
Pressure at maximum capacity, MPa	3.5
Boric acid concentration, g/kg	16
Operating temperature of medium, °C	70-95

Tab. 2. Characteristics of low-pressure emergency boron injection

Parameter	Value
Nominal capacity, t/h	800
Pressure head at nominal supply, MPa	1.5
Maximum capacity, t/h	900
Pressure at maximum capacity, MPa	1.2
Operating temperature of medium, °C	70-95

The passive part of ECCS consists of eight (8) hydroaccumulators (HA-2), combined in four (4) groups. The structure of each group involves two 2nd stage hydroaccumulators (volume 120m³ each), pipelines with valves [iris]. The 2nd stage hydroaccumulators are connected via discharge line to the pipings of the 1st stage, boron solution is supplied from hydroaccumulators into pressure and collection chambers of the reactor. Two of them are connected to the reactor vessel to supply water for flooding the bottom of the core while the

remaining two are used to flood the top of the core. When the pressure in the reactor decreases below that in the hydroaccumulator, the check valves open and a working medium is pressed out into the reactor due to pressure of nitrogen blanket. Nitrogen into the reactor is prevented by the isolation of hydroaccumulator with quick-acting valves when the level drops below the permissible value.

The emergency gas removal system serves to remove steam-gas mixture from the primary circuit and decrease the pressure below DBA. It can be used by the operator under normal operating conditions and DBA. The system consists of a set valves, pipelines connected to the primary circuit for removal of steam-gas mixtures into the relief tank from reactor top head, from primary collectors of steam generators, and from pressurizer.

The over-protection system is installed on the primary and secondary circuit. It consists of three pilot-operated relief valves independent of each other and connected to the pressurizer. The pressurizer provides implementation of “feed and bleed” procedure to decrease the primary pressure to 1MPa under DBA caused by melt-through of the reactor.

Localizing systems serve to prevent or limit the spread of radioactive substances released during accidents inside the NPP and into the environment. The design value of a leak into space between the confinement wall and the external envelop after a hypothetical accident is 0.2% of the air mass in the building for 24 hours. The design pressure and temperature of the confinement are 0.5MPa and 150°C respectively. The corium retention and cooling system serves to retain liquid and solid fragments of the damaged core, reactor vessel parts, internals under severe accident involving reactor vessel melt-through and core melting. There is the sprinkler system within the localizing system whose function includes:

1. Pressure decrease after the design basis accidents
2. Post-accident decay heat removal from containment
3. Control of water temperature in the containment sump
4. Removal of radioactive aerosols and iodine from containment

The supporting systems serve to provide safety systems with power, working medium and conditions for their operation. The supporting systems include service water systems for essential consumers and emergency power supply system. An intermediate cooling circuit system of essential consumers serves as a barrier between the auxiliary systems of the reactor plant containing radioactive media and service water system.

CONCLUSION

The study of LOCA as a panacea for accidents in nuclear power plants has been done. There are no documented cases of LOCA accident involving pressurized water reactor (PWR) of the Russian type (VVER). Experience has shown that safety is not one directional (machineries alone) but includes the personnel working at the power plants. The three major nuclear accidents were partly due to human misjudgment of the situation and LOCA. Therefore, the design of new generation power plant understudies the lessons learnt from these experiences, the researches undertaken by scientists and engineers, the minimum safety criteria to be utilized by international (IAEA) and national regulators, operators and consumers to design now more robust and safety-oriented NPPs.

REFERENCE

- [1] Modarres Mohammad, Kim Seock Inn. (2010). Deterministic and Probabilistic Safety Analysis. Cacuci D.G. (ed.), Handbook of Nuclear Engineering, Vol. 1: Nuclear Engineering Fundamentals. (2185-2247). Springer Science + Business Media, LLC. New York. (in English)
- [2] Nuclear Energy Agency. (2009). Nuclear Fuel Behaviour in Loss-of-coolant Accident (LOCA) Conditions. State-of-the-art-Report. www.oecd.org (in English)
- [3] United States Nuclear Regulatory Commission. Appendix A to Part 50 – General Design Criteria

- for Nuclear Power Plants. www.nrc.gov. visited February 27, 2018. Last updated August 29, 2017. (in English)
- [4] Ryzhov S.B., Mokhov V.A., Nikitenko M.P., Bessalov G.G., Podshibyakin A.K., Anufriev D.A., Gado J. (ed.), Rohde U. (ed.). VVER-Type Reactors of Russian Design. Cacuci D.G. (ed.), Handbook of Nuclear Engineering. Vol. 1: Nuclear Engineering Fundamentals. (2249-2320). Springer Science + Business Media, LLC. New York. (in English)
 - [5] Uffelen P.V., Konings R.J.M., Vitanza C., Tulenko J. (2010). Analysis of Reactor Fuel Rod Behaviour. Cacuci, D.G. (ed.), Handbook of Nuclear Engineering. Vol. 1: Nuclear Engineering Fundamentals. (1522-1620). Springer Science + Business Media, LLC. New York. (in English)
 - [6] International Atomic Energy Agency (2003). Accident Analysis for Nuclear Power Plants with Pressurized Water Reactors. Safety Report Series no 30. ISSN 1020-6450. (in English)
 - [7] Turinsky J. Paul. (2010). Core Isotopic Depletion and Fuel Management. Cacuci D.G. (ed.), Handbook of Nuclear Engineering. Vol. 1: Nuclear Engineering Fundamentals. (1243-1310). Springer Science + Business Media, LLC. New York. (in English)

A Study of Loss of Coolant Accident (LOCA) in NPPs: a Case of Safety in VVER-1000

Idakwo Ako Paul

*National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of Physics
Lenin St., 2, Tomsk region, Russia 634050
e-mail: akoidakwo@yahoo.com*

Abstract – Sound procedures and good practices are not fully adequate if merely practiced mechanically. The lessons of the three major nuclear accidents including Three Mile Island, Chernobyl, and Fukushima Daiichi have displayed insufficiency of existing techniques, standards and rules for their forestalling. Therefore, studies are constantly undertaken to militate against a repeat of such disaster or to limit it. Many criteria and designs have been proposed and utilized in new generations of NPP. This paper focuses on the study of loss of coolant accident (LOCA) and the various ways scientists and engineers are working to avoid and safely contain it.

Keywords: NPP, VVER-1000, nuclear safety, coolant accident.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 504.6

**ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ БАКТЕРИАЛЬНОГО ФЕРРИГИДРИТА
ДОПИРОВАННОГО АЛЮМИНИЕМ НА НЕФТЕЗАГРЯЗНЕНИЕ**

© 2018 М.Е. Баранов

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени
академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Красноярский край, Россия*

В статье рассматривается вопрос использования наночастиц бактериального ферригидрита ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) допированного алюминием (FeAl) для снижения фитотоксичности нефтезагрязнённого почвенного субстрата. Предлагается провести оценку антитоксического эффекта при повышенном загрязнении нефтепродуктами, сравнить уровень фитотоксичности (снижение всхожести и энергии прорастания тест-культуры *Lepidium sativum* L.). Определить оптимальные концентрации наночастиц для нейтрализации нефтепродуктов в почве.

Ключевые слова: почвенный субстрат, нефтезагрязнение, наночастицы, биотестирование, кресс-салат.

Поступила в редакцию: 25.05.2018

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время загрязнение нефтью и нефтепродуктами является самой актуальной проблемой техногенного загрязнения окружающей среды [1-6]. На сегодняшний момент существует набор термических, механических, физико-химических и биологических методов рекультивации нефтезагрязнённых территорий [7-10]. Однако все эти методы имеют свои недостатки и ограничения, поэтому в мире идёт постоянный поиск новых подходов к ликвидации нефтезагрязнений.

В последние годы стали появляться публикации, рассматривающие перспективы использования нанотехнологий и наноматериалов в качестве альтернативы традиционным методам очистки окружающей среды от поллютантов [11-14]. Настоящая работа посвящена изучению возможности использования наночастиц ферригидрита бактериального происхождения для ремедиации территории, подвергавшейся длительному загрязнению нефтепродуктами.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являлся почвенный субстрат на территории бывшей воинской части, расположенной в районе поселка памяти 13 Борцов, Емельяновского района Красноярского края. Объект представляет собой ровную площадку с размещёнными наземными и подземными емкостями для хранения нефтепродуктов. При ликвидации воинской части в период с 2004 по 2007 год на участке происходили аварийные разливы мазута, дизельного топлива и автобензина. Брошены бесхозные бочки, топливная арматура (рис. 1).

По данным специалистов службы по контролю в сфере природопользования администрации Красноярского края качество почвы земельного участка не соответствует ПДК и ОДК по нефтепродуктам (более в 700 раз). В 2011 году была проведена механическая рекультивация загрязнённой территории. Несмотря на проведённую рекультивацию, биотестирование с использованием кресс-салата *Lepidium sativum* L. показало высокую фитотоксичность почвенного субстрата,

отобранного на рекультивированной территории. Максимальный уровень фитотоксичности (снижение всхожести и энергии прорастания тест-культуры на 40-50% в сравнении с контролем) наблюдался в южной и северной областях восточной оконечности участка [15].



Рис. 1. – Проливы нефтепродуктов на исследуемом объекте (фото автора) [Spills of oil products on the investigated object (photo of the author)]

В экспериментах по снижению фитотоксичности почвенного субстрата использовали суспензию наночастиц допированного алюминием бактериального ферригидрита (FeAl). Данные частицы синтезируются гетеротрофными бактериями при выращивании на питательной среде, содержащей органические соли железа, размер частиц составляет преимущественно 2-5 нанометра [16]. Наночастицы использовали в виде устойчивого водного золя, полученного по технологии, описанной в патенте РФ на изобретение 2457074 [17].

Растения кресс-салата выращивали в пластиковых сосудах с почвенным субстратом весом 100 г, отобранном из участка с максимальной фитотоксичностью. Внесение наночастиц проводили однократно в виде смесей водного золя наночастиц с дистиллированной водой в концентрациях от 0,1 до 1,0 мл золя на 100 мл смеси. Контролем служили сосуды с тем же субстратом, в которые вносилась дистиллированная вода без наночастиц. В качестве дополнительного контроля использовали нетоксичный почвенный субстрат, отобранный из незагрязнённого участка ("чистый" контроль). В качестве показателей учитывали динамику прорастания семян и длины проростков. Статистическую значимость различий между опытными и контрольными вариантами по энергии прорастания и всхожести тест-культуры проверяли точным критерием Фишера для таблиц 2x2, значимость различий по длине проростков проверяли t-критерием [18].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительные эксперименты показали, что использованные в исследовании наночастицы в указанном диапазоне концентраций сами по себе не оказывают статистически значимого влияния на энергию прорастания, всхожесть и ростовые показатели кресс-салата. В то же время на фоне остаточного нефтяного загрязнения наночастицы оказали статистически значимое стимулирующее влияние как на энергию прорастания и всхожесть, так и на ростовые характеристики кресс-салата. Это влияние выразилось в увеличении показателей всхожести и роста кресс-салата вплоть до значений, соответствующих "чистому" контролю или даже превышающих

соответствующие показатели в "чистом" контроле. При этом отмечено закономерное увеличение антитоксического эффекта при повышении концентрации наночастиц (табл. 1).

Таблица 1. – Влияние концентрации суспензии наночастиц ферригидрита на энергию прорастания и всхожесть кресс-салата на загрязнённом мазутом субстрате (контроль – незагрязнённый почвенный субстрат) [Influence of ferrihydrite nanoparticles suspension concentration on the germination energy and the emergence of cress on a fuel oil contaminated substrate (control – uncontaminated soil substrate)]

Концентрация наночастиц, мл золя на 100 мл смеси	Энергия прорастания, %	Значимость различий с контролем, p	Всхожесть, %	Значимость различий с контролем, p
0,0	36	<0,001	42	<0,001
0,1	34	<0,001	52	<0,001
0,2	40	<0,001	50	<0,001
0,3	38	<0,001	50	<0,001
0,4	50	<0,001	66	<0,001
0,5	66	нет	68	<0,001
0,6	50	<0,001	72	<0,01
0,7	72	нет	76	<0,05
0,8	76	нет	80	нет
0,9	82	нет	84	нет
1,0	84	нет	86	нет
Контроль	74	-	88	-

Как видно из представленных данных, по мере увеличения концентрации допированных алюминием наночастиц энергия прорастания и всхожесть тест-культуры возрастает вплоть до исчезновения статистически значимых различий с "чистым" контролем. На начальных стадиях прорастания кривая "эффект-доза" носит отчётливо нелинейный характер. При этом на высоких концентрациях наночастиц отмечается превышение показателей прорастания в сравнении с "чистым" контролем в 1,3-1,5 раза (рис. 2, 3).

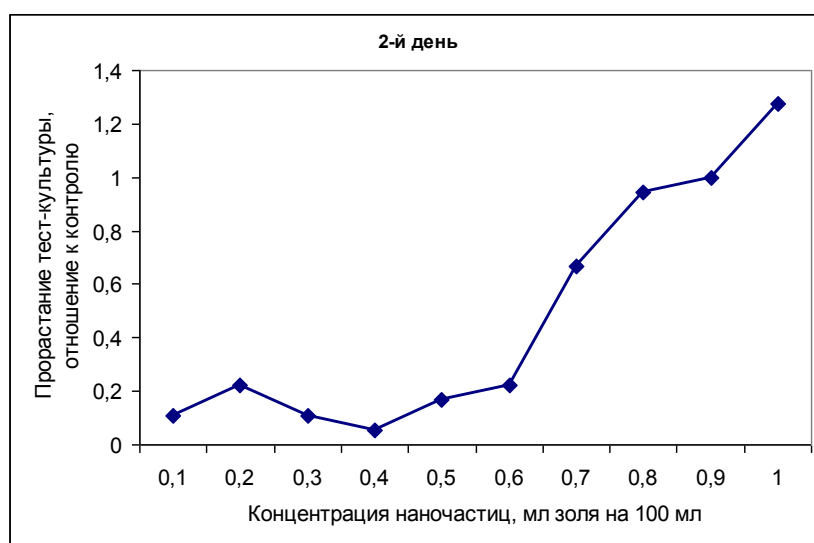


Рис. 2. – Влияние концентрации наночастиц ферригидрита на прорастание кресс-салата через 2 суток, отношение к аналогичному показателю в "чистом" контроле [Influence of ferrihydrite nanoparticles concentration on the germination of cress after 2 days, the ratio to the similar indicator in "pure" control]

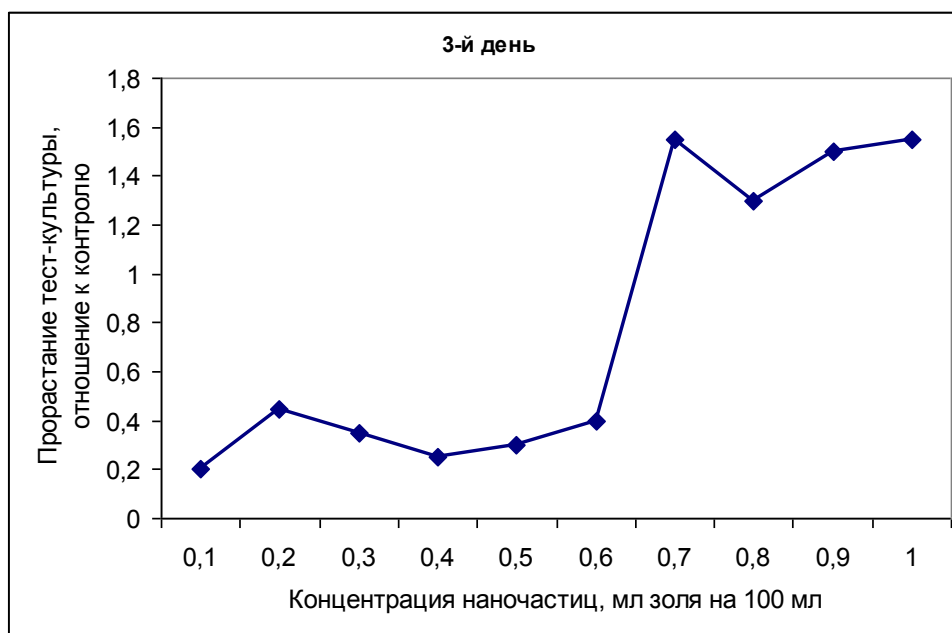


Рис. 3. – Влияние концентрации наночастиц бактериального ферригидрита на прорастание кресс-салата через 3 суток, отношение к аналогичному показателю в "чистом" контроле [Influence of bacterial ferrihydrite nanoparticles concentration on germination cress after 3 days, the ratio to the same indicator in the "clean" control]

На более поздних стадиях эксперимента происходит сглаживание кривой "эффект-доза" вплоть до приобретения ей линейного характера. Параллельно с этим нивелируются различия по прорастанию с "чистым" контролем (рис. 4, 5).

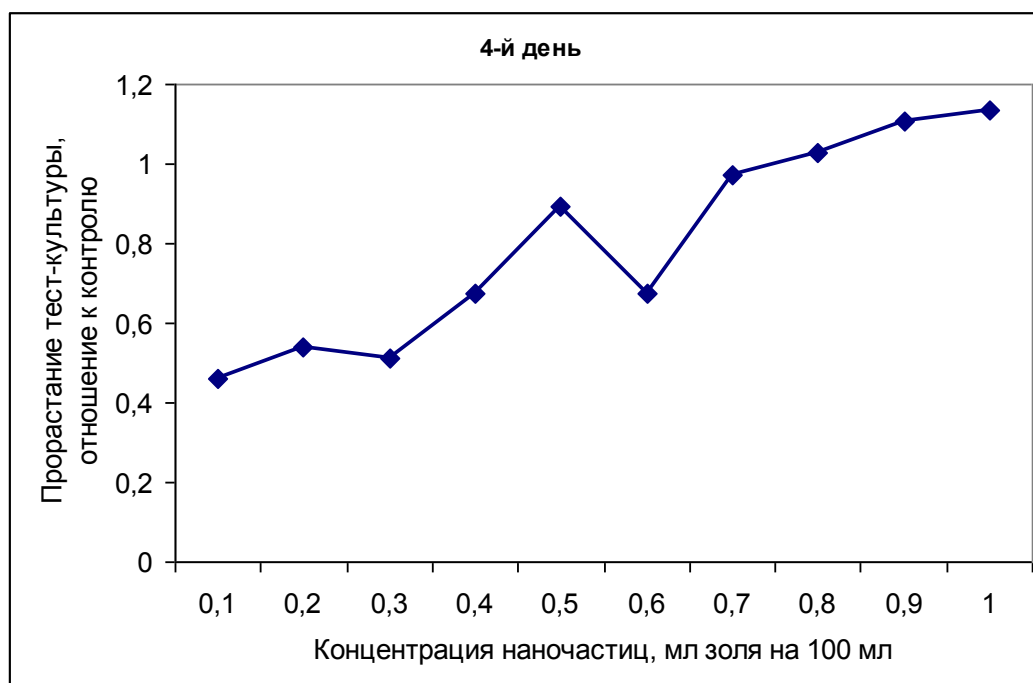


Рис. 4. – Влияние концентрации наночастиц бактериального ферригидрита на прорастание кресс-салата через 4 суток, отношение к аналогичному показателю в "чистом" контроле [Influence of bacterial ferrihydrite nanoparticles concentration on the germination of cress after 4 days, the ratio to the similar indicator in "pure" control]

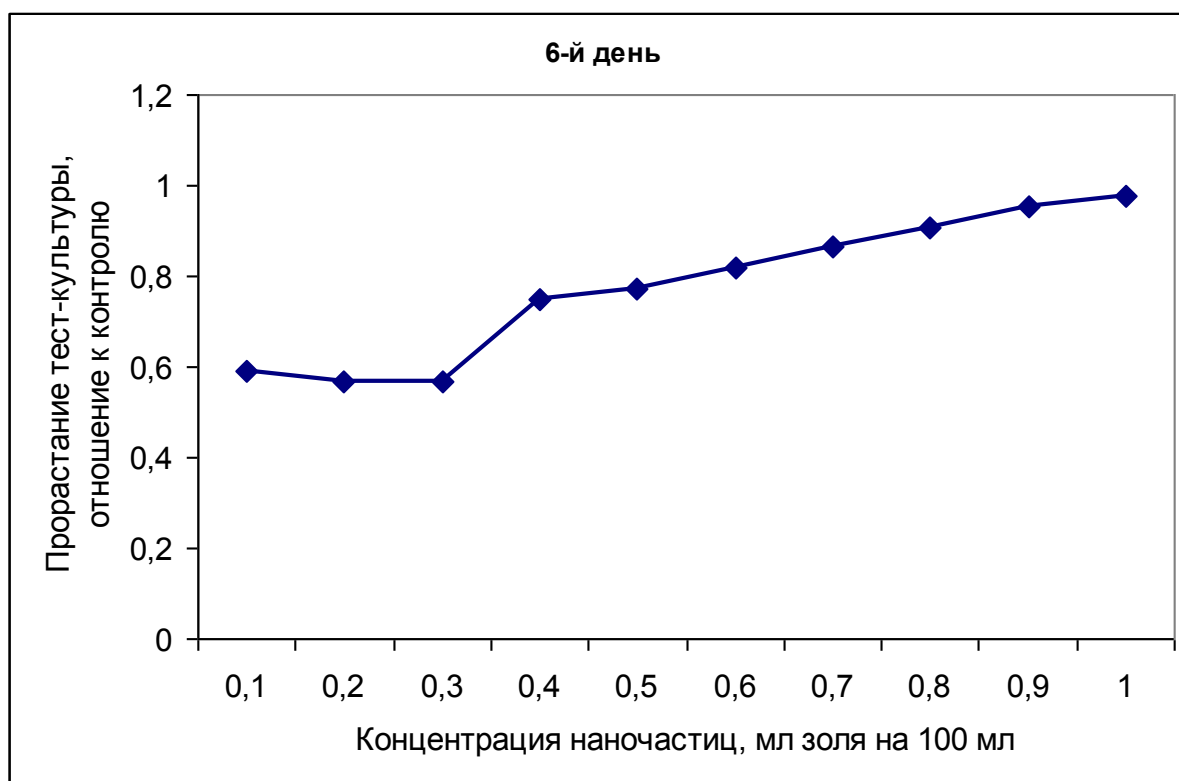


Рис. 5. – Влияние концентрации наночастиц бактериального ферригидрита на прорастание кресс-салата через 6 суток, отношение к аналогичному показателю в "чистом" контроле [Influence of bacterial ferrihydrite nanoparticles concentration on the germination of cress after 6 days, the ratio to the similar indicator in "pure" control]

В целом, можно констатировать, что в диапазоне концентраций 0,8 – 1,0 мл на 100 мл суспензии золь наночастиц, допированных алюминием, полностью устраняет определяемую по всхожести и энергии прорастания фитотоксичность загрязнённого нефтепродуктами субстрата. Концентрации ниже 0,7 мл на 100 мл также статистически значимо снижают фитотоксичность, однако полного устранения фитотоксичности субстрата не наблюдается.

Наряду со стимулированием прорастания, наночастицы бактериального ферригидрита, допированные алюминием, оказали существенное влияние на биометрические свойства проростков кресс-салата при выращивании на загрязнённом нефтепродуктами почвенном субстрате. Это влияние проявилось в статистически значимом ускорении роста в сравнении, как с "грязным", так и с "чистым" контролем. Само по себе остаточное мазутное загрязнение не оказало статистически значимого влияния на ростовые параметры тест-культуры (рис.6).

В то же время, внесение в загрязнённый субстрат суспензии наночастиц в концентрациях 0,7 мл золя на 100 мл и выше привело к статистически значимому ($p < 0,05$.. $p < 0,01$) увеличению скорости роста проростков, что проявилось в увеличении, как средней, так и максимальной длины проростков, при этом стимулирующий эффект сохранялся в течение всего эксперимента (рис. 7, 8).

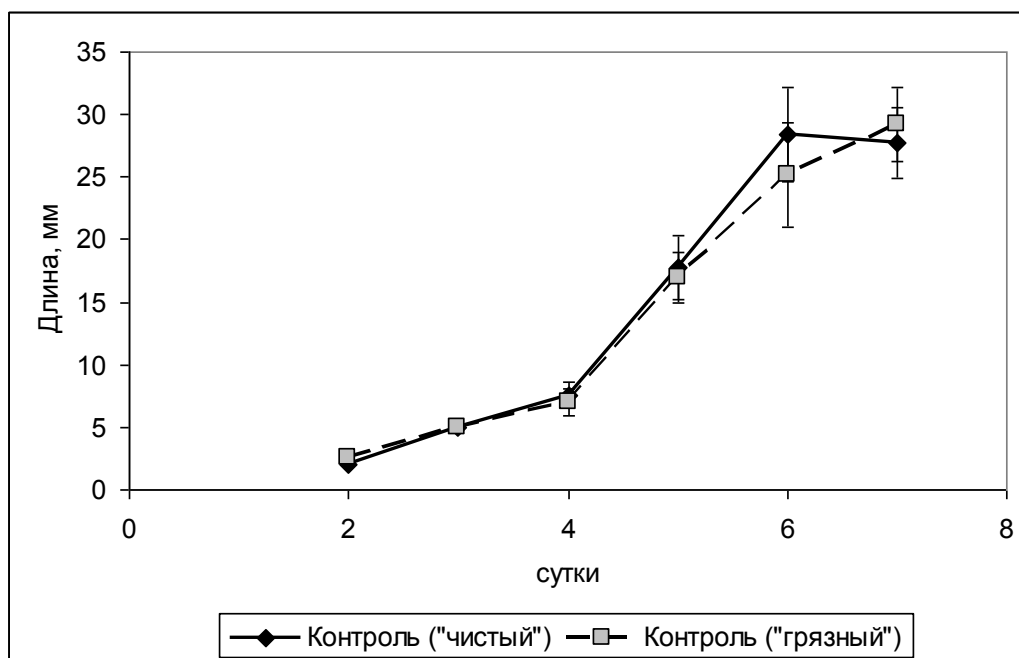


Рис. 6. – Динамика роста кресс-салата на загрязнённом субстрате в отсутствии биогенных наночастиц ферригидрита в сравнении с "чистым" контролем. Приведена средняя длина проростков и 95%-е доверительные интервалы [Growth dynamics of cress on the contaminated substrate in the absence of biogenic nanoparticles of ferrihydrite in comparison with "pure" control. The average length of seedlings and 95% confidence intervals]

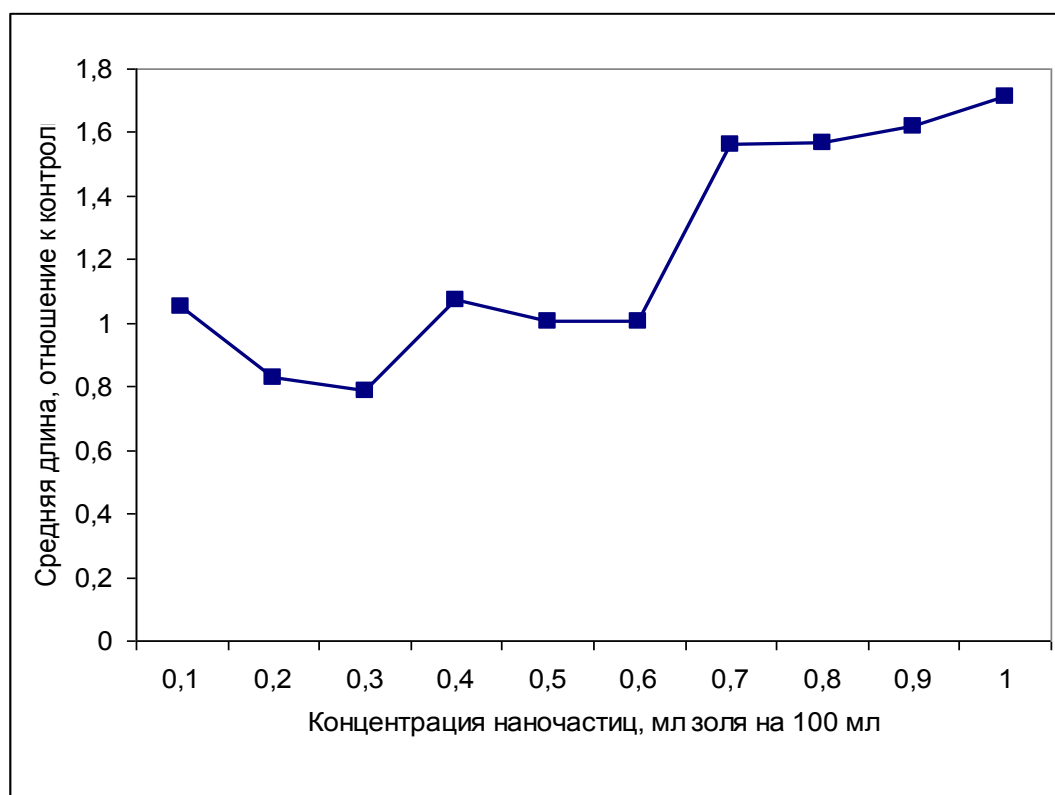


Рис. 7. – Влияние концентрации наночастиц бактериального ферригидрита на среднюю длину проростков через 3 суток после начала эксперимента, отношение к аналогичному показателю в "чистом" контроле [Influence of bacterial ferrihydrite nanoparticles concentration on the average length of seedlings 3 days after the start of the experiment, the ratio to the analogous indicator in "pure" control]

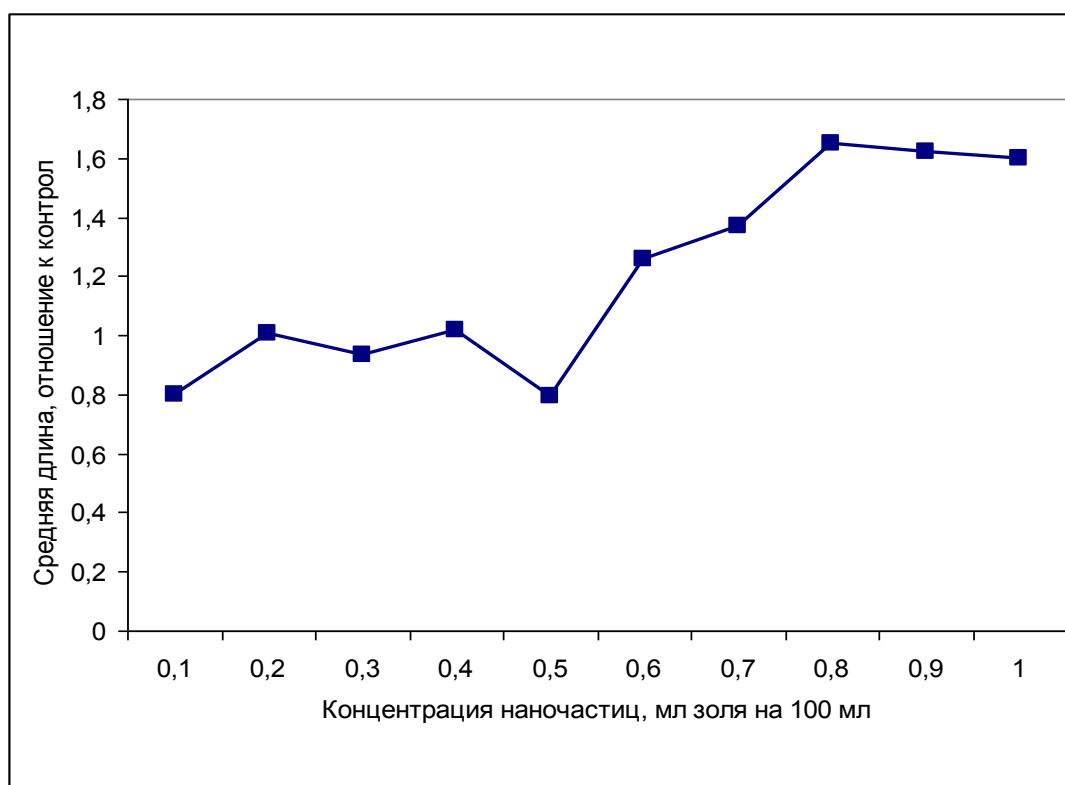


Рис. 8. – Влияние концентрации наночастиц бактериального ферригидрита на среднюю длину проростков через 6 суток после начала эксперимента, отношение к аналогичному показателю в "чистом" контроле [Influence of bacterial ferrihydrite nanoparticles concentration on the average length of seedlings 6 days after the start of the experiment, the ratio to the analogous indicator in "pure" control]

В отсутствии нефтяного загрязнения стимулирующий эффект наночастиц не отмечался. В качестве возможного механизма наблюдаемого эффекта можно предположить химическую трансформацию компонентов нефтяного загрязнения с участием наночастиц, приведшую к появлению соединений, обладающих рост-стимулирующим эффектом.

Наряду с абсолютными значениями биометрических показателей, важной характеристикой состояния живых организмов является вариация этих показателей. Наиболее широко используемыми в практике показателями вариации являются коэффициент вариации (отношению среднеквадратического отклонения к выборочному среднему) и коэффициент осцилляции (отношению размаха варьирования к выборочному среднему). Наши исследования показали, что само по себе нефтяное загрязнение не привело к изменениям показателей варьирования роста тест-культуры в сравнении с "чистым" контролем. В то же время добавление к загрязнённому субстрату наночастиц привело к снижению варьирования длины проростков, что стало заметно через 6 и более суток проращивания (рис. 9). Наблюдаемый эффект может быть связан как с увеличением дружности прорастания семян тест-культуры в присутствии наночастиц, так и с избирательным стимулированием проростков, отстающих в росте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что допированные алюминием наночастицы бактериального ферригидрита не только снимают фитотоксичность нефтезагрязнённого почвенного субстрата, но и оказывают стимулирующий эффект на

рост проростков на фоне загрязнения нефтепродуктами. Предположительно внесение наночастиц способствует перестройке микробного сообщества в направлении увеличения сходства с сообществами лесных и лесостепных почв региона.

Концентрация наночастиц 0,8 – 1,0 мл на 100 мл суспензии золь наночастиц, полностью устраняет нефтезагрязнение в исследуемых образцах. Для применения изученного типа наночастиц в биологической рекультивации нефтезагрязненных почв необходимо провести полевой эксперимент.

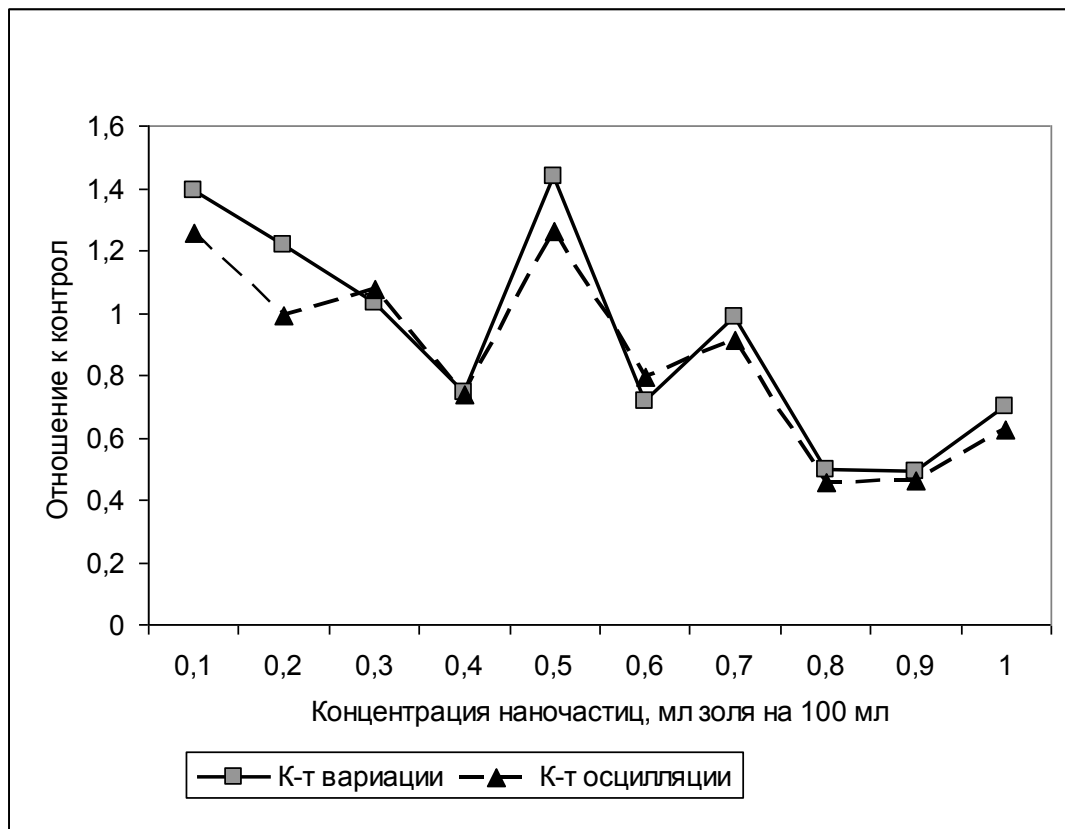


Рис. 9. – Влияние концентрации наночастиц бактериального ферригидрита на вариацию длины проростков через 6 суток после начала эксперимента, в % к аналогичным показателям в "чистом" контроле [Influence of bacterial ferrihydrite nanoparticles concentration on the variation in length of seedlings 6 days after the start of the experiment, in% to similar indicators in "pure" control]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карташев, А. и др.* Влияние нефтезагрязнений на надпочвенных и почвенных беспозвоночных животных [Текст] / А.Г. Карташев, Т.В. Смолина, А.Ю. Черданцев // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 182–185.
2. *Исмаилов, Н.* Нефтяное загрязнение и биологическая активность почв. Добыча полезных ископаемых и геология природных экосистем [Текст] / Н. Исмаилов. – М.: Наука, 1982. – С. 238–244.
3. *Аветов, Н. и др.* Загрязнение нефтью почв таежной зоны западной Сибири [Текст] / Н.А. Аветов, Е.А. Шишконокова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2011. – № 68. – С. 45–53.
4. *Андресон, Р. и др.* Экологические последствия загрязнения нефтью [Текст] / Р.К. Андресон, А.Х. Мукатанов, Т.Ф. Бойко / Экология. – 1980. – № 6. – С. 21–25.
5. *Киреева, Н.А.* Влияние загрязнения нефтью на фитотоксичность серой лесной почвы / Н.А. Киреева, А.М. Мифтахова, Г.Г. Кузяхметов // Агрохимия. – 2001. – № 5. – С. 64–69.
6. *Назаров, А.* Влияние нефтяного загрязнения почвы на растения [Текст] / А.В. Назаров // Вестник пермского университета. – 2007. – Биология. – Вып. 5(10). – С. 135–138.

7. Миертус, С. и др. Справочник. Технологии восстановления почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами [Текст] / С. Миертус, Н.Ю. Гречищева, С.В. Мещеряков, Н.Г. Рыбальский, А.Р. Барсов – М.: РЭФИА, НИА-Природа, – 2001. – 185 с.
8. Матвеев, Ю. Технологии очистки территорий, загрязненных нефтепродуктами [Текст] / Ю. Матвеев // Поиски нефти, нефтяная индустрия и охрана окружающей среды: Труды первой Всероссийской конференции (17–22 апреля 1995г., ВНИГРИ, Санкт-Петербург). – СПб: ВНИГРИ, – 1995. – С. 127–132.
9. Лушников, С. и др. Очистка воды и почвы от нефти и нефтепродуктов с помощью культуры микробов-деструкторов [Текст] / С.В. Лушников, К.Н. Завгороднев, В.В. Бобер // Экология и промышленность России. – 1999. – №2. – С. 17–20.
10. Красавин, А. и др. Восстановление нарушенных земель с использованием бактериальных препаратов [Текст] / А.П. Красавин, А.Н. Хорошавин, И.В. Катаева // Вестн. с.-х. науки. – 1988. – № 10. – С. 64–68.
11. Pandey B. and Fulekar M.H. Nanotechnology: Remediation Technologies to clean up the Environmental pollutants. Research Journal of Chemical Sciences, Vol. 2(2), 90-96, (2012)
12. Swaranjit Singh Cameotra, Soniya Dhanjal. Environmental Nanotechnology: Nanoparticles for Bioremediation of Toxic Pollutants. Bioremediation Technology, 2010, pp. 348-374.
13. Bernd, N. 2010. Pollution Prevention and Treatment Using Nanotechnology. Nanotechnology. 2:1:1–15.
14. Gil-Lozano, C., Losa-Adams, E., F.-Dávila, A., Gago-Duport, L. (2014). Pyrite nanoparticles as a Fenton-like reagent for in situ remediation of organic pollutants. Beilstein Journal of Nanotechnology, 5, pp. 855–864.
15. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1984. – С. 2–42.
16. Столяр, С. и др. Железосодержащие наночастицы, образующиеся в результате жизнедеятельности микроорганизмов [Текст] / С.В. Столяр, О.А. Баюков, Ю.Л. Гуревич и др. // Неорганические материалы. – 2006. – Т. 42. – № 7. – С. 1–6.
17. Ладыгина В.П. и др. Способ получения наночастиц ферригидрита. Патент РФ на изобретение № 2457074 Российская Федерация С1 МПК В22F9/24 [Текст] / К.В. Пуртов, С.В. Столяр, Р.С. Исхаков, О.А. Баюков, Ю.Л. Гуревич, К.Г. Добрецов, Л.А. Ищенко; Заявитель и патентообладатель Сибирский федеральный университет. – № 2011111266/02; заявл. 24.03.2011; опубл. 27.07.2012.
18. Справочник по вычислительным методам статистики [Текст] / Д. Поллард. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.

REFERENCES

- [1] Kartashev A.G., Smolina T.V., Cherdantsev A.Yu. Vliyanie neftezagryazneniy na nadpochvennykh i pochvennykh bespozvonochnykh zhivotnykh [The Impact of Oil Pollution on Supersoil and soil Invertebrates]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2006, Vol. 309, №8, pp.182–185. (in Russian)
- [2] Kartashev A. Vliyanie neftezagryazneniy na nadpochvennykh i pochvennykh bespozvonochnykh zhivotnykh [The Impact of Oil Pollution on Supersoil and Soil Invertebrates]. M. 1982, pp. 238–244. (in Russian)
- [3] Avetov N.A., Shishkonakova E.A. Zagryaznenie neftyu pochv taezhnoy zony zapadnoy Sibiri [Oil Pollution of Soils of the Taiga Zone of Western Siberia]. Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva [Bulletin of Soil Institute by V.V. Dokuchaev], 2011, № 68. pp.45–53. (in Russian)
- [4] Andreson R.K., Mukatanov A.Kh., Boyko T.F. Ekologicheskie posledstviya zagryazneniya neftyu [Environmental Consequences of Oil Pollution]. Ekologiya [Ecology], 1980, №6, pp. 21–25. (in Russian)
- [5] Kireeva N.A., Miftakhova A.M., Kuzyakhmetov G.G. Vliyanie zagryazneniya neftyu na fitotoksichnost seroy lesnoy pochvy [The Impact of Oil Pollution on the Phytotoxicity of Grey Forest Soil]. Agrokimiya [Chemistry], 2001, № 5, pp. 64–69. (in Russian)
- [6] Nazarov A.V. Vliyanie neftyanogo zagryazneniya pochvy na rasteniya [The Effect of Oil Pollution of Soil on Plants]. Vestnik permского universiteta [Perm University Herald], 2007, Issue 5(10), pp. 135–138. (in Russian)
- [7] Miertus S., Grechishcheva N.Yu., Meshcheryakov S.V., Rybalskiy N.G., Barsov A.R. Spravochnik. Tekhnologii vosstanovleniya pochv, zagryaznennykh neftyu i nefteproduktami [Handbook. Technology of Restoration of Soils Contaminated with Oil and Oil Products]. M. Pub. REFIA, NIA-

- Priroda [The State Committee of Environmental Protection, NIA-Priroda], 2001, 185 p. (in Russian)
- [8] Matveev Yu. Tekhnologii ochistki territoriy, zagryaznennykh nefteproduktami [Technologies for Cleaning Areas Contaminated with Oil Products]. Poiski nefti, neftyanaya industriya i okhrana okruzhayushchey sredy: Trudy pervoy Vserossiyskoy konferentsii [Oil Searches, Oil Industry and Environmental Protection: Proceedings of the First All-Russian Conference], Sankt-Peterburg. Pub. VNIGRI, 1995. pp. 127–132. (in Russian)
- [9] Lushnikov S.V., Zavgorodnev K.N., Bober V.V., Ochistka vody i pochvy ot nefti i nefteproduktov s pomoshchyu kultury mikrobov-destruktorov [Purification of Water and Soil from Oil and Petroleum Products with the Help of Microbial Destructor Culture]. Ekologiya i promyshlennost Rossii [Ecology and Industry of Russia], 1999, №2, pp. 17–20. (in Russian)
- [10] Krasavin A.P., Khoroshavin A.N., Kataeva I.V. Vosstanovlenie narushennykh zemel s ispolzovaniem bakterialnykh preparatov [Restoration of Disturbed Lands with the Use of Bacterial Preparations]. Vestn. s.-kh. nauki [Bulletin of Agricultural Science], 1988, №10, pp. 64–68. (in Russian)
- [11] Pandey B. and Fulekar M.H. Nanotechnology: Remediation Technologies to clean up the Environmental pollutants. Research Journal of Chemical Sciences, Vol. 2(2), 90–96, (2012) (in English)
- [12] Swaranjit Singh Cameotra, Soniya Dhanjal. Environmental Nanotechnology: Nanoparticles for Bioremediation of Toxic Pollutants. Bioremediation Technology, 2010, pp 348-374 (in English)
- [13] Bernd, N. 2010. Pollution Prevention and Treatment Using Nanotechnology. Nanotechnology. 2:1:1–15 (in English)
- [14] Gil-Lozano, C., Losa-Adams, E., F.-Dávila, A., Gago-Duport, L. (2014). Pyrite nanoparticles as a Fenton-like reagent for in situ remediation of organic pollutants. Beilstein Journal of Nanotechnology, 5, pp. 855–864.
- [15] GOST 12038-84 Semena selskohozyajstvennykh kultur. Metody opredeleniya vskhozhesti [State Standard 12038-84. Seeds of Agricultural Crops. Methods for Determination of Germination]. M. Pub. «Izdatelstvo standartov», 1984, pp. 2–42. (in Russian)
- [16] Stolyar S.V., Bayukov O.A., Gurevich Yu.L. etc. Zhelezosoderzhashchie nanochastitsy, obrazuyushchiesya v rezultate zhiznedeyatel'nosti mikroorganizmov [Iron-Containing Nanoparticles Formed as a Result of Microbial Activity]. Neorganicheskie materialy [Inorganic Materials], 2006, Vol. 42, №7, pp.1–6. (in Russian)
- [17] Purtov K.V., Stolyar S.V., Iskhakov R.S., Bayukov O.A., Gurevich Yu.L., Dobretsov K.G., Ishchenko L.A. Method for obtaining ferrihydrite nanoparticles. Patent of the Russian Federation for invention №2457074 Russian Federation C1 IPC B22F9/24; The applicant and the patent owner of Siberian Federal University. – №2011111266/02; claimed. 24.03.2011; publ. 27.07.2012. (in Russian)
- [18] Pollard D. Spravochnik po vychislitel'nykh metodam statistiki [Handbook of Computational Methods of Statistics]. M. Pub. Finansy i statistika [Finance and Statistics], 1982, 344 p. (in Russian)

The Influence of Nanoparticles Bacterial Ferrihydrite Doped with Aluminum on Oil-Pollution

M.E. Baranov

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technologies
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, Krasnoyarsky kraj, Russia, 660037
e-mail: me_baranov@mail.ru*

Abstract – The paper discusses the use of bacterial ferrihydrite nanoparticles ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) doped with aluminum (FeAl) to reduce the phytotoxicity of an oil contaminated soil substrate. It is proposed to evaluate the antitoxic effect in case of increased contamination with oil products, compare the level of phytotoxicity (decrease in germination and germination energy of test culture *Lepidium sativum* L.) and to determine the optimal concentrations of nanoparticles to neutralize petroleum products in the soil.

Keywords: soil substratum, oil pollution, nanoparticles, biotesting, watercress.

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

УДК 539.4

**РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗГИБАЕМОГО ЭЛЕМЕНТА
С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОЙ СРЕДЫ**

© 2018 Р.Б. Гарибов*, И.Г. Овчинников****

** Балаковский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Балаково, Саратовская обл., Россия*

*** Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия*

Рассматривается задача расчетного моделирования поведения изгибаемого конструктивного элемента (балки) подвергающейся совместному действию изгибающего момента и радиационному облучению. Приведены основные уравнения модели, учитывающие процесс накопления повреждений и влияния облучения. С использованием экспериментальных данных на основе метода наименьших квадратов выполнена идентификация модели, то есть, определены значения коэффициентов. Проведено сопоставление результатов расчета с помощью найденных коэффициентов с экспериментальными данными, показавшее хорошее совпадение результатов. Затем с использованием приведенных уравнений с найденными значениями коэффициентов выполнено численное моделирование поведения облученной балки, нагруженной моментом. Исследовано влияние облучения на кинетику изменения кривизны, приведены эпюры напряжений и повреждений по сечению балки в разные моменты времени. Рекомендовано для повышения точности результатов моделирования при идентификации моделей использовать не только экспериментальные данные по длительной прочности и длительной пластичности, но и кривые ползучести.

Ключевые слова: радиация, радиационное воздействие, моделирование, флюенс, долговечность, изгибаемый элемент, балка.

Поступила в редакцию: 24.05.2018

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что под влиянием радиационной среды изменяются механические свойства материалов (бетонов, сталей), ускоряются процессы деформирования и разрушения. Результаты экспериментальных исследований воздействия радиационных сред на металлические, бетонные, полимербетонные, железобетонные конструкции приведены в работах [1–6]. Вопросам расчета конструкций в условиях воздействия радиационных сред посвящены исследования [7–15], а обзор моделей и методов, используемых при расчете и моделировании поведения конструкций, подвергающихся воздействию радиационных сред, приведен в [16].

Г.П. Карзовым в работе докладе «Обеспечение радиационной прочности корпусов и внутрикорпусных устройств атомных реакторов АЭС с ВВЭР» было введено понятие «радиационная прочность», то есть «способность материала конструкции противостоять возникновению и развитию разрушения в процессе эксплуатации в условиях воздействия на материал радиационного облучения». Основным показателем радиационной прочности считается срок безопасной эксплуатации конструктивного

элемента, причем этот срок является хотя и косвенной, но единственной оценкой, ибо реальный срок безопасной эксплуатации конструкций не определяется прямыми экспериментами. Г.П. Казовым сформулированы задачи создания методики расчета прочности конструкций атомных реакторов, в том числе: расчет напряженно-деформированного состояния элементов при совместном действии силовых и температурных полей с учетом радиационного облучения; формулировка условий наступления предельного состояния конструктивных элементов; разработка методик расчета повреждаемости элементов конструкций при статическом и циклическом нагружении. Таким образом одним из основных направлений исследовательских работ является разработка и совершенствование методик расчета повреждаемости материалов и конструкций из них в условиях влияния радиационной среды с целью расчетного обеспечения безопасного срока эксплуатации.

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ИЗГИБАЕМОГО КОНСТРУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ И ЕЕ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

Построим модель деформирования и разрушения изгибаемого конструктивного элемента с учетом воздействия радиационной среды, вызывающей ускорению процессов деформирования и разрушения материала, трактуемого как накопление повреждений.

Связь между напряжениями σ , полной деформацией ε , поврежденностью Π , флюенсом Φ и радиационным распуханием ε_Φ примем в виде:

$$\varepsilon(\sigma, \Phi, \Pi) = A(\Phi) \sigma^{\alpha(\Phi)} \cdot \exp[\lambda(\Phi) \Pi] + \varepsilon_\Phi, \quad (1)$$

а кинетика изменения поврежденности описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\Pi}{dt} = S(\Phi) \left(\frac{\sigma_u}{1 - \Pi} \right)^{g(\Phi)}, \quad \Pi(0) = 0, \quad \Pi(t_p) = 1. \quad (2)$$

Здесь использованы обозначения, t – время, $A(\Phi), \alpha(\Phi), \lambda(\Phi), S(\Phi), g(\Phi)$ – коэффициенты, учитывающие влияние флюенса нейтронов. При формулировании уравнений (1) и (2) принято, что влияние радиационного облучения не сказывается на виде уравнений, а приводит только к изменению коэффициентов. Такое допущение широко используется при моделировании процессов деформирования и разрушения [2,3,7,8].

Для момента времени $t=0$, то есть для случая «мгновенного, но статического» нагружения уравнение (1) превращается в степенную зависимость:

$$\varepsilon_{\text{мгн}} = A \cdot \sigma^\alpha. \quad (3)$$

После интегрирования кинетического уравнения (2) для случая постоянных величин коэффициентов и заданного уровня напряжений $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$, получается формула для определения поврежденности:

$$P = 1 - \left[1 - S(g+1)\sigma_0^g t \right]^{\frac{1}{g+1}}, \quad (4)$$

из которой при задании предельного значения параметра поврежденности $P=1$, получается уравнение кривой длительной прочности:

$$t_p = 1 / \left[S(g+1)\sigma_0^g \right]. \quad (5)$$

При наличии экспериментальных данных по длительной прочности материала, полученных на необлученных образцах и образцах, облученных до определенной дозы Φ , с помощью метода наименьших квадратов определяются значения коэффициентов S и g по формулам:

$$g = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln t_i^* \cdot \sum_{i=1}^N \ln \sigma_i - \sum_{i=1}^N \ln t_i^* \sigma_i \right] / \left[\sum_{i=1}^N (\ln \sigma_i)^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \ln \sigma_i \right)^2 \right], \quad (6)$$

$$S = \left(\frac{1}{g+1} \right) \exp \left(- \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln t_i^* \sigma_i^g \right). \quad (7)$$

Здесь использованы обозначения t_i^* – время до разрушения при напряжении σ_i , i – промежуточная точка на кривой длительной прочности, N – общее количество экспериментальных точек.

После подстановки выражения (4) в формулу (1) получаем выражение для полной деформации, справедливое при постоянном значении напряжения $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$:

$$\varepsilon = A \cdot \sigma_0^\alpha \cdot \exp \left\{ \lambda \left[1 - \left(1 - S(g+1)\sigma_0^g t \right)^{\frac{1}{g+1}} \right] \right\}. \quad (8)$$

Если вычесть из полной деформации ε мгновенную деформацию при статическом нагружении (3), то получится выражение для деформации «ползучести», создаваемой накоплением повреждений:

$$p = \varepsilon - \varepsilon_{\text{мгн}} = A \cdot \sigma_0^\alpha \cdot \exp \left\{ \lambda \left[1 - \left(1 - S(g+1)\sigma_0^g t \right)^{\frac{1}{g+1}} \right] - 1 \right\}. \quad (9)$$

Используя выражение (9) для аппроксимации экспериментальных кривых ползучести, полученных при нескольких уровнях напряжений, методом наименьших квадратов можно получить выражение для определения коэффициента λ :

$$\lambda = \left[\sum_{i=1}^M P_i \ln(1 + p_i / (A \cdot \sigma_i^\alpha)) \right] / \left[\sum_{i=1}^M (P_i)^2 \right]. \quad (10)$$

Здесь P_i, σ_i, t_i – координаты промежуточных точек i на кривых ползучести,

$P_i = P(t_i, \sigma_i)$ определяется по (4)

M – общее число точек на экспериментальных кривых ползучести.

Величины A и α , входящие в (10), могут быть определены путем аппроксимации зависимостью (3) экспериментальной диаграммы «мгновенного» деформирования материала, что при использовании метода наименьших квадратов дает:

$$A = \exp \left[L \cdot \frac{\left(\sum_{i=1}^L \ln \sigma_i \right)}{L} + \frac{\left(\sum_{i=1}^L \ln \varepsilon_i \right)}{L} \right] \quad (11)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^L (\ln \sigma_i)(\ln \varepsilon_i) - \frac{\sum_{i=1}^L (\ln \sigma_i)(\ln \varepsilon_i)}{L} / \left[\frac{\sum_{i=1}^L (\ln \sigma_i)^2}{L} + \sum_{i=1}^L (\ln \sigma_i)^2 \right] \quad (12)$$

Здесь буквой L обозначено общее число точек на экспериментальной кривой «мгновенного» деформирования материала, i – промежуточные точки на этой кривой.

При наличии экспериментальных данных по длительной пластичности, то есть при наличии экспериментальной зависимости деформации ползучести при разрушении от напряжения при $\Pi=I$, величина λ определяется с помощью выражения, полученного преобразованием формулы (10):

$$\lambda = \frac{1}{R} \left[\sum_{i=1}^R \ln(1 + p_i^* / A \cdot \sigma_i^\alpha) \right]. \quad (13)$$

Здесь p_i^*, σ_i – значения координат точек на экспериментальной кривой длительной пластичности $p^*(\sigma)$, а величина R – общее количество точек на этой экспериментальной кривой. Используя выражение в круглых скобках в (13), получим уравнение кривой длительной пластичности:

$$p^* = A(\exp \lambda - 1)\sigma^\alpha. \quad (14)$$

Полученные формулы были использованы для идентификации приведенной модели деформирования и разрушения с использованием экспериментальных данных для стали ОХ16Н15МЗБ [2, 3], то есть для определения коэффициентов модели. Результаты идентификации представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты идентификации модели деформирования и разрушения изгибаемого конструктивного элемента (для стали ОХ16Н15МЗБ) [The identification results of model of deformation and bent structural element destruction (for ОХ16Н15МЗВ steel)]

Обозначения коэффициентов	A , МПа	α	λ	S	g
Значения коэффициентов для стали без облучения	5×10^{-6}	1	28,4	$1,1 \times 10^{-47}$	18,21
Значения коэффициентов для стали после облучения	$5,7 \times 10^{-6}$	1	23,06	$1,83 \times 10^{-25}$	9,47

С использованием полученных значений коэффициентов были построены расчетные кривые ползучести (пунктиром) для необлученного (1) и облученного (2) материала, приведенные на рисунке 1. Там же точками показаны экспериментальные значения деформаций ползучести.

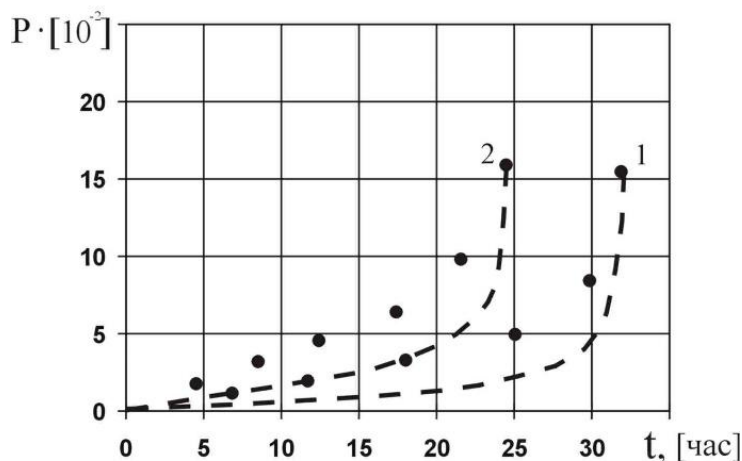


Рис. 1. – Расчетные (пунктиром) и экспериментальные (точками) кривые ползучести облученного (2) и необлученного (1) материала из стали OX16H15M3B [The calculated (dashed) and experimental (crooked) creep curves of irradiated (2) and unirradiated (1) OX16H15M3B steel material]

Также была построена расчетная кривая длительной пластичности (жирная линия), приведенная на рисунке 2. На этом же рисунке показан коридор разброса экспериментальных данных по длительной пластичности (заштрихованная часть графика). Как видно, имеется достаточно хорошее совпадение кривых ползучести и в облученном и в необлученном состоянии и кривой длительной пластичности с экспериментальными данными. Отличие теоретических кривых ползучести от экспериментальных в средней области аппроксимации вызвано тем, что коэффициенты S, g, λ определялись с использованием экспериментальных данных по длительной прочности и длительной пластичности, то есть по предельным характеристикам, и при этом кинетика ползучести на среднем участке не учитывалась.

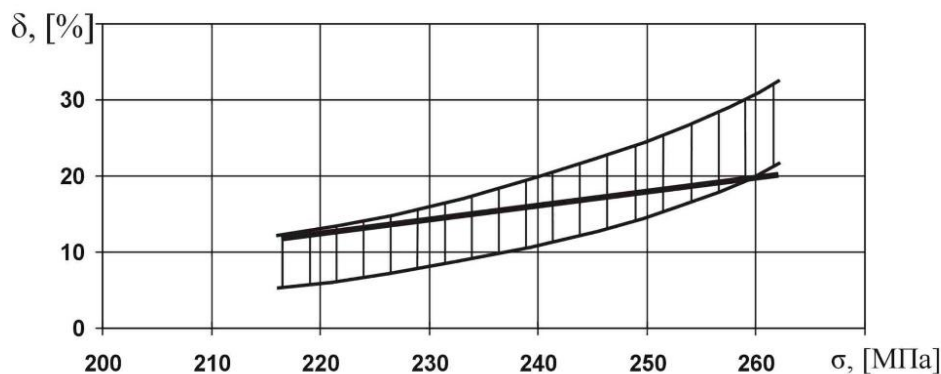


Рис. 2. – РАСЧЁТНАЯ КРИВАЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ СТАЛИ OX16H15M3B и экспериментальный коридор разброса [The calculated curve of long-term ductility for OX16H15M3B steel and the experimental band gap]

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ИЗГИБАЕМОГО КОНСТРУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Исследуется поведение и длительная прочность балки прямоугольного поперечного сечения размерами $b \times h$, изгибаемой моментом M . Для балки из материала, одинаково работающего на растяжение и сжатие, гипотеза плоских сечений имеет вид:

$$\varepsilon = \chi z, \quad (15)$$

где использованы обозначения ε , – деформация в точке с ординатой z по высоте сечения балки, χ – кривизна балки.

Разрешая уравнение (1) относительно напряжения и учитывая (15), получим следующий закон распределения нормальных напряжений по высоте сечения балки (зависимость коэффициентов от флюенса Φ опущена):

$$\sigma = \left[\frac{\chi \cdot z}{A} \exp(-\lambda \cdot \Pi) \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (16)$$

Из-за наличия в показателе степени величины $1/\alpha$, а также зависимости параметра поврежденности $\Pi(z)$ от координаты z напряжения по высоте балки будут распределяться нелинейно. Для случая чистого изгиба, который испытывает балка, внешний момент будет уравниваться внутренним моментом, создаваемым напряжениями:

$$M = \iint_F \sigma_z dF = b \int_{-h/2}^{h/2} \sigma \cdot z dz. \quad (17)$$

В этом уравнении равновесия F – площадь сечения балки, b – ее ширина.

После подстановки выражения для напряжений (16) в это уравнение можно получить следующее выражение для нахождения кривизны балки:

$$\chi = \frac{M \cdot A}{2b} / \left[\int_0^{h/2} z (z \cdot \exp(-\lambda \Pi))^{1/\alpha} dz \right]. \quad (18)$$

Уравнение накопления повреждений (2) с учетом выражения для напряжений (16) примет следующий вид:

$$\frac{d\Pi}{dt} = S \left[\left(\frac{\chi \cdot z}{A} \cdot \exp(-\lambda \Pi) \right)^{1/\alpha} \left(\frac{1}{1-\Pi} \right) \right]^g, \quad (19)$$

$$\Pi(0) = 0; -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}$$

Система уравнений, включающая уравнения (1), (16), (18), (19) и (2.75) позволяет расчетным путем проанализировать кинетику развития напряжений, деформаций, повреждений во времени для разных точек сечения балки при разных условиях облучения.

Приведенные выше уравнения использовались для расчета кинетики деформирования во времени балки сечением $b = 10$ мм, $h = 20$ мм, из Стали

ОХ16Н15М3Б, изгибаемой моментом $M = 2,24 \times 10^5$ МПа·мм³. Результаты расчета приведены на рисунках 3,4,5.

Рисунок 3 иллюстрирует кинетику нарастания кривизны балки для двух случаев – без облучения и после облучения. На рисунке 4 показаны эпюры напряжений на верхней половине высоты сечения балки для разных моментов времени. На рисунке 5 приведены эпюры повреждений также по высоте верхней половины сечения балки после облучения флюенсом $\Phi = 5,5 \times 10^{12}$ нейтрон/см² для разных моментов времени.

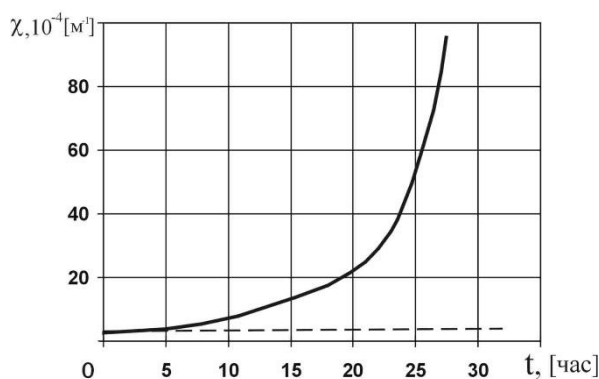


Рис. 3. – Изменение кривизны облученной (сплошная линия) и необлученной (пунктир) балки из стали ОХ16Н15М3Б с течением времени [The change in the curvature of the irradiated (solid line) and unirradiated (dashed) girder from ОХ16Н15М3В steel with time]

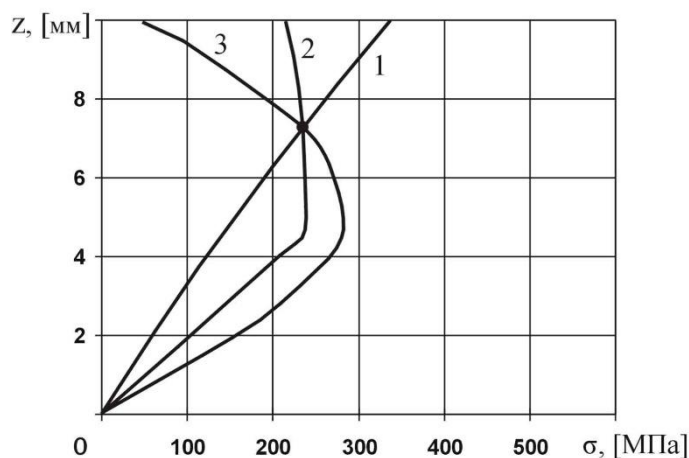


Рис. 4. – Эпюры напряжений по высоте верхней половины сечения балки для разных моментов времени: 1 – при $t = 0$ часов, 2 – при $t = 9$ часов, 3 – при $t = 20$ часов [Stress diagrams for the height of the beam upper section half for different times: 1 - at $t = 0$ hours, 2 - at $t = 9$ hours, 3 - at $t = 20$ hours]

С целью контроля правильности полученных результатов, отдельные результаты расчета изгибаемой балки с помощью методики [17] сравнивались с экспериментальными данными для образца, растягиваемого некоторым напряжением σ_0 . Приведенное напряжение σ'_0 , соответствующее изгибающему моменту $M = 2,24 \times 10^5$ МПа·мм³ равно 336 МПа. Напряжение растяжения σ_0 , соответствующее приведенному напряжению: $\sigma = \sigma'_0 \cdot \beta$ [17] равно $\sigma_0 = 235$ МПа.

На рисунке 6 показана (сплошной линией) экспериментальная кривая ползучести образца, растягиваемого напряжением $\sigma_0 = 235$ МПа и (пунктиром) расчетная кривая

нарастания деформации ползучести в точке балки с координатой $z = h/2$ для приведенного напряжения $\sigma'_0 = 336$ МПа. Сопоставление кривых ползучести дает возможность заключить об удовлетворительном совпадении расчета с экспериментом по долговечности.

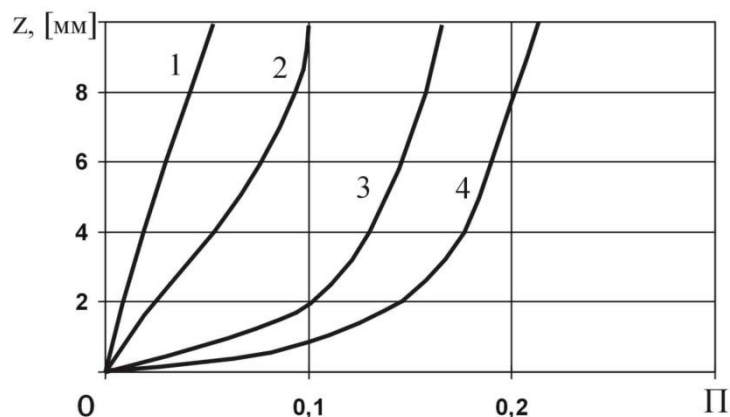


Рис. 5. – Эпюры распределения параметра поврежденности Π на верхней половине высоты сечения балки из стали ОХ16Н15М3В в моменты времени: 1 – при $t = 3$ часа, 2 – при $t = 15$ часов, 3 – при $t = 25$ часов, 4 – при $t = 29$ часов [The distribution diagrams of the damage parameter P on the upper half of the beam sectional height of OX16H15M3B steel at the time instants: 1 for $t = 3$ hours, 2 for $t = 15$ hours, 3 for $t = 25$ hours, 4 for $t = 29$ hours]

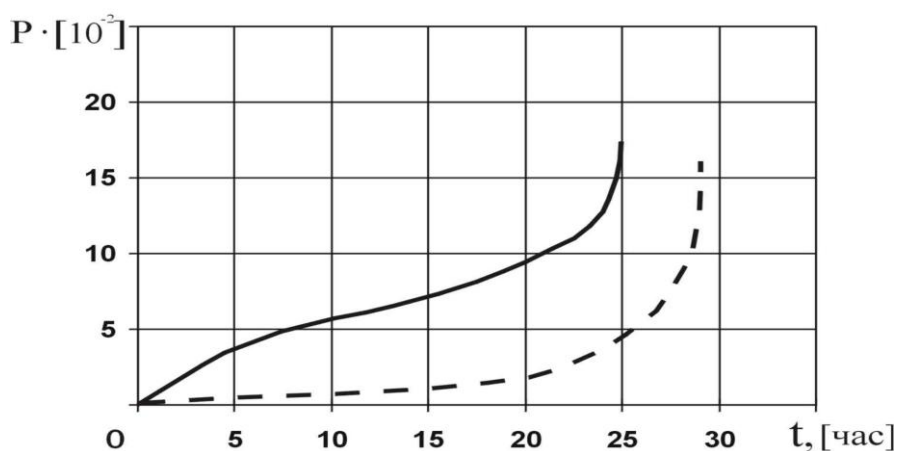


Рис. 6. – Сопоставление кривых ползучести при растяжении образца (сплошная линия) и при изгибе балки (пунктир) [Comparison of creep curves when the specimen is stretched (solid line) and when the beam is bent (dotted line)]

ВЫВОДЫ

1) Анализ результатов проведенных расчетов позволяет заключить, что применение зависимостей (1) и (2) позволяет производить численное моделирование поведения изгибаемых элементов при ползучести, как в условиях отсутствия радиационного облучения, так и после их облучения определенной дозой. При этом с целью повышения точности получаемых результатов рекомендуется при выполнении процедуры идентификации моделей использовать не только экспериментальные данные по длительной прочности и длительной пластичности, но и кривые ползучести.

2) Для моделирования поведения изгибаемых элементов конструкций в процессе

радиационного облучения необходимо использовать для идентификации моделей (нахождения коэффициентов и функций) экспериментальные данные, полученные не после облучения образцов, а в процессе их облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубровский, В.Б. Радиационная стойкость строительных материалов [Текст] / В.Б. Дубровский. – М.: Стройиздат, 1977. – 278 с.
2. Киселевский, В.Н. Изменение механических свойств сталей и сплавов при радиационном облучении [Текст] / В.Н. Киселевский. – Киев: «Наукова думка», 1977. – 104 с.
3. Писаренко, Г.С. и др. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках [Текст] / Г.С. Писаренко, В.Н. Киселевский. – Киев: «Наукова Думка», 1979. – 281 с.
4. Дубровский, В.Б. и др. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующего излучения [Текст] / В.Б. Дубровский, З. Аблевич. – М.: Стройиздат, 1983. – 240 с.
5. Гусев, Н.Г. и др. Защита от ионизирующих излучений [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Климанов, В.П. Машкович, А.П. Суворов. – Т. 1. – М.: Энергоатомиздат. – 1989. – 509 с.
6. Овчинников, И.И. и др. Влияние радиационных сред на механические характеристики материалов и поведение конструкций (обзор) [Электронный ресурс] / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, М.Ю. Богина, А.В. Матора // Науковедение: сетев. журн. – 2012. – №4.
7. Лихачев, Ю.И. и др. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов [Текст] / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пупко. – М.: Атомиздат, 1975. – 378 с.
8. Овчинников, И.Г. и др. Учёт радиационного облучения при расчёте тонкостенных элементов конструкций [Текст] / И.Г. Овчинников В.В. Петров. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1982. – 18 с. Деп в ВИНТИ 07. 01. 1982 №1341-82.
9. Лихачев, Ю.И. и др. Методы расчета на прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов [Текст] / Ю.И. Лихачев, В.Я. Пупко, В.В. Попов. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 210 с.
10. Куликов, И.С. и др. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов [Текст] / И.С. Куликов, Б.Е. Тверковкин. Под ред. В.Б. Нестеренко. – Минск: Наука и техника. 1984. – 104с.
11. Тутнов, А.А. Методы расчета работоспособности элементов конструкций ядерных реакторов [Текст] / А.А. Тутнов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 184 с.
12. Андреев, В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел [Текст] / В.И. Андреев: монография. – М.: Издательство АСВ, 2002. – 288 с.
13. Марголин, Б.З. и др. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 1. Физико-механическая модель [Текст] / Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко, И.П. Курсевич, А.А. Бучатский // Проблемы прочности. – 2006. – №3. – С. 5–22.
14. Марголин, Б.З. и др. Моделирование разрушения материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения. Сообщение 2. Прогнозирование длительной прочности [Текст] / Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко, И.П. Курсевич, А.А. Бучатский // Проблемы прочности. – 2006. – №5. – С. 5–16.
15. Андреев, В.И. и др. Влияние радиационного облучения на напряженное состояние сферической бетонной оболочки [Текст] / В.И. Андреев, И.А. Дубровский // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2010. – №6(1&2). – С. 39–44.
16. Овчинников, И.И. и др. Модели и методы, используемые при расчете и моделировании поведения конструкций, подвергающихся воздействию радиационных сред [Электронный ресурс] / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, М.Ю. Богина, А.В. Матора // Науковедение: сетевой журн. – 2013. – №2. – С. 1–30.
17. Лихачев, Ю.И. и др. Длительная прочность и ползучесть оболочек твэл быстрых реакторов [Текст] / Ю.И. Лихачев, В.Н. Вахромеева // Сборник докладов I-го симпозиума стран членов СЭВ. – Обнинск, 1967. – 158 с.

REFERENCES

- [1] Dubrovskiy V.B. Radiatsionnaya stoykost stroitelnykh materialov [Radiation Resistance of Building Materials]. M. Pub. Stroyizdat, 1977, 278 p. (in Russian)

- [2] Kiselevskiy V.N. *Izmenenie mekhanicheskikh svoystv staley i splavov pri radiatsionnom obluchenii* [Changes in Mechanical Properties of Steels and Alloys under Radiation Irradiation]. Kiev. Pub. Naukova dumka, 1977, 104 p. (in Russian)
- [3] Pisarenko G.S., Kiselevskiy V.N. *Prochnost i plastichnost materialov v radiatsionnykh potokakh* [Strength and Plasticity of Materials In Radiation Fluxes]. Kiev. Pub. Naukova Dumka, 1979, 281 p. (in Russian)
- [4] Dubrovskiy V.B., Ablevich Z. *Stroitelnye materialy i konstruksii zashchity ot ioniziruyushchego izlucheniya* [Building Materials and Structures for Protection against Ionizing Radiation]. M. Pub. Stroyizdat, 1983, 240 p. (in Russian)
- [5] Gusev N.G., Klimanov V.A., Mashkovich V.P., Suvorov A.P. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniya* [Protection against Ionizing Radiation]. Vol. 1. M. Pub. Energoatomizdat, 1989, 509 p. (in Russian)
- [6] Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bogina M.Yu., Matora A.V. *Vliyanie radiatsionnykh sred na mekhanicheskie kharakteristiki materialov i povedenie konstruksiy (obzor)* [Influence of Radiation Media on the Mechanical Characteristics of Materials and Behavior of Structures (review)]. *Naukovedenie* [Naukovedenie], 2012, №4. (in Russian)
- [7] Likhachev Yu.I., Pupko V.Ya. *Prochnost teplovydelyayushchikh elementov yadernykh reaktorov* [Strength of Fuel Elements of Nuclear Reactors]. M. Pub. Atomizdat, 1975, 378 p. (in Russian)
- [8] Ovchinnikov I.G., Petrov V.V. *Uchet radiatsionnogo oblucheniya pri raschete tonkostennykh elementov konstruksiy* [Accounting for Radiation Exposure in Calculation of Thin-Walled Structural Elements]. Saratov, 18 p. *Deponirovano v VINITI* [Deposited in VINITI] 07. 01. 1982 №1341-82 (in Russian)
- [9] Likhachev Yu.I., Pupko V.Ya., Popov V.V. *Metody rascheta na prochnost' teplovydelyayushchikh elementov yadernykh reaktorov* [Methods for Calculating the Strength of Nuclear Reactor Fuel Elements]. M. Pub. Energoatomizdat, 1982, 210 p. (in Russian)
- [10] Kulikov I.S., Tverkovkin B.E. *Prochnost teplovydelyayushchikh elementov bystrykh gazookhlazhdaemykh reaktorov* [Strength of Fuel Elements of Fast Gas-Cooled Reactors]. *Pod redakciej* [Edited by] V.B. Nesterenko. Miskn. Pub. Nauka i tekhnika, 1984, 104 p. (in Russian)
- [11] Tutnov A.A. *Metody rascheta rabotosposobnosti elementov konstruksiy yadernykh reaktorov* [Methods for Calculating the Operability of Structural Elements of Nuclear Reactors]. M. Pub. Energoatomizdat, 1987, 184 p. (in Russian)
- [12] Andreev V.I. *Nekotorye zadachi i metody mekhaniki neodnorodnykh tel* [Some Problems and Methods of Mechanics of Inhomogeneous Bodies]. M. Pub. ASV, 2002, 288 p. (in Russian)
- [13] Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P., Buchatskiy A.A. *Modelirovanie razrusheniya materialov pri dlitel'nom staticheskom nagruzhении v usloviyakh polzuchesti i neytronного oblucheniya. Soobshchenie 1. Fiziko-mekhanicheskaya model* [Modeling the Destruction of Materials under Prolonged Static Loading under Conditions of Creep and Neutron Irradiation. Message 1. Physico-Mechanical Model]. *Problemy prochnosti* [Strength Problems], 2006, №3, pp. 5–22. (in Russian)
- [14] Margolin B.Z., Gulenko A.G., Kursevich I.P., Buchatskiy A.A. *Modelirovanie razrusheniya materialov pri dlitel'nom staticheskom nagruzhении v usloviyakh polzuchesti i neytronного oblucheniya. Soobshchenie 2. Prognozirovanie dlitel'noy prochnosti* [Modeling the Destruction of Materials under Prolonged Static Loading under Conditions of Creep and Neutron Irradiation. Message 2. Forecasting Long-Term Strength]. *Problemy prochnosti* [перевод], 2006, №5, pp. 5–16. (in Russian)
- [15] Andreev V.I., Dubrovskiy I.A. *Vliyanie radiatsionnogo oblucheniya na napryazhennoe sostoyanie sfericheskoy betonnoy obolochki. Influence of Radiation Irradiation on the Stressed State of a Spherical Concrete Shell. International Journal for Computational Civiland Structural Engineering*, 2010, №6(1&2), pp. 39–44. (in Russian)
- [16] Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Bogina M.Yu., Matora A.V. *Modeli i metody, ispolzuemye pri raschete i modelirovanii povedeniya konstruksiy, podvergayushchikhsya vozdeystviyu radiatsionnykh sred* [перевод]. *Naukovedenie* [Models and Methods Used in the Calculation and Modeling of the Behavior of Structures Exposed to Radiation Media], 2013, №2, pp. 1–30. (in Russian)
- [17] Likhachev Yu.I., Vakhromeeva V.N. *Dlitel'naya prochnost i polzuchest obolochek tvел bystrykh reaktorov* [Long-Term Strength and Creep of Fuel Rod Clusters for Fast Reactors]. *Sbornik dokladov I simpoziuma stran chlenov SEV* [Collected Papers of the First Symposium of the CMEA Countries]. Obninsk, 1967, 158 p. (in Russian)

Calculation of Stressed State and Durability of Bending Element Taking into Account Radiation Environment Influence

R.B. Garibov*, I.G. Ovchinnikov***

** Balakovo Engineering Technical Institute - branch of the National Research Nuclear University MEPhI,
Balakovo, Saratov Region, Russia*

***Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia*

Abstract – The paper considers problem of computational modeling of the bent structural element (beam) subjected to a joint action of a bending moment and radiation irradiation. The basic equations of the model taking into account the process of damage accumulation and the influence of irradiation are given. Using the experimental data on the basis of the method of least squares, the model was identified, that is, the values of the coefficients were determined. Comparison of the calculation results with the help of the coefficients found with the experimental data was made, which showed good agreement of the results. Then the simulation of the irradiated beam loaded with a moment is performed numerically using the above equations with the found values of the coefficients. The effect of irradiation on the kinetics of the change in curvature is studied; stresses and damages are plotted along the cross-section of the beam at different instants of time. It is recommended to use not only experimental data on long-term strength and long-term ductility but also creep curves to improve the accuracy of modeling results when identifying models.

Keywords: radiation, radiation exposure, modeling, fluence, durability, bending element, beam.

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

УДК 528.48

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРТНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ МОСТОВОГО
КРАНА КМ-30, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО НА ОБЪЕКТЕ
ВЫВОДИМОГО ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА НОВОВОРОНЕЖСКОЙ
АЭС, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

© 2018 Ю.И. Пимшин*, В.А. Наугольнов*, С.М. Бурдаков*, И.Ю. Пимшин**

* 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 определена оценка остаточного ресурса кранового оборудования АЭС на основе его комплексного обследования. Оценка остаточного ресурса выполняется с целью определения возможности и срока дальнейшей эксплуатации кранового оборудования АЭС. Расчеты выполнялись в соответствии с действующей нормативной документацией. По результатам экспертного метода оценки остаточного ресурса, может быть назначен остаточный срок эксплуатации исследуемого кранового оборудования не менее 5 лет.

Ключевые слова: крановое оборудование АЭС, цикл работы крана, коэффициент распределения нагрузок крана, характеристическое число, остаточный ресурс.

Поступила в редакцию: 23.05.2018

В результате технического диагностирования мостового крана, отработавшего нормативный срок эксплуатации и модернизированного в последние годы путем установки с помощью узлов крепления (см. рис. 1, рис. 2) двух талей на грузоподъемной тележке, был выполнен расчет пролетных балок крана с целью определения условия достаточности их прочности [1–10].

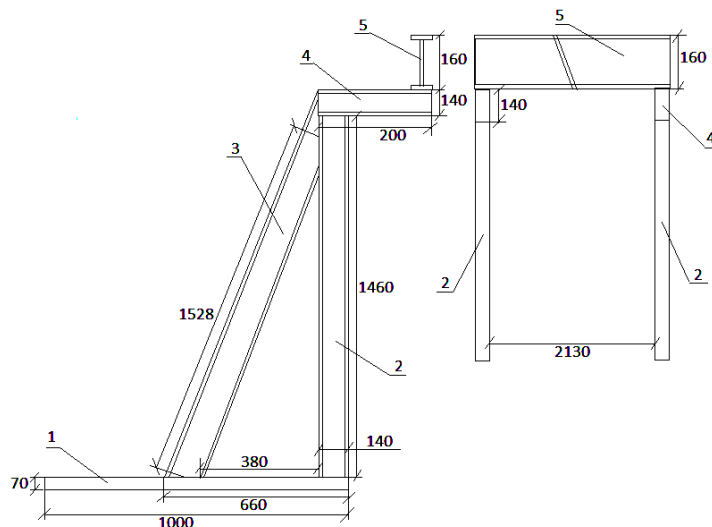


Рис. 1. – Обмерочный чертеж узла крепления тали г/п 3 т. зав. № xxxx
1 – опора; 2 – стойка; 3 – подкос; 4 – консоль; 5 – двутавр, направляющая тали
[Measuring drawing of the fastening unit of the hoist rope 3 tons No. xxxx
1 – support; 2 – rack; 3 – hinge; 4 – console; 5 – I-beam, guide rail]

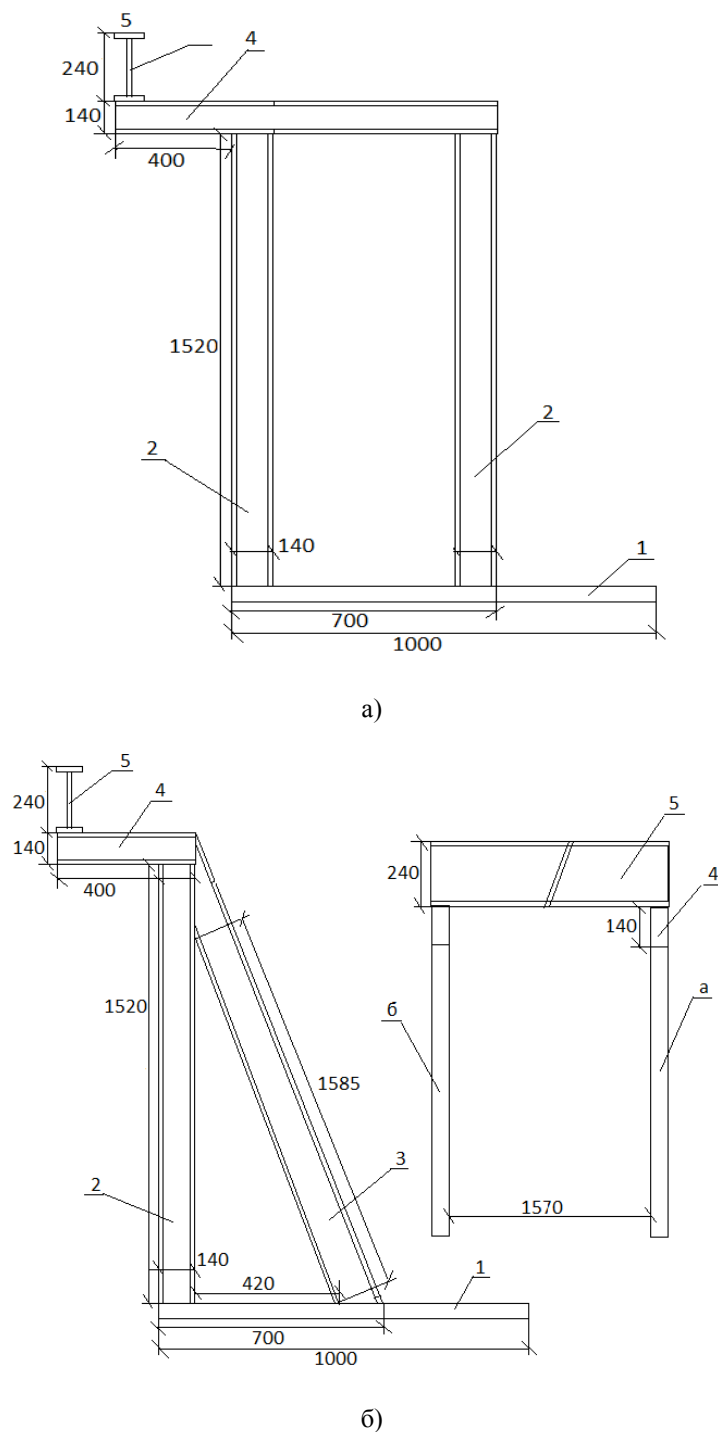


Рис. 2. – Обмерный чертеж узла крепления тали г/п 2 т. зав. № xxxx
 1 – опора; 2 – с тойка; 3 – подкос; 4 – консоль; 5 – двутавр, направляющая тали
 [Measuring drawing of the fastening unit of the hoist rope 2 tons No. xxxx
 1 – support; 2 – rack; 3 – hinge; 4 – console; 5 – I-beam, guide rail]

Основные характеристики исследуемого крана приведены в таблице №1.

Геометрические параметры пролетных балок определенные в процессе исследования крана приведены в таблице №2.

Для оценки соответствия фактических технических характеристик крана зав. №xxx, рег. №xxx, нормативным требованиям провели расчет прочностных характеристик мостовых пролетных балок крана с учетом дополнительно смонтированного

оборудования.

Мост крана выполнен из двух стальных пролетных и двух концевых балок. Пролетные балки изготовлены в виде сварных конструкций коробчатого сечения (см. рис. 2).

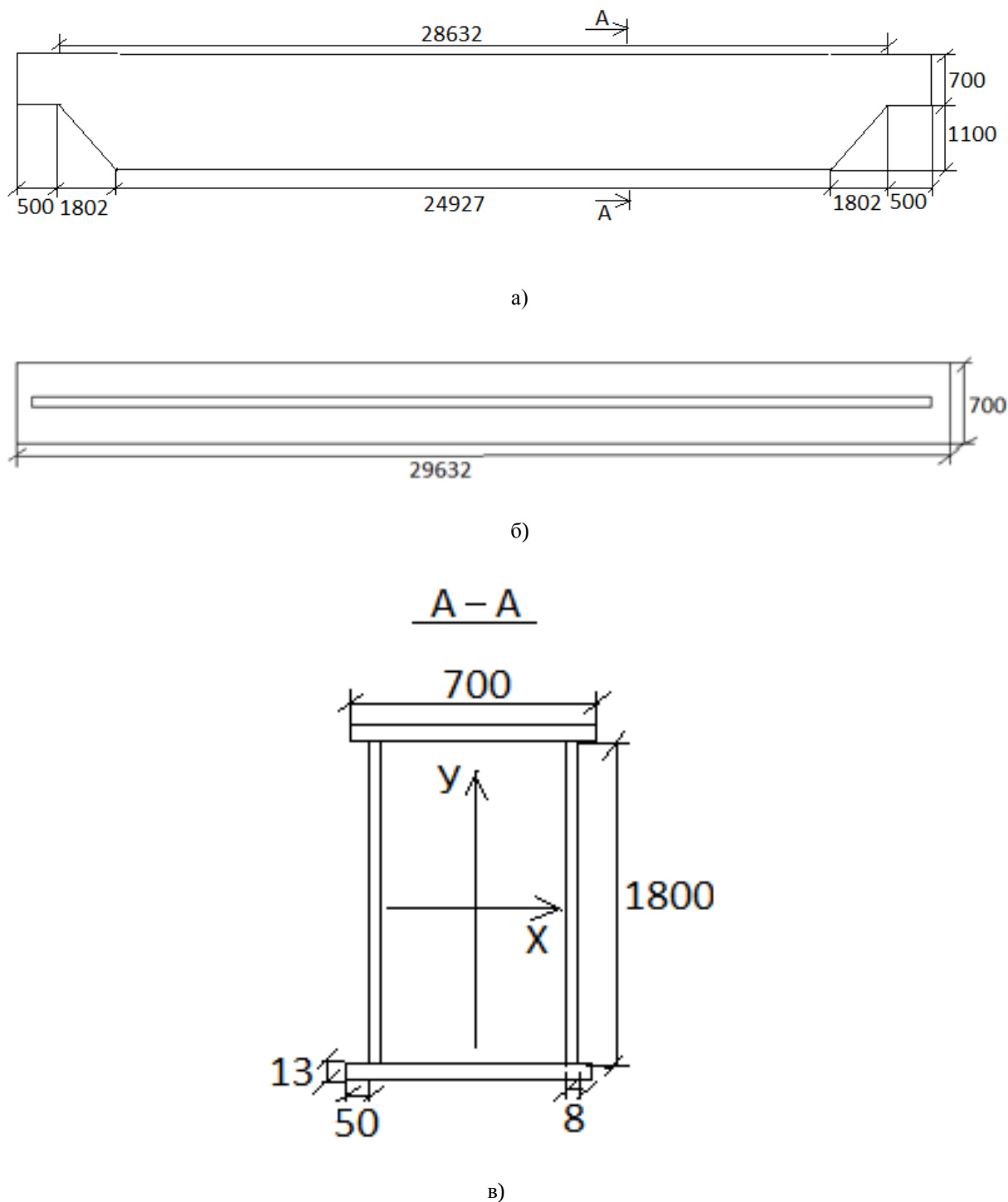


Рис. 2. – Схема балки и ее сечение [The beam scheme and its section]

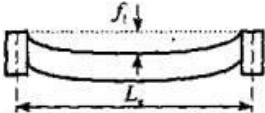
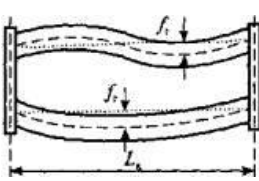
Таблица 1. – Основные характеристики крана мостового электрического КМ-30/5/3/2
[The main characteristics of КМ-30/5/3/2 bridge electric crane]

Выписка из паспорта

Кран мостовой электрический КМ-30/5/3/2, Зав. №xxx, Рег. №xxxx

1	Тип крана	Кран мостовой электрический КМ-30/5/3/2
2	Грузоподъемность, т	30/5/3/2
3	Высота подъема груза м.	30/30/12/18
4	Пролет крана (если пролет изменялся, то в скобках указать первоначальный), м	29
5	Группа классификации (режим работы) крана паспортная по ГОСТ или ИСО	легкий (A1)
6	Скорости механизмов, м/с.:	
	передвижения крана	
	– максимальная м/мин	48,5
	– минимальная м/мин	
	передвижения грузоподъемной тележки	
	– максимальная м/мин	22,0
	– минимальная м/мин	
7	Скорость подъема м/с основного крюка нормальная вспомогательного крюка нормальная	2,08 12,75/8,0/8,0
8	Тип металлоконструкции крана (коробчатого сечения, сварная, ферменная, клепаная и т.д.)	коробчатого сечения
9	Масса крана в рабочем состоянии, т	57.431
10	Максимальная нагрузка на колесо крана при работе, кН	354
11	Паспортные данные о нижнем и верхнем пределах температур рабочего состояния крана	+15 ⁰ С +30 ⁰ С
12	Паспортные данные о нижнем и верхнем пределах температур нерабочего состояния крана	±40 ⁰ С
12	Завод-изготовитель	Днепропетровский механический завод г. Запорожье
13	Дата изготовления	1964 г.
14	Заводской номер	xxx
15	Регистрационный номер	xxx
16	Дата ввода в эксплуатацию	1965 г.
17	Дата последнего технического освидетельствования	xxxxxx
18	Дата последнего обследования крана	xxxxxx

Таблица 2. – Величины предельно допустимых остаточных деформаций металлоконструкций [Values of maximum permissible residual deformations of metal structures]

Вид остаточной деформации	Графическое представление деформации	Предельно допустимая величина остаточной деформации
Отрицательный остаточный прогиб каждой из главных балок (тележка без груза у тупикового упора)		а) $f_l \leq 0,0022L_k$ эксплуатация крана допускается до следующего очередного обследования; б) $0,0022L_k < f_l \leq 0,0035L_k$ эксплуатация крана допускается на срок не более 1 года или до достижения металлоконструкцией прогиба предельной величины, при условии выполнения контрольных замеров f_l не реже 1 раза в 4 мес.;
Изогнутость главных балок в плане		д) $f_l \leq 0,002L_k$ эксплуатация крана допускается до следующего обследования, если кривизна балок не сопровождается нарушением допуска на сужение / уширение колеи рельсового пути грузовой тележки

Результаты контроля

№ балки	$f_l(\text{мм})$	$0,002L_k(\text{мм})$	$f_l \leq 0,002L_k$
1	-8	± 58	выполняется
2	-3	± 58	выполняется
	$f_l(\text{мм})$	$0,0022L_k(\text{мм})$	$f_l \leq 0,0022L_k$
1	+4	$\pm 63,8$	выполняется
2	-30	$\pm 63,8$	выполняется

Расчет пролетных балок моста производили на статическую прочность. При этом расчетная схема для пролетной балки представляет собой однопролетную с шарнирным опиранием балку (см. рис. 3). Кроме нагрузки от грузоподъемной телеги в виде двух сил $2N$, на пролетную балку действует распределенная постоянная нагрузка от веса самой балки q_b и лежащего на ней подкранового рельса $q_{\text{рельс}}$. Расчетное напряжение в сечении пролетной балки моста сформируется при расположении тележки в середине пролета. Для обеспечения прочности пролетной балки должно выполняться нижеследующее условие:

$$\sigma_p = \frac{M_{\max}}{W_x} \leq [\sigma]_H; \quad (1)$$

где $[\sigma]_H$ – допускаемое напряжение для стали; для легкого режима работы $[\sigma]_H = 170$, Н/мм²;

$M_{\max}$ – максимальный изгибающий момент, Н·мм;

W_x – момент сопротивления сечения относительно оси X, мм³.

Максимальный расчетный изгибающий момент, действующий в середине пролетной балки, определяется:

$$M_{\max} = q_{\text{рельс}} \cdot \omega + q_b \cdot \omega + 2 \cdot N \cdot y;$$

где $q_{\text{рельс}}, q_{\text{б}}$ – расчетное значение распределенной нагрузки соответственно от веса рельса и балки, кг/м;
 ω – площадь треугольной линии влияния опорного давления R , м².

Расчетные значения распределенной нагрузки вычисляется:

$$\begin{aligned} q_{\text{рельс}} &= m_{\text{рельс}} \cdot \gamma_{\text{пост}}; \\ q_{\text{б}} &= m_{\text{б}} \cdot \gamma_{\text{пост}}; \end{aligned}$$

где $m_{\text{рельс}}, m_{\text{б}}$ – вес одного погонного метра рельса и пролетной балки;
 $\gamma_{\text{пост}}$ – коэффициент надежности по нагрузке.

По ГОСТ 4121-96, $m_{\text{рельс}}=46.10$ кг/м. Расчетная величина одного метра массы пролетной балки $m_{\text{б}} = 368.95$ кг/м. Согласно СНиП2.01.07-85*, $\gamma_{\text{пост}} = 1.05$.

$$\begin{aligned} q_{\text{рельс}} &= 46.10 \cdot 1.05 = 48.405 \text{ кг/м}; \\ q_{\text{б}} &= 368.95 \cdot 1.05 = 387.398 \text{ кг/м}. \end{aligned}$$

Площадь треугольной линии влияния опорного давления R :

$$\omega = \frac{l_6^2}{8}; \quad \omega = 105.125 \text{ м}^2.$$

Для вычисления расчетных усилий N на пролетную крановую балку:

$$2 \cdot N = 0.5 \cdot (G_{\text{тел}} + G_{\text{гр}});$$

где $G_{\text{тел}}$ – масса тележки с учетом дополнительно смонтированного оборудования, кг;
 $G_{\text{гр}}$ – максимальная масса груза поднимаемого краном, кг.

$$2 \cdot N = 0.5 \cdot (14603 + 30000) = 22301,5 \text{ кг}$$

При этом $y=6.55$ м.

$$M_{\text{max}} = 48.405 \cdot 105.125 + 387.398 \cdot 105.125 + 22301,5 \cdot 6.55 = 191888,6153 \text{ кг} \cdot \text{м}$$

Момент сопротивления определяется:

$$W_x = \frac{2 \cdot J_x}{H}, \text{ мм}^3,$$

где $J_x = J_{x1} + J_{x2}$ – момент инерции всего сечения, мм⁴;

$$J_{x1} = 2 \cdot \left(\frac{B \cdot \delta^3}{12} + \frac{B \cdot \delta \cdot (H + \delta)^2}{4} \right) - \text{момент инерции горизонтальных поясов, мм}^4;$$

$$J_{x2} = 2 \cdot \frac{\delta \cdot H^3}{12} - \text{момент инерции вертикальных стенок, мм}^4.$$

$$W_x = 3.1154 \cdot 10^7 \text{ мм}^3.$$

$$\sigma_p = 191888,6153 \cdot 10^3 / 3.1154 \cdot 10^7 = 6,1593 \text{ кг/мм}^2; \quad \sigma_p = 60,40 \text{ Н/мм}^2.$$

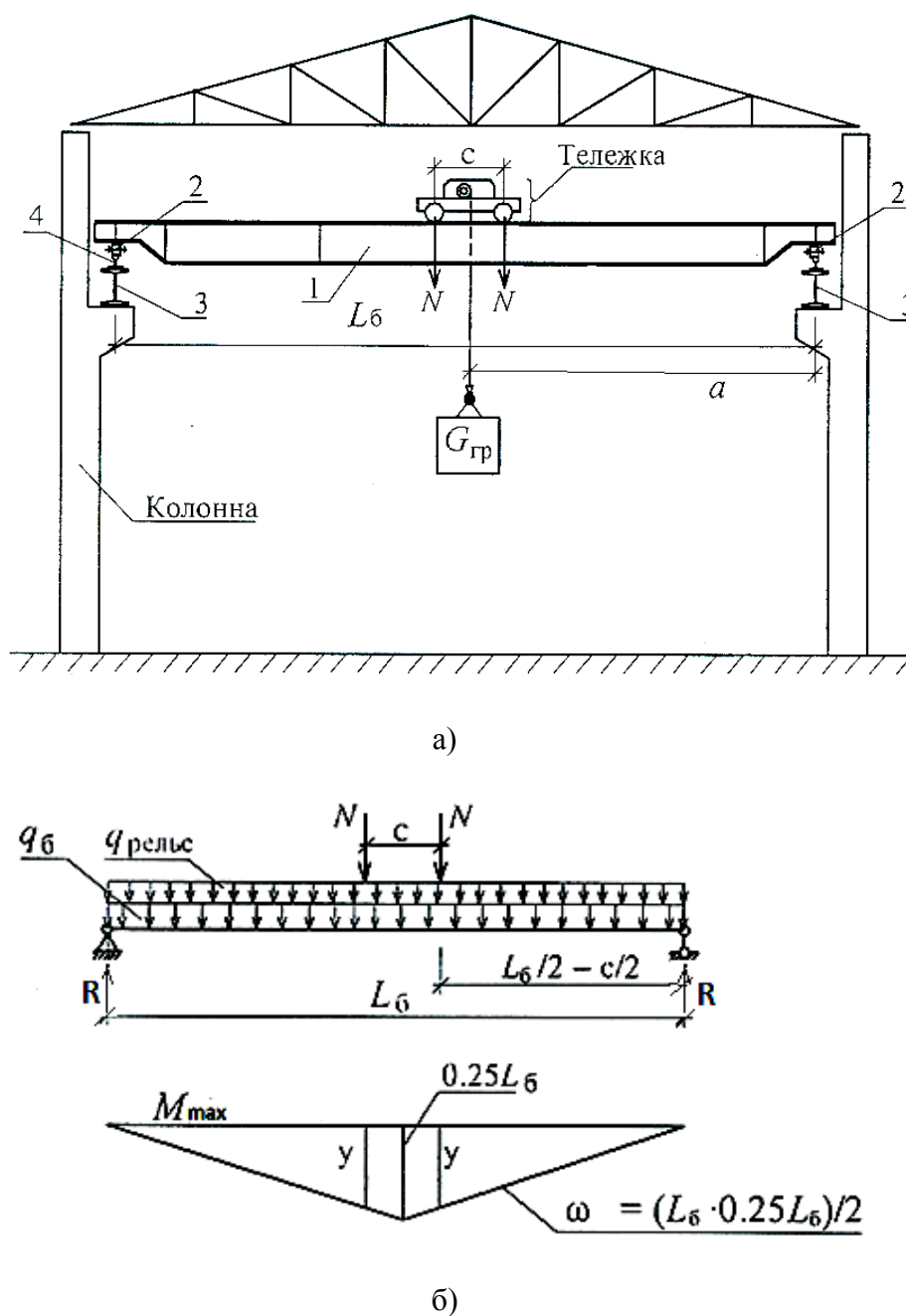


Рис. 3. – Схема мостового крана к проверочному расчету пролетной балки

а – общая схема размещения крана; б – расчетная схема для определения максимального изгибающего момента в пролетной балке;

1 – пролетная балка крана; 2 – ходовая часть крана; 3 – подкрановая балка; 4 – крановый рельс [Scheme of the bridge crane for the span beam verification calculation. а – general crane layout ; б – the design scheme for determining the maximum bending moment in the span beam; 1 – crane span; 2 – crane running gear; 3 – crane beam; 4 – crane rail]

Заключение по результатам расчета пролетных балок моста на статическую прочность: в конструкции крана изменилась, в результате модернизации, масса грузоподъемной тележки, на которую дополнительно было смонтировано оборудование массой 1111 кг. Данное конструктивное изменение не привело к утере прочности пролетных балок. Кран может эксплуатироваться без каких-либо дополнительных ограничений далее, с соблюдением его условий и правил эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПБ 03-517-02 Общие правила промышленной безопасности для организаций, осуществляющих деятельность в области промышленной безопасности опасных производственных объектов [Текст]. – [Б.м., б.г.].
2. РД 10-08-92 Инструкция по надзору за изготовлением, ремонтом и монтажом подъемных сооружений (с изменениями №1, утвержденными Госгортехнадзором России 09.01.98 г.) [Текст]. – [Б.м., б.г.].
3. РД 0:48:0075.01.05 Рекомендации по устройству и безопасной эксплуатации надземных крановых путей (справочное издание) [Текст]. – [Б.м., б.г.].
4. Пимшин, Ю.И. и др. Движение мостовых кранов, имеющих конические колёса [Электронный ресурс] / Ю.И. Пимшин, В.А. Наугольнов, И.Ю. Пимшин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4/2. – Режим доступа: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1384 – 20.04.2018.
5. Пимшин, Ю.И. и др. Общие принципы технической диагностики мостовых кранов [Электронный ресурс] / Ю.И. Пимшин, В.А. Наугольнов, И.Ю. Пимшин // Инженерный вестник Дона. – 2012. – №4/2. – Режим доступа: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1385 – 20.04.2018.
6. Пимшин, Ю.И. и др. Оценка геометрических характеристик ходовой части мостовых кранов [Текст] / Ю.И. Пимшин, В.А. Наугольнов, И.Ю. Пимшин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2010. – Специальный выпуск. – С. 128–130.
7. Пимшин, Ю.И. и др. Способ диагностики геометрических параметров ходовой части мостовых кранов: Пат. № 2382347 С1. Оpubл. 20.02.2010, Бюл. № 8. [Текст] / Ю.И. Пимшин, И.Ю. Пимшин, В.А. Наугольнов. Способ диагностики геометрических параметров ходовой части мостовых кранов радиального действия: Пат. № 2384831 С1. Оpubл. 20.03.2010, Бюл. № 8.
8. Пимшин, Ю.И. и др. Способ диагностики геометрических параметров ходовой части мостового крана кругового действия: Пат. № 2425348 G01M 17/06 B66C13/16. Оpubл. 27.07.2011, Бюл. №21. [Текст] / Ю.И. Пимшин, В.А. Наугольнов, И.Ю. Пимшин.
9. Malet J., Maquaire O., Calais E. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 2002, Vol. 43, №1, pp. 33–54.

REFERENCES

- [1] PB 03-517-02 Obshhie pravila promyshlennoj bezopasnosti dlja organizacij, osushhestvlyajushhih dejatel'nost v oblasti promyshlennoj bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh objektov [General Rules of Industrial Safety for Organizations Carrying out Activities in the Field of Industrial Safety of Hazardous Production Facilities]. (in Russian)
- [2] RD 10-08-92 Instrukcija po nadzoru za izgotovleniem, remontom i montazhom podjemnyh sooruzhenij (s izmenenijami №1, utverzhdennymi Gosgortehnadzorom Rossii 09.01.1998 [Instructions for the Manufacture Supervision, Repair and Installation of Lifting Structures (as amended by No. 1, approved by the Gosgortekhnadzor of Russia)]. (in Russian)
- [3] RD 0:48:0075.01.05 Rekomendacii po ustrojstvu i bezopasnoj jekspluatacii nadzemnyh kranovyh putej (spravochnoe izdanie) [Recommendations for the Installation and Safe Operation of Elevated Crane Tracks (reference publication)]. (in Russian)
- [4] Pimshin Ju.I., Naugolnov V.A., Pimshin I.Ju. Dvizhenie mostovyh kranov, imejushhih konicheskie koljosa [The Motion of Bridge Cranes Having Tapered Wheels]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [The Engineer Messenger of the Don], 2012, №4/2, Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1384 (in Russian)
- [5] Pimshin Ju.I., Naugolnov V.A., Pimshin I.Ju. Obshhie principy tehničeskoj diagnostiki mostovyh kranov [General Principles of Overhead Crane Technical Diagnostics]. *Inzhenernyj vestnik Dona* [The Engineer Messenger of the Don], 2012, №4/2, Available at: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1385 (in Russian)
- [6] Pimshin Ju.I., Naugolnov V.A., Pimshin I.Ju. Ocenka geometricheskih harakteristik hodovoj chasti mostovyh kranov [Estimation of Geometric Characteristics of Overhead Crane Running Gear]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehničeskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. North-Caucasian Region. Technical Science], 2010, Specialnyj

- vypusk [Special issue], pp. 128–130. (in Russian)
- [7] Pimshin Ju.I., Pimshin I.Ju., Naugolnov V.A. Sposob diagnostiki geometricheskikh parametrov hodovoj chasti mostovykh kranov. Patent №2382347 S1. Opublikovano 20.02.2010, Bulletin №8 [Method for Diagnosing the Geometric Parameters of the Traveling Part of Overhead Cranes: Pat. No. 2382347 C1. Pub. 20.02.2010, Bul. № 8.]. (in Russian)
- [8] Pimshin Ju.I., Naugolnov V.A., Pimshin I.Ju. Sposob diagnostiki geometricheskikh parametrov hodovoj chasti mostovogo kрана krugovogo dejstviya. Patent №2425348 G01M 17/06 B66C13/16. Opublikovano 27.07.2011, Bulletin №21 [Method for Diagnosing the Geometric Parameters of the Running Gear of Bridge Crane of Circular Action: Pat. No. 2425348 G01M 17/06 B66C13 / 16. Pub. 07/27/2011, Bul. №21.]. (in Russian)
- [9] Malet J., Maquaire O., Calais E. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 2002, Vol. 43, №.1, pp. 33–54. (in English)

The Results of the Expert Examination of the KM-30 Bridge Crane Operated at the Facility Decommissioned at the Novovoronezh NPP by the Results of its Technical Diagnosis

Yu.I. Pimshin*¹, V.A. Naugolnov*, S.M. Burdakov*², I.Yu. Pimshin³**

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

¹ e-mail: yipimshin@mephi.ru

ORCID: 0000-0001-6610-8725

WoS ResearcherID: J-6791-2017

² e-mail: SMBurdakov@mephi.ru

ORCID iD: 0000-0002-8599-6008

WoS ResearcherID: F-6903-2017

*** Don State Technical University*

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

³ e-mail: geodez@aanet.ru

Abstract – The work gives the assessment of a residual resource of the NPP crane equipment on the basis of its comprehensive examination. The assessment of a residual resource is carried out to define the opportunity and term of the NPP crane equipment further operation. Calculations are made according to the existing standard documentation. The residual operation term of the studied crane equipment can be appointed not less than 5 years by results of an expert method of a residual resource assessment.

Keywords: NPP crane equipment, crane operation cycle, distribution coefficient of crane loadings, characteristic number, residual resource.

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

УДК 621.316

**ВОЗНИКНОВЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В ЦЕПЯХ 24 кВ
ГЕНЕРАТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС**

© 2018 С.А. Баран, В.В. Нечитайлов, В.В. Краснокутский

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

В работе производится анализ причин, приводящих к ложному срабатыванию защит и отключению энергоблоков АЭС, а также к повреждению измерительных трансформаторов напряжения, установленных в сети генераторного напряжения.

Рассматриваются причины, приводящие к появлению в сети феррорезонансных явлений и способ их устранения.

В сети генераторного напряжения АЭС наблюдался ряд аварийных отключений энергоблоков от сети действием защиты от замыкания на землю. Согласно проведенным расследованиям аварийных ситуаций часть из них оказалась ложной. Часто причиной ложных аварий является появление в сети феррорезонансных явлений, вызванных коммутацией нагрузки, кратковременным появлением дугового замыкания, а также рядом других причин.

При появлении феррорезонанса, общеизвестно, что в ряде случаев возможно появление высоких кратностей перенапряжений, опасных для трансформаторов напряжения, так и для межвитковой изоляции генератора.

В данной статье проанализированы возможности проявления феррорезонансных явлений в сети генераторного напряжения энергоблоков АЭС при различных аварийных режимах.

Ключевые слова: феррорезонанс, генераторное напряжение, изолированная нейтраль, трансформатор напряжения, перенапряжение.

Поступила в редакцию: 21.05.2018

По данным отечественных и зарубежных исследований, а также опыта эксплуатации, в сетях с изолированной нейтралью, чаще всего, возникновение перенапряжений связано с неполнофазными режимами. Неполнофазный режим это не только явный обрыв фазного провода или перегорание предохранителя, но и те случаи, когда отключение ненагруженного понижающего трансформатора или электродвигателя происходит коммутационным аппаратом с неодновременным отключением всех трех фаз. Если неодновременность отключения составляет 0,04 с (2 периода частоты 50 Гц) и более, то за это время успевают развиваться перенапряжения опасной величины. При неполнофазных режимах возникают феррорезонансные перенапряжения, которые превышают уровень изоляции электродвигателей. Они опасны для разрядников с шунтирующими сопротивлениями и ОПН, а также для трансформаторов напряжения своей длительностью, так как существуют столько времени – сколько существует неполнофазный режим [1]. Их опасность состоит еще и в том, что при неполнофазных режимах – наличие или отсутствие компенсации не влияет на вероятность возникновения и уровень перенапряжений [2–4], при этом установка защитных аппаратов на шинах бесполезна, так как перенапряжения возникают на отделенном от шин участке фазы (за обрывом фазы).

Ежегодно в энергосистемах страны по оценкам СО ЦДУ повреждается до 6-8% от числа установленных ТН в сетях с изолированной нейтралью. Повреждения происходят при воздействии на ТН перемежающейся дуги в тех случаях, когда зажигание и

гашение дуги происходит один раз в период или реже, или когда возникает регулярная дуга с зажиганием один раз в период при напряжении только одной полярности. Повреждения ТН от воздействия феррорезонансных перенапряжений происходят практически после каждого случая образования схемы, приводящей к возбуждению ФРП. Повреждения ТН происходят даже при наличии активных сопротивлений, включенных в схему разомкнутого треугольника.

Анализ причин повреждений ТН показывает, что ТН является достаточно надежным аппаратом и не повреждается ни по каким другим причинам, кроме воздействия режимов – на которые он не рассчитан. Таким режимом является длительное протекание по первичной обмотке ТН токов, величина которых значительно превышает величину тока, максимально допустимого по тепловой устойчивости изоляции обмотки.

Установлено, что такие токи возникают при феррорезонансных процессах в контуре, образующемся при определенных режимах сети, в которой установлен ТН. Возникновение ФРП становится возможным из-за явлений, вызывающих насыщение стали магнитопровода ТН. Это приводит к плавному изменению индуктивности обмотки ТН и при определенном соотношении параметров емкостей элементов сети, включенных последовательно и параллельно с ТН, возникает ФРП [5].

В разветвленных цепях с различной схемой соединения нелинейных катушек и емкостей возникают более сложные явления, которые невозможно рассматривать отдельно как феррорезонанс напряжений или токов. В общем случае феррорезонансные явления характеризуются скачкообразным переходом из режима сильного насыщения ферромагнитного сердечника катушки индуктивности в слабонасыщенный режим или наоборот. При этом возникают скачки напряжения и тока в режиме сильного насыщения. Таким образом, перенапряжения и протекание через обмотку токов, превышающих предельно допустимый ток, могут привести к тепловому разрушению изоляции обмотки и витковым замыканиям.

Необходимо различать несколько типов резонансных перенапряжений, развивающихся в сетях с изолированной нейтралью с электромагнитными ТН и приводящих к их повреждениям: дуговые перенапряжения, феррорезонанс при неполнофазных режимах сети и феррорезонанс, возникающий при коммутациях с ненагруженными линиями. Все три типа схожи по внешнему проявлению и последствиям: возникает смещение нейтрали сети, развиваются колебательные процессы на промышленной частоте либо на высших и низших гармониках, приводящие к перенапряжениям на линии и сверхтокам в трансформаторах напряжения и, как следствие, к перегреву и повреждению ТН [5]. Феррорезонанс во многих случаях являлся причиной возникновения пробоя изоляции на землю. С другой стороны, дуговые замыкания на землю часто приводят к возникновению и развитию феррорезонансных процессов.

В сетях 6-35 кВ замыкания фазы на землю в кабелях имеют место при относительно небольших расстояниях между фазой и заземленными элементами [6]. Дуга горит в узком пространстве при наличии газового дутья, то есть, при достаточно интенсивной деионизации. После возникшего пробоя изоляции (чаще всего в момент близкий к максимуму напряжения поврежденной фазы) в сети идет переходный процесс и через место повреждения протекают высокочастотные свободные составляющие тока замыкания на землю.

Обрыв связи с землей происходит в результате погасания дуги, которая гаснет при прохождении тока дуги через нуль. Однако этот обрыв может происходить при первом или последующих переходах высокочастотного свободного тока через нуль. При переходе через нуль вынужденной составляющей тока замыкания также имеет

место обрыв связи фазы с землей. Так как наша задача имеет предельный характер для оценки возможности появления феррорезонансных явлений, то в качестве предельного случая стоит рассмотреть погасание дуги при переходе через нуль высокочастотной составляющей тока замыкания. В момент прохождения тока через нуль в месте замыкания в дуговом промежутке преобладает процесс деионизации, который приводит к восстановлению электрической прочности. Скорость этого процесса определяется конкретными условиями охлаждения, то есть газовой средой, дутьем и размерами дугового промежутка [7]. Моделирование этого процесса крайне затруднено из-за большого многообразия условий горения дуги. В связи с этим, в технике высоких напряжений при выполнении расчетов принято повторный пробой производить при достижении напряжения на поврежденной фазе максимального значения [8].

Опасные феррорезонансные явления в сетях средних классов напряжений могут возникнуть в случае, если по каким-либо причинам напряжение на трансформаторе напряжения (ТН) электромагнитного типа превышает номинальное более чем на 25...30%. Такие условия часто возникают в процессе ОДЗ уже при первом зажигании дуги.

Эквивалентная простейшая схема, позволяющая пояснить физику феррорезонансных колебаний, обусловленных насыщением стали магнитопровода трансформатора на рисунке 1.

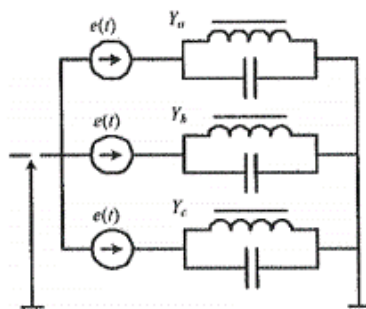


Рис. 1. – Схема для пояснения физики возникновения феррорезонансных явлений
[Scheme for explaining the physics of ferroresonance phenomena appearance]

В нормальном эксплуатационном режиме индуктивность намагничивания ТН представляет собой большую величину, и результирующая проводимость фазы носит емкостный характер. Если в каком-либо переходном режиме повышается напряжение на одной фазе, то проводимость этой фазы может носить уже индуктивный характер, и, поскольку за счет изолированной нейтрали все фазы связаны между собой, может возникнуть явление, которое иногда называют «неустойчивостью нейтрали» [9].

При этом процессы, происходящие в отдельных фазах, оказываются взаимосвязанными, что приводит к возникновению колебаний широкого спектра частот: 3ω , 2ω , $\omega/2$, $\omega/3$. Именно субгармонические колебания и обуславливают появление сверхтоков в обмотках высокого напряжения ТН. Так для трансформаторов напряжения типа ЗНОЛ.06-24 опасным являются длительные токи, превышающие 0,045 А. Допустимый ток для ТН типа ТJS7 оценивается в интервале 0,06 А. Развитие ультрагармонических колебаний приводит к появлению перенапряжений.

При возникновении устойчивого феррорезонансного процесса может возникнуть броски тока намагничивания большой величины, способные разрушить обмотку. Согласно [10] в таблице 1 приведены токи плавления проводов различного диаметра из разных материалов.

В цепях с трансформаторами напряжения возможность возникновения и существования феррорезонансного процесса определяется выполнением трех условий. Первое условие: величина эквивалентной емкости сети ($C_{\text{экв}}$) должна находиться в

пределах определяемых пределами изменения индуктивности трансформатора напряжения, т.е.

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_{xx}} \leq C_{э\kappa\beta} \leq \frac{1}{\omega^2 \cdot L_s} \quad (1)$$

где L_{xx} – индуктивность холостого хода xx , Гн;

L_s – индуктивность насыщения, Гн;

ω – угловая частота напряжения сети, 1/с

Таблица 1. – Зависимость величины тока плавления от диаметра провода [Dependence of melting current on the wire diameter]

Ток, А	Диаметр провода, мм			
	Медь	Алюминий	Сталь	Олово
1	0,039	0,066	0,132	0,183
2	0,069	0,104	0,189	0,285
3	0,107	0,137	0,245	0,38
5	0,18	0,193	0,346	0,53
7	0,203	0,25	0,45	0,66
10	0,250	0,305	0,55	0,85
15	0,32	0,4	0,72	1,02
20	0,39	0,485	0,87	1,33
25	0,46	0,56	1	1,56
30	0,52	0,64	1,15	1,77
35	0,58	0,7	1,26	1,95
40	0,63	0,77	1,38	2,14
45	0,68	0,83	1,5	2,3
50	0,73	0,89	1,6	2,45
60	0,82	1	1,8	2,8
70	0,91	1,1	2	3,1
80	1	1,22	2,2	3,4
90	1,08	1,32	2,38	3,65
100	1,15	1,42	2,55	3,9

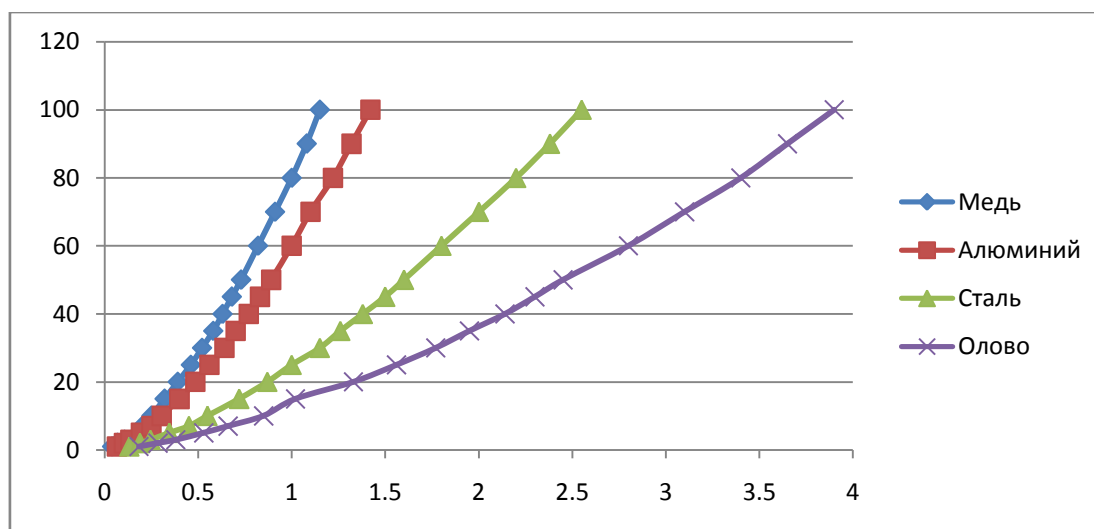


Рис. 2. – Зависимость величины тока плавления от диаметра провода [Dependence of the melting current on the wire diameter]

Возбуждение ФРП связано с нелинейным изменением индуктивности ТН. Причем, начавшееся плавное изменение индуктивности происходит до тех пор, пока не возникнут условия резонанса $\omega \cdot L = 1/\omega \cdot C$ (такие как в контуре с линейной индуктивностью), что приводит к установившемуся ФРП. Это очевидно т.к. ФРП с одним и тем же ТН возникает в схемах с различной эквивалентной емкостью [11].

Рассматривая процессы намагничивания стального сердечника ТН, можно определить пределы изменения индуктивности ТН: максимальное значение индуктивности равно X_X и может быть вычислено с учетом того, что относительная магнитная проницаемость имеет при этом максимальное значение и равна $\mu_{max} = 25000$, а максимальное значение индуктивности ТН принимает при достижении насыщения, после чего остается неизменной и равной индуктивности обмотки ТН без магнитопровода, т.к. относительная магнитная проницаемость стали при насыщении близка к единице.

Поток магнитопровода составляет всего $(1,3 - 1,4) \cdot \Psi_n$. Если бы этот поток равномерно распределился по всему магнитопроводу, то он бы насытил его полностью, и динамическая магнитная проницаемость упала бы до единицы. В действительности поток распределен неравномерно, и отдельные части магнитопровода остаются неполностью насыщенными. Поэтому средняя магнитная проницаемость стали несколько возрастает, что увеличивает индуктивность насыщения в 1,3–1,4 раза.

Второе условие: для возбуждения ФРП в контуре с параметрами, отвечающими первому условию, необходимо событие, приводящее к изменению индуктивности ТН. Таким событием в сети с изолированной нейтралью является отключение дугового металлического замыкания на землю, при котором напряжение на ТН скачком изменяется от $U_{л}$ до $U_{ф}$.

При скачкообразном изменении напряжения на ТН в его магнитопроводе сохраняется остаточный поток, соответствующий величине напряжения до скачка ($\Psi_{ост}$), на который накладывается переменный поток от напряжения, установившегося после скачка ($\Psi_{уст}$). После отключения замыкания в момент напряжения на фазе А после переходного процесса устанавливается практически равным $U_{л}$ ($1,71 \cdot U_{ф}$), а поток той же фазы ТН возрастает от величины $\Psi_{л}$ до отключения замыкания до величины ($\Psi_{л} + \Psi_{ф}$) после отключения замыкания. Ток первичной обмотки ТН резко возрастает, что соответствует режиму насыщения ТН [12].

ФРП возбуждится в контуре с резонансными параметрами после скачка напряжения в том случае, если суммарный поток в магнитопроводе ТН окажется больше потока начального насыщения магнитопровода ($\Psi_{нач.нас}$), так как это вызовет насыщение магнитопровода и плавное изменение индуктивности ТН:

$$\Psi_{ост} + \Psi_{уст} \geq \Psi_{нач.нас}$$

Третье условие: величина энергии, поступающей в феррорезонансный контур при каждом изменении параметра (индуктивности ТН), должна быть больше величины потерь в нем.

ФРП относится к параметрическим процессам, так как возникает, когда создаются условия (первое и второе) для изменения одного из параметров контура – индуктивности ТН, которая изменяется скачкообразно от индуктивности холостого хода L_{xx} до индуктивности насыщения L_s . Параметрический резонанс изучен достаточно полно. Известно, что при скачкообразном увеличении индуктивности энергия контура возрастает на величину $0,5 \cdot (L_{xx} - L_s)$ уменьшении индуктивности не вызывает изменение запаса электромагнитной энергии контура, так как на это изменение не затрачивается работа.

Частота свободных колебаний тока в параметрическом контуре равна:

$$\gamma = \sqrt{(1/C \cdot L)^2 - (R/2 \cdot L)^2} \quad (2)$$

Эта собственная частота определяется исключительно параметрами L, C и R контура. Если активное сопротивление мало по сравнению с волновыми сопротивлениями контура, то с достаточной точностью:

$$\gamma = \sqrt{(1/C \cdot L)^2} \quad (3)$$

В этом контуре собственная частота зависит только от индуктивности и емкости контура и совпадает с его резонансной частотой.

По мере увеличения активного сопротивления возрастает относительное значение второго члена под корнем в выражении (2) и собственная частота уменьшается, то есть колебания свободного тока становятся более медленным [13]. Когда активное сопротивление достигает значения:

$$R = 2 \cdot \sqrt{L/C} \quad (4)$$

собственная частота обращается в нуль, колебания превращаются и свободный ток убывает по аperiодическому закону, и в этом случае возникновение резонансных колебаний невозможно. Внесение в контур затухания, эквивалентного затухания, вносимому критическим сопротивлением, предотвращает возникновения ФРП. Величина резистора, необходимого для подавления ФРП, может быть вычислена по (4), однако наличие нелинейной зависимости $L=f(i)$ усложняет расчеты и требует применения ЭВМ [14–16].

Упростим (4), используя тот факт, что при ФРП сохраняются действительными равенства индуктивной и емкостной проводимостей контура, как и при резонансе в линейном контуре, что позволяет выразить индуктивность ТН через эквивалентную емкость контура, которая остается постоянной, то есть не зависит от величины напряжения или тока, как это имеет место для индуктивности ТН. Тогда:

$$L = 1/\omega^2 \cdot C, \text{ а } L = 2/\omega \cdot C_{\text{экв}} \quad (5)$$

Определенное значение критического сопротивления позволяет оценить значение потерь, необходимых для подавления ФРП, через затухание в контуре или через значение активной составляющей тока замыкания на «землю».

Необходимая величина затухания может быть внесена подключением резистора в первичную цепь. Так в сети с изолированной нейтралью наиболее эффективно подключение резистора к нейтрали сети, например, к нейтрали силового питающего трансформатора [15].

Определение оптимальных параметров разрядного устройства, способного защитить аппараты сети от воздействия неблагоприятных факторов, сопровождающих практически все изученные виды повреждений с однофазным замыканием на «землю», необходимо производить, исходя из следующих требований:

1) Разрядное устройство должно длительно выдерживать рабочее напряжение сети и отвечать требованиям ПУЭ.

2) Подключение разрядного устройства лишь в минимальной степени должно

изменить режим нейтрали сети, то есть не должно сколько-нибудь существенно увеличивать ток замыкания на «землю».

3) Разряд емкости сети через это разрядное устройство должен происходить за время меньше половины периода промышленной частоты ($\tau \leq 0,01$ с).

4) Затухание, вносимое эквивалентным сопротивлением разрядного устройства в контур, образуемый сетью, должно быть не меньше затухания вносимого сопротивлением, равным критическим сопротивлению для данного контура.

Как было показано выше, кроме подавления ФРП такой резистор предотвращает и возникновение дуговых перенапряжений. Этот резистор успевает разрядить сеть и при наиболее неблагоприятном режиме дугового замыкания на «землю», когда дуга замыкается один раз в период и является фактически выпрямителем, что приводит к перевозбуждению индуктивных элементов сети постоянным током.

Дополнительным положительным фактором заземления нейтрали через активное сопротивление является улучшение условий работы релейной защиты от замыканий на «землю» за счет появления стабильной активной составляющей в токе замыкания на «землю» [17–18]. Такой способ защиты сетей с изолированной нейтралью рекомендован симпозиумом, кроме того, похожее техническое решение применяется для защиты сетей СН тепловых и атомных станций.

В сетях собственных нужд электростанций применяются напряжения 6–10 кВ, и применительно к схемам сетей данного напряжения, при выборе режима заземления нейтрали сети, необходимо использовать градацию электрических сетей по двум наиболее важным признакам – величине тока замыкания на землю и наличию вращающихся машин.

При токе замыкания на землю более 20 А в сетях 6 и 10 кВ с комбинированным питанием от энергосистем и собственных нужд электростанций при действии релейной защиты на отключение присоединения с ОЗЗ используется резистор в нейтрали сети с ограниченным временем протекания тока. Ток резистора изменяется от десятков до сотен ампер и зависит от типа защит от ОЗЗ.

Наличие вращающихся машин является принципиальным фактором, поскольку предполагает обязательное отключение присоединения с двигателем (или генератором), на котором произошло ОЗЗ, и накладывает более жесткие требования к допустимым величинам перенапряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев, В.Г. и др.* Феррорезонанс в сетях 6–10 кВ [Текст] / В.Г. Алексеев, М.Х. Зихерман // Электрические станции. – 1978. – №1. – С. 63–65.
2. *Петров, О.А.* Смещение нейтрали при пофазных отключениях и обрывах фаз в компенсированной сети [Текст] / О.А. Петров // Электрические станции. – 1972. – №9. – С. 57–61.
3. *Халилов, Ф.Х.* Еще раз о дуговых перенапряжениях в распределительных сетях 6–35 кВ. [Текст] / Ф.Х. Халилов // Промышленная энергетика. – 1985. – №11. – С.37–41.
4. *Эль-Хатиб Адна Ибрагим.* Феррорезонансные процессы в трансформаторах напряжения систем электроснабжения и способы их предотвращения [Текст] / Эль-Хатиб Адна Ибрагим : дис. ... канд. техн. наук. – Донецк: Дон. политех. ин-т, 1992. – 132 с.
5. *Базуткин, В.В. и др.* Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов [Текст] / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; Под общей редакцией В.П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Электроатомиздат, 1986. – 464 с.: ил.
6. *Лихачев, Ф.А.* Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов [Текст] / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
7. *Гиндуллина, Ф.А. и др.* Перенапряжения в сети 6–35 кВ [Текст] / Ф.А. Гиндуллина, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дузользон, Ф.Х. Халилов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.: ил.
8. *Сирота, И.М. и др.* Защита от замыканий на землю на стороне генераторного напряжения

- блоков генератор-трансформатор, охватывающая нейтраль генератора [Текст] / И.М. Сирота, А.Е. Богаченко. – Киев: Изд-во ИЭД АН УССР, 1972. – 21 с.
9. Сивокобыленко, В.Ф. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций: Учеб. пособие / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев. – Донецк: РОА ДонНТУ, 2002. – 136 с.
 10. Сиротинский, Л.И. Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах [Текст] / Л.И. Сиротинский. – М.: Госэнергоиздат, 1959.
 11. Халилов, Ф.Х. и др. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений [Текст] / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др. Под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджикибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002.
 12. Базылев, Б.И. и др. Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю [Текст] / Б.И. Базылев, А.М. Брянцев, А.Г. Долгополов и др. – СПб.: Изд. ПЭИПК, 1999.
 13. Беляков, Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью [Текст] / Н.Н. Беляков // Электричество. – 1957. – №5. – С. 31–36.
 14. Сивокобыленко, В.Ф. и др. Режимы работы нейтрали распределительных сетей 6-10 кВ В.Ф. Сивокобыленко, М.П. Дергилев // Сб. научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, Вып. 67. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – С. 49–58.
 15. Сивокобыленко, В.Ф. и др. Анализ процессов дуговых замыканий на землю в сетях собственных нужд ТЭС и АЭС В.Ф. [Текст] / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Махинда Сильва // Сб. научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика, Вып. 17. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – С. 129–133.
 16. Дергилев, М.П. и др. Неснижаемые кратности перенапряжений в сети 6-35 кВ с резистивным заземлением нейтрали [Текст] / М.П. Дергилев, В.К. Обабков // Наука, техника, бизнес в энергетике – 2002. – №5. – С. 10–14.
 17. Калантаров, П.Л. и др. Расчет индуктивностей [Текст] / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с: ил.
 18. Неклепаев, Б.Н. и др. Электрическая часть электростанций и подстанций [Текст] / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

REFERENCES

- [1] Alekseev V.G., Ziherman M.H. Ferrozonans v setjah 6-10 kV [Ferroresonance in 6-10 kV Networks]. Elektricheskie stancii [Electric Stations], 1978, №1, pp. 63–65. (in Russian)
- [2] Petrov O.A. Smeshhenie nejtrali pri pofaznyh otkljuchenijah i obryvah faz v kompensirovannoj seti [The Neutral Bias for Phase-Out Tripping and Phase Failure in Compensated Network]. Elektricheskie stancii [Electric Stations], 1972, №9, pp. 57–61. (in Russian)
- [3] Halilov F.H. Eshhe raz o dugovyh perenaprzazhenijah v raspredelitelnyh setjah 6-35 kV [Once Again about Arc Overvoltages in Distribution Networks 6-35 kV.]. Promyshlennaja energetika [Industrial Power Engineering], 1985, №11, pp. 37–41. (in Russian)
- [4] Jel-Hatib Adna Ibragim. Ferrozonansnye processy v transformatorah naprzazhenija sistem elektrosnabzhenija i sposoby ih predotvrashhenija [Ferroresonance Processes in Voltage Transformers of Power Supply Systems and Ways to Prevent Them]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnikeskikh nauk [Theses of PhD in Engineering]. Donetsk. Pub. Donskoj politehnicheskij institute [Don Polytechnic Institute], 1992, 132 p. (in Russian)
- [5] Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pintal Ju.S. Tehnika vysokih naprzazhenij: Izoljacija i perenaprzazhenija v elektricheskikh sistemah [High Voltage Technology: Isolation and Overvoltage in Electrical Systems]. M. Pub. Elektroatomizdat [Electroatomizdat], 1986, 464 p. (in Russian)
- [6] Lihachev F.A. Zamykanija na zemlju v setjah s izolirovannoj nejtralju i s kompensaciej emkostnyh tokov [Ground Faults in Networks with Isolated Neutral and with Compensation of Capacitive Currents]. M. Pub. Energija [Energy], 1971, 152 p. (in Russian)
- [7] Gindullina F.A., Goldshtejn V.G., Duzolzon A.A., Halilov F.H. Perenaprzazhenija v seti 6-35 kV [Overvoltages in 6-35 kV Network]. M. Pub. Energoatomizdat [Electroatomizdat], 1989, 192 p. (in Russian)

- [8] Sirota I.M., Bogachenko A.E. Zashhita ot zamykanij na zemlju na storone generatornogo naprjazhenija blokov generator-transformator, ohvatyvajushhaja nejtral generator [Earth-Fault Protection on the Generator Voltage Side of Generator-Transformer Blocks Covering the Generator's Neutral]. Kiev. Pub. IED AN USSR [IED Academy of Sciences of the Ukrainian SSR], 1972, 21 p. (in Russian)
- [9] Sivokobylenko V.F., Lebedev V.K.. Perehodnye processy v sistemah jelektrosnabzhenija sobstvennyh nuzhd elektrostancij [Transient Processes in Power Supply Systems of Power Plants Own Needs]. Donetsk. Pub. ROA DonNTU [ROA DonNTU], 2002, 136 p. (in Russian)
- [10] Sirotinskij L.I. Tehnika vysokih naprjazhenij. Volnovye processy i vnutrennie perenaprjazhenija v jelektricheskikh sistemah [Technique of High Stresses. Wave Processes and Internal Overvoltages in Electrical Systems]. M. Pub. Gosenergoizdat [Gosenergoizdat], 1959. (in Russian)
- [11] Halilov F.H., Evdokunin G.A., Poljakov V.S. etc. Zashhita setej 6-35 kV ot perenaprjazhenij [Protection of 6-35 kV Overvoltage Networks]. Sankt-Peterburg. Pub. Energoatomizdat [Electroatomizdat], 2002. (in Russian)
- [12] Bazylev B.I., Brjancev A.M., Dolgoplov A.G. etc. Dugogashshie reaktory s avtomaticheskoy kompensaciej emkostnogo toka zamykanija na zemlju [Arc Suppression Reactors with Automatic Compensation of the Capacitive Earth Fault Current]. Sankt-Peterburg. Pub. PEIPK [PEIC], 1999. (in Russian)
- [13] Beljakov N.N. Issledovanie perenaprjazhenij pri dugovyh zamykanija na zemlju v setjah 6 i 10 kV s izolirovannoj nejtralju [Survey of Overvoltages with Arc Faults on Ground in 6 and 10 kV Networks with Isolated Neutral]. Elektrichestvo [Electricity], 1957, №5, pp. 31–36. (in Russian)
- [14] Sivokobylenko V.F., Dergil'ov M.P. Rezhimy raboty nejtrali raspredelitelnyh setej 6-10 kV [Operating Modes of Neutral Distribution Networks 6-10 kV]. Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. Serija: elektrotehnika i energetika [Collection of Scientific Works of DonSTU. Series: Electrical Engineering and Power Engineering], Issue 67. Donetsk. Pub. DonNTU [DonNTU], 2003, pp. 49–58. (in Russian)
- [15] Sivokobylenko V.F., Lebedev V.K., Mahinda Silva. Analiz processov dugovyh zamykanij na zemlju v setjah sobstvennyh nuzhd TES i AES [Analysis of the Processes of Arc Faults on the Ground in the Auxiliary Networks of TPPs and NPPs]. Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. Serija: Elektrotehnika i energetika [Collection of Scientific Works of DonSTU. Series: Electrical Engineering and Power Engineering], Issue 17. Doneck. Pub. DonGTU [DonNTU], 2000, pp. 129–133. (in Russian)
- [16] Dergilev M.P., Obabkov V.K. Nesnizhaemye kratnosti perenaprjazhenij v seti 6-35 kV s rezistivnym zazemleniem nejtrali [Non-Reducible Multiplicities of Overvoltages in the 6-35 kV Network with Resistive Neutral Grounding of the Neutral]. Nauka, tehnika, biznes v energetike [Science, Technology, Business in the Energy Sector], 2002, №5, pp. 10–14. (in Russian)
- [17] Kalantarov P.L., Cejtin L.A. Raschet induktivnostej [Calculation of Inductances]. Leningrad. Pub. Energoatomizdat [Electroatomizdat], 1986, 488 p. (in Russian)
- [18] Neklepaev B.N., Krjuchkov I.P. Jelektricheskaja chast jelektrostancij i podstancij: Spravochnye materialy dlja kursovogo i diplomnogo proektirovanija [Electric Part of Power Plants and Substations: Reference materials for course and diploma design]. M. Pub. Energoatomizdat [Electroatomizdat], 1989, 608 p. (in Russian)

Ferroerezonans Emergency in the 24 kV Generator Voltage Circuits of NPP Units

S.A. Baran^{*}, V.V. Nechitajlov^{}, V.V. Krasnokutskij^{***}**

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

^{} ORCID: 0000-0002-3232-4072*

WoS Researcher ID: I-7933-2018

e-mail: bastr@rambler.ru

*^{**} ORCID: 0000-0002-6795-2458*

WoS Researcher ID: J-3646-2018

e-mail: VITikafAE@mephi.ru

*^{***} ORCID: 0000-0002-4498-2996*

WoS Researcher ID: I-4045-2018

e-mail: leronil@mail.ru

Abstract – The paper analyzes the causes leading to false protection and shutdown of NPP units as well as damage to the measuring voltage transformers installed in the generator voltage network.

The reasons that lead to the appearance of ferroresonance phenomena in the network and the way to eliminate them are considered.

A number of emergency shutdowns of power units from the network by the action of earth fault protection are observed in the network of NPP generator voltage. According to the emergency situation investigations some of them turned out to be false. The cause of false accidents is often the appearance of ferroresonance phenomena in the network caused by load switching, short-time arcing and a number of other reasons.

When a ferroresonance occurs it is well known that in many cases it is possible to have high multiplicities of overvoltages, dangerous for voltage transformers and for interturn isolation of the generator.

This article analyzes the possibility of manifesting ferroresonance phenomena in the generator voltage network of NPP power units under various emergency conditions.

Keywords: ferroresonance, generator voltage, isolated neutral, voltage transformer, overvoltage.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 614.876:539.1.07

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАММА-СКАНИРУЮЩЕГО ДЕТЕКТОРА
С КОЛЛИМАТОРОМ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

© 2018 Агьекум Эфраим Бонах (Гана), Ю. Данейкин

Томский государственный университет, Томск, Томская обл., Россия

В настоящей работе описана разработанная модель радиационного состояния ядерной установки, излагается состав модели, рассмотрены проблемы формирования инженерно-радиационной модели ядерной установки на основе моделирования результатов радиационного контроля и расчетов гамма-излучения в зависимости от состава радионуклидов, активности источников излучения, а также их геометрических размеров и форм.

Методы расчета излучения, исходящего от загрязненных узлов элементов ядерной установки, требующих обслуживания или разборки, рассматривают их как источники фотонного излучения, обладающих определенными физическими характеристиками, такими как размеры и активность. Радиоактивные источники рассматриваются как изотропные излучатели. Геометрические размеры и форма таких источников могут быть очень разнообразными.

Исследуются существующие методы расчета дозовых полей, создаваемых радионуклидными источниками ионизирующего излучения различных геометрических форм.

Обсуждаемые методы основаны на аналогичных подходах и представляют собой математический расчет характеристики поля дозы в зависимости от формы источника, его активности и относительного пространственного расположения расчетной точки в поле и источнике. Поэтому были разработаны специальные методы расчета мощности дозы облучения от протяженных источников.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации, радионуклиды, канонические, моноэнергетические, затухание, детектор, фантом, цилиндр, дезактивация, радиоактивность, гамма.

Поступила в редакцию: 14.04.2018

1. INTRODUCTION

The era of atomic energy that began in the 1940s led to the creation of a large number of nuclear facilities, the operation of which has now been discontinued or involves the suspension of the operation of these facilities in the coming years.

Preparation for decommissioning of the atomic nuclear facility is a complex process involving several stages in which a local concept and decommissioning program is developed. A complete engineering and radiation review of the facility is conducted from operation, work is carried out to decontaminate and dismantle the equipment and structures of the facility, to handle radioactive waste, and so on.

One of the main tasks in decommissioning radiation-hazardous and complex facilities like atomic nuclear facility is to ensure the safety of personnel, the public and the environment.

The accumulated experience of designing and carrying out works on decommissioning of complex facilities (nuclear power plants, radiochemical plants, etc.), as well as mistakes made during the creation of decommissioning projects, led to the need to create tools that allow solving several tasks when developing a decommissioning project for nuclear facility, including reducing the time and cost of design, as well as exclude all kinds of collisions related to the mismatch of the real state of the facility with the project.

Such a tool should be the software and hardware system Digital Decommissioning, which includes various databases and models, an executive 3D model of the object combined with radiation characteristics, visualizing radiation fields and allowing to produce the necessary engineering, technological and radiation calculations in the development of the decommissioning project and the adoption of relevant design and technological solutions. Methods for calculating radiation emanating from contaminated assemblies of the nuclear facility elements requiring maintenance or disassembly are considered as radionuclide sources of photon radiation having certain physical characteristics, such as dimensions and activity. Sources based on radionuclides are isotropic radiators. The geometric dimensions and shape of such sources can be very diverse in form and size.

All sources can be divided into point and extended: linear, area and volumetric. In most cases, when calculating radiation, one has to deal with extended sources. The concept of an extended source covers all sources whose dimensions cannot be neglected in calculations. In contrast to point sources, the radiation field of extended sources depends on their shape and size, and in the case of bulk sources and on absorption processes (self-absorption) and scattering of radiation in the source material itself. Calculations from extended sources prove to be more complex and time-consuming than from point sources.

2. METHODOLOGY

The construction of the radiation model of the object is based on mathematical modeling of the radiation transport in the air and the substance from the elementary unit of technological objects that may have a complex geometric shape. In this case, inverse modeling is possible, when the activity of the source (object) is calculated on the basis of the measured field characteristics and the known ratio of radionuclide activity.

Application of Monte Carlo method to construct radiation fields in the hardware software digital decommissioning requires more hardware and time resources. Therefore, in order to calculate the density of gamma radiation, fluxes and the equivalent dose rate created by a complex extended source (technological object), it is possible to use simpler and sufficiently accurate methods for calculating a volumetric or extended source.

In the first stage, processing facilities should be provided in the form of simplified phantom objects such as sphere, cylinder, cube and cuboid. The most complex configuration of the radiation source is in the form of a set of individual arbitrarily defined bodies. Some objects, such as bundles of thin tubes, can be one object, tube surface area is equal to the total surface area of all the tubes and the wall thickness corresponds to the thickness of the tube walls.

Phantom object must correspond to the real technological object of the total surface area and wall thickness, since main circulation pump, MCP reactor may be presented in the radiation pattern in the form of three cylindrical objects according to Figure 1.

3. RADIATION MODEL OF THE PROCESS PIPE

Gamma quanta generated in a point source and moving in the direction of the detector move along a rectilinear trajectory connecting points s and D . Generally, gamma quanta are

partially absorbed from the beginning in the air in the cavity of the tube, then in the material of the pipe wall and air outside the pipe. Accordingly, in order to account for the absorption of gamma quanta in different media, it is necessary to determine the lengths of sp_1 , p_1p_2 and p_2D segments in accordance with Fig. 2. Consider the projection of the geometry of the problem onto the xOy .

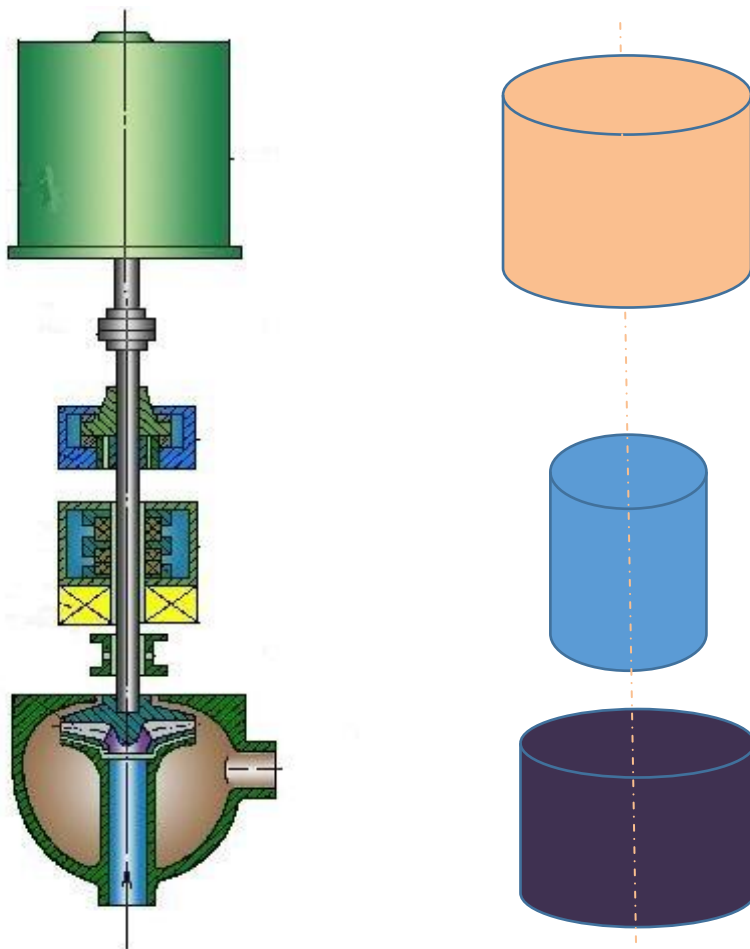


Fig.1. Presentation of MCP in phantom form

The outer and inner cylindrical surfaces of the tube in the projection will have the form of circles with centers lying at the origin. In rectangular Cartesian coordinates, the equations of these circles have the form:

$$x^2 + y^2 - r_{out.}^2 = 0, \quad (1)$$

$$x^2 + y^2 - r_{in.}^2 = 0. \quad (2)$$

Consider the outer circumference in order to determine the coordinates of intersection points with the segment of the circle sD i.e. the coordinates of p_2 . Substitute coordinates of $s(x_s, y_s)$ in the equation of the circle:

$$x_s^2 + y_s^2 - r_{out.}^2 = \text{CT } S. \quad (3)$$

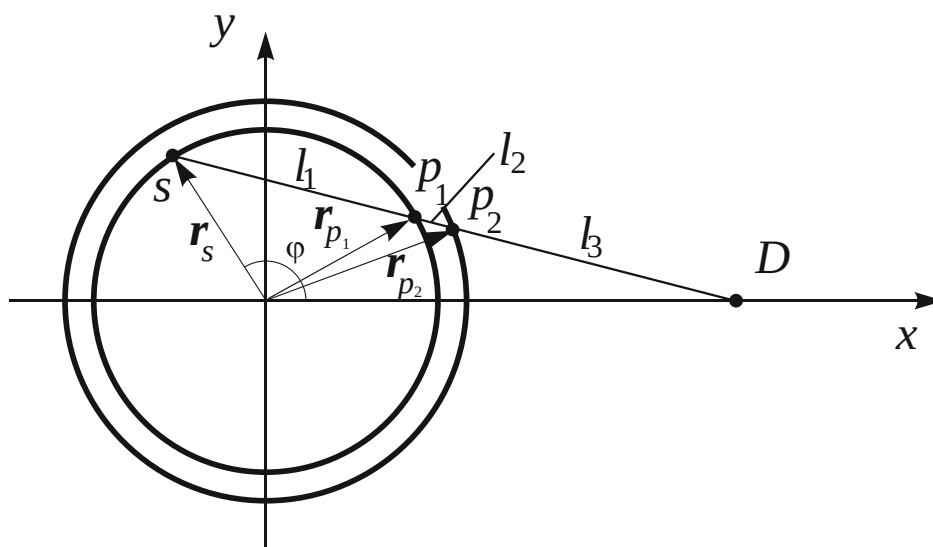


Fig. 2. Projection of a pipe on a plane

Since the point $s(x_s, y_s)$ does not lie on a circle, the number of item πS is nonzero. Number item πS is a power point s with respect to a given circumference. The degree of a point is negative if the point lies inside the circle and positive, if outside. It is obvious that for an inner circle πS is equal to zero, since the point s belongs to the circle.

In vector form, the equation of a straight line passing through a point (in our case through the point s) has the form:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_s + t\mathbf{a} \quad (4)$$

where $\mathbf{a}(l, m)$ is the directing vector of this line, l and m are the projections of the directing vector. If the vector $\mathbf{a}$ is an orthom, then $l^2 + m^2 = 1$. The vector equation in coordinates will have the form:

$$x = x_s + tl, y = y_s + tm. \quad (5)$$

Eliminating the parameter, t we obtain the equation of the line in the canonical form:

$$\frac{x - x_s}{l} = \frac{y - y_s}{m}, \quad (6)$$

from which we obtain the general equation of a straight line in the Cartesian coordinate system:

$$m(x - x_s) = l(y - y_s) \Leftrightarrow Ax + By = D, \quad (7)$$

where $A = m, B = -l, D = mx_s - ly_s$.

For a line passing through two points s and D , the vector parametric equation will have the form:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_s + t(\mathbf{r}_D - \mathbf{r}_s), \quad (8)$$

or in the canonical form

$$\frac{x - x_s}{x_D - x_s} = \frac{y - y_s}{y_D - y_s}. \quad (9)$$

The differences in the denominators of the canonical equation and $(x_D - x_s)$ and $(y_D - y_s)$ are the projections of the segment sD onto the corresponding axis. If we divide each projection by the length of the segment sD , then we obtain the projections of the vector of the directing vector of a straight line passing through two points:

$$l = \frac{x_D - x_s}{\sqrt{(x_D - x_s)^2 + (y_D - y_s)^2}}, m = \frac{y_D - y_s}{\sqrt{(x_D - x_s)^2 + (y_D - y_s)^2}} \quad (10)$$

$$(x_s + lt)^2 + (y_s + mt)^2 - r_{out.}^2 = 0. \quad (11)$$

After the expansion of the squares of the sums and the grouping of such terms, we obtain

$$(l^2 + m^2)t^2 + 2(x_sl + y_sm)t + x_s^2 + y_s^2 - r_{out.}^2 = 0. \quad (12)$$

The expression in parentheses in the first term is 1, since l and m are the projections of the vector of the directing vector. The sum of the last three terms is equal to the degree of the point s relative to the outer circle. Correspondingly, we obtain the quadratic equation

$$t^2 + 2(x_sl + y_sm)t + \sigma S = 0, \quad (13)$$

whose roots t_1 and t_2 define two points of intersection of a straight line passing through points s and D , with an outer circle

$$x_1 = x_s + lt_1, y_1 = y_s + mt_1, \quad (14)$$

$$x_2 = x_s + lt_2, y_2 = y_s + mt_2 \quad (15)$$

For our problem from two points of intersection, we need to take the nearest point to the point D as the desired point p_2 .

The search for points of intersection of a straight line passing through points s and D , with an inner circle is similar. Although it can be taken into account that the point s lies on the inner circle, respectively, the degree of the point s relative to the inner circle will be zero. Consequently, equation (13) takes the form:

$$t^2 + 2(x_sl + y_sm)t = t[t + 2(x_sl + y_sm)] = 0 \quad (16)$$

And one of the roots will always be zero, and the point s will be one of the intersection points. In a number of cases, when a point source is located on the tube wall near the detector, the points s and p_1 will coincide, respectively, the gamma rays emitted toward the detector will not be absorbed in the air filling the cavity of the tube.

To determine the coordinates z of the points of intersection of the straight line passing through the points s and D with the cylindrical surfaces forming the pipe, we consider the projection of the geometry of the problem onto the xOz plane in accordance with Fig. 3. Since the coordinates x_{p_1} and x_{p_2} are known, for the definitions of z_{p_1} and z_{p_2} must be substituted in the projection equation for the straight line passing through the points s and D .

$$z = z_s + \frac{x_D - x_s}{x_D - x_s} (x - x_s). \quad (17)$$

The total length of the gamma-ray trajectory will be

$$l = l_1 + l_2 + l_3 = \sqrt{(x_D - x_s)^2 + (y_D - y_s)^2 + (z_D - z_s)^2}. \quad (18)$$

The flow of monoenergetic gamma quanta, passing through a layer of matter of linear dimension, l loses part of the gamma quanta due to absorption in the direction of flow. The change in the flux density is determined by the thickness of the layer and by the absorbing properties of the medium

$$q(l) = q_0 \exp(-\mu l), \quad (19)$$

Where q_0 is the initial flux density, μ is the linear coefficient of attenuation of gamma quanta with energy E .

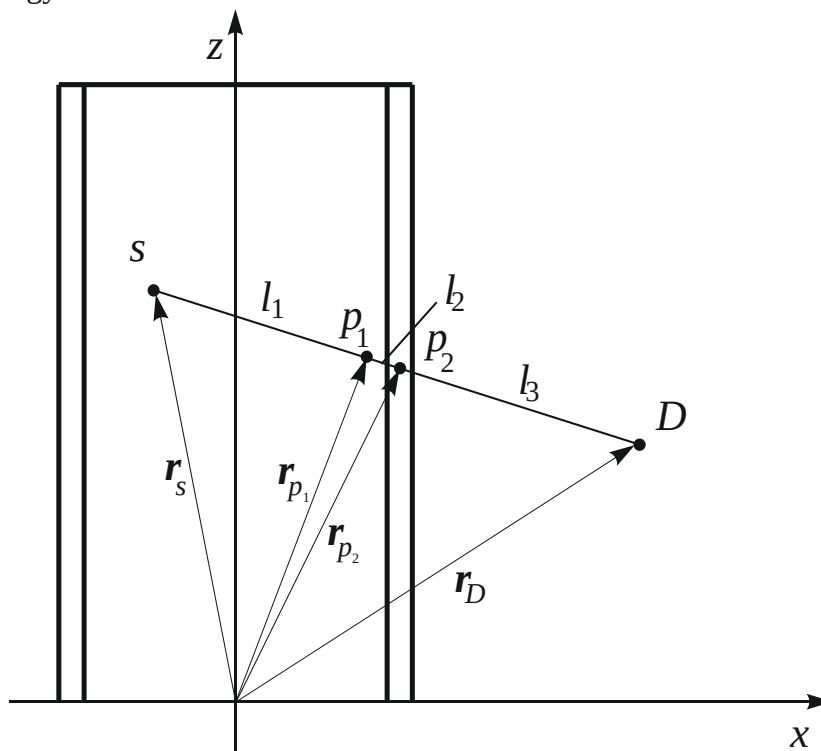


Fig. 3. Projection of a pipe on a plane xOz

On the entire trajectory of the motion, the flux of gamma quanta will change in accordance with Eq.

$$q(l) = q_0 \exp\left(-\sum_{k=1}^3 \mu_k l_k\right), \quad (20)$$

where k – the index of the absorbing medium, which also corresponds to the linear length of the trajectory of the gamma-quantum within the given material.

In the general flow, the number of gamma quanta of each energy can be determined by the partial coefficient δ . If in a sequential list of gamma-quanta energies included in the total flow, each energy value is numbered by the index n ($n = 1, 2 \dots N_m$), then the gamma-quantum energies will be denoted as E_n , the partial fractions of gamma quanta with energy E_n will be have the designation δ_n , linear attenuation coefficients μ_{nk} (n – is the energy index, and k – is the index of the medium). Then the law of weakening the flux of gamma quanta with energy E_n in a multilayer medium will have the form.

$$q(E_n, l) = q_0 \delta_n \exp \left(- \sum_{k=1}^3 \mu_{nk} l_k \right). \quad (21)$$

In the general flow, when interacting with the medium, gamma quanta of different energies do not influence each other, respectively, the partial flux densities of monoenergetic gamma quanta can be added to the total flux density

$$q(l) = q_0 \sum_{n=1}^{N_m} \delta_n \exp \left(- \sum_{k=1}^3 \mu_{nk} l_k \right). \quad (22)$$

Taking into account the spherical geometry of the point source (see relation (38))

$$q(l) = \frac{Q}{4\pi l^2} \sum_{n=1}^{N_m} \delta_n \exp \left(- \sum_{k=1}^3 \mu_{nk} l_k \right). \quad (23)$$

To determine the gamma-ray flux density at point D , it is necessary to sum the gamma-ray flux densities of all energies entering the detector from each point source describing the radioactive contamination.

Knowing the flux density of gamma quanta of all energies at a given point D , one can obtain the absorbed dose rate in the detector and calculate the equivalent dose rate at point D .

CONCLUSION

Within the framework of this paper, the application of the nuclear radiation model to the construction of a spatially distributed radiation source for an object using atomic energy stopped for decommissioning work is considered. The structures of the created databases, their content and interrelations are described.

Proposed with mathematical calculations characteristics of ionizing radiation fields generated by the objects of complex geometry, to carry out substitution of the real objects in the engineering model, nuclear facilities phantom objects simple geometric shape with the surface area of the real object and its mass.

It is recommended for use are simpler and faster than the Monte Carlo method, and at the same time, accurate methods for calculating the density of gamma radiation fluxes and the equivalent dose rate from the model of a spatially distributed source of ionizing radiation, which is a set of graphic equivalents with a given for each of them activity (the so-called "phantom model"), as well as methods for solving the "inverse problem", i.e. calculation of the activity of the elements of the phantom model from the measurement of the dose rate of gamma radiation at points located in the space of the room.

REFERENCES

- [1] Agostinelli S. etc. GEANT4—a simulation toolkit. Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, Vol. 506, №3, pp. 250–303. (in English)
- [2] Briesmeister J.F. LA-7396-M. A General Monte Carlo N-Particle transport code, Version C., 1997, Vol. 4. (in English)
- [3] Attix F.H., Tochilin E. (ed.). Sources, Fields, Measurements, and Applications: Radiation Dosimetry. Academic Press, 2016, Vol. 3. (in English)
- [4] Koch H.W., Motz J.W. Bremsstrahlung cross-section formulas and related data. Reviews of modern physics, 1959, Vol. 31, №4, p. 920. (in English)

- [5] Dillman L.T. Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation. *Journal of Nuclear Medicine*, 1969, Vol. 10. (in English)
- [6] Storm L., Israel H.I. Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1970, Vol. 7, №6, pp. 565–681. (in English)
- [7] Ambient Dose Equivalent. 2017. Available at: www.euronuclear.org/info/encyclopedia/ambientdose (in English)
- [8] ICRP. Conversion Coefficients for use in radiological protection against external radiation, 1996. (in English)
- [9] Corvan D.J., Sarri G. and Zepf. M., Design of a compact spectrometer for high-flux MeV gamma-ray beam. *Review of scientific instruments*, 2014. (in English)
- [10] Radiation Dosage. 2017. Available at: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1d_N0as77OmI0jw7-W-AMx74TWtoM3nh7bAMOkI8OJP8/edit?authkey=CKTU3OwP&hl=en_GB&hl=en_GB&authkey=CKTU3OwP#gid=0 (in English)

Modelling of Gamma-Scan Detector with Collimator for Investigating Differential Radioactive Contamination

Agyekum Ephraim Bonah (Ghana)*, Yu. Daneykin**

*National Research Tomsk Polytechnic University, Institute of Physics
Lenin St., 2, Tomsk region, Russia 634050*

**e-mail: agyekumephraim@yahoo.com ; **e-mail: daneykin@tpu.ru*

Abstract – In this paper, a description of the model of the radiation state of a nuclear facility is developed, the composition of the model is outlined, the problems of the formation of the engineering-radiation model of the nuclear facility are considered on the basis of the engineering model of radiation inspection and gamma radiation calculations depending on the radionuclide composition, the activity of radiation sources, and also their geometric sizes and shapes.

Methods for calculating radiation emanating from contaminated assemblies of the nuclear facility elements requiring maintenance or disassembly are considered as radionuclide sources of photon radiation having certain physical characteristics, such as dimensions and activity. Sources based on radionuclides are isotropic radiators. The geometric dimensions and shape of such sources can be very diverse in form and size.

The existing methods for calculating the dose fields created by radionuclide sources of ionizing radiation of various geometric shapes are investigated.

The methods considered are based on similar approaches and represent a mathematical calculation of the characteristics of the dose field depending on the shape of the source, its activity and the relative spatial location of the calculated point in the field and the source. Therefore, special methods for calculating exposure dose rate from extended sources have been developed.

Keywords: Decommissioning, radionuclide, canonical, monoenergetic, attenuation, detector, phantom, cylinder, decontaminate, radioactivity, gamma.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.384.039

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЧАСТОТЫ АСВ
В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ АЭС С ВВЭР**

© 2018 К.Н. Проскуряков, А.В. Аникеев, К.И. Беляев, Д.А. Писарева

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Проведено сопоставление результатов расчета частот акустических стоячих волн с автоспектральными плотностями мощности сигналов датчиков пульсаций давления для сложных комбинаций акустических элементов 1-го контура АЭС с ВВЭР-440. Получено удовлетворительное соответствие результатов расчета частот акустических стоячих волн с данными измерений. Приведен новый подход к формированию комбинационных акустических контуров в системе теплоносителя в ВВЭР-440. Впервые исследован колебательный контур теплоносителя, включающий соединенные трубопроводами реактор и компенсатор давления. Установлено, что в исследованных режимах частота акустических стоячих волн в этом контуре близка к 2 Гц. Показана возможность смещения этой частоты в области резонансного взаимодействия с ТВС при изменении компоновки этой системы.

Ключевые слова: стоячие волны, вибрации, виброакустический резонанс, акустически-стоячие волны, АСВ, АСПМ, акустический резонанс.

Поступила в редакцию: 29.05.2018

Практика эксплуатации АЭС показывает, что потоки рабочей среды вызывают механические колебания и вибрации оборудования и его элементов. Эти процессы относятся к числу основных факторов, определяющих динамические нагрузки на оборудование, его срок службы и надежность. Наиболее опасно взаимодействие оборудования с потоком текучей среды в резонансной области колебаний механических элементов и потока [1]. В первом контуре АЭС с ВВЭР основными источниками возбуждения колебаний являются нестационарные гидродинамические процессы в теплоносителе (акустические волны, турбулентность, вихреобразование, кавитация и др.) и главные циркуляционные насосы (ГЦН). В настоящее время актуальной задачей атомной энергетики является обоснование возможности продления проектного срока эксплуатации энергоблоков АЭС. Для выполнения этой задачи необходимо знать остаточный ресурс конструкционных материалов оборудования ответственного за безопасность эксплуатации. При этом, необходимо учитывать потерю несущей способности конструкционных материалов при воздействии циклических нагрузок [2,3,4], возрастающих в условиях виброакустических резонансов (ВАР). Необходимо отметить, что регламентом пусконаладочных работ не предусмотрено определение ВАР в режимах пуска и останова энергоблоков, их продолжительность не фиксируется и, следовательно, не учитывается в оценках остаточного ресурса.

Для обоснования возможности продления сроков эксплуатации необходимо выявить условия, при которых уровень вибраций превышает допустимые значения, провести идентификацию причин превышения проектного уровня вибраций и по возможности предотвратить или ограничить их воздействие на оборудование. Для

решения этих задач используют данные систем технической диагностики, состоящих из разнообразных измерительных каналов [5,6].

На энергоблоке № 3 Нововоронежской АЭС в 2015 году впервые проведены детальные измерения пульсаций теплоносителя и вибраций оборудования для 17 этапов пуска энергоблока и для номинального режима работы [7], что существенно больше числа этапов, предусмотренного регламентом. Для каждого этапа проведена обработка сигналов от датчиков пульсаций давления (ДПД) и идентификация источников возникновения акустических стоячих волн (АСВ) в первом контуре АЭС с ВВЭР-440.

В таблице 1 приведены данные расчета, по методикам [1], частот АСВ в участках акустической схемы для 2 этапов пуска (режим 1 и режим 2) и номинального режима (режим 3) работы энергоблока. В графе таблицы 1 "параметры режима" приведены теплофизические параметры теплоносителя (температура T и давление P) на выходе из активной зоны реактора и значение уровня в компенсаторе давления H , при котором были рассчитаны частоты АСВ на участках 7 и 8. Разработанная акустическая схема первого контура, состоит из 16 участков, показанных на Рис.1. Она включает в себя основные элементы 1-го контура АЭС с ВВЭР-440. На Рис.2 показан впервые исследованный акустический контур, образованный реактором, компенсатором давления, дыхательным трубопроводом и участками 1-го контура от главной запорной задвижки (ГЗЗ) до реактора.

Таблица 1. – Результаты расчета частот АСВ в участках акустической схемы первого контура [The results of calculating the frequencies of the acoustic standing waves in the sections of the acoustic circuit of the primary circuit]

Параметры режима 1	$T = 256^{\circ}\text{C}, P = 127 \text{ кг/см}^2, H = 4.34 \text{ м}$							
№ участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц	18.3	44.1	71.7	28.6	20.4	7.1	23.7	11.5
№ участка	9	10	11	12	13	14	15	16
Частота, Гц	6.7	43.6	42.5	19.3	42.6	20.7	56.9	36.3
Параметры режима 2	$T = 268^{\circ}\text{C}, P = 125 \text{ кг/см}^2, H = 3.37 \text{ м}$							
№ участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц	17.7	43.1	69.2	27.6	19.5	6.8	29.5	9.9
№ участка	9	10	11	12	13	14	15	16
Частота, Гц	6.4	41.8	40.6	18.5	41.3	20.1	55.3	35.3
Параметры режима 3	$T = 296^{\circ}\text{C}, P = 124 \text{ кг/см}^2, H = 4.04 \text{ м}$							
№ участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, Гц	17.5	42.8	64.9	24.5	17.3	6.3	25.2	10.9
№ участка	9	10	11	12	13	14	15	16
Частота, Гц	5.9	37.0	35.7	17.5	40.9	20.0	54.8	35.0

В настоящее время на Нововоронежской АЭС успешно используется система контроля вибрации основного оборудования SUS, внедрены и используются в виде программных пакетов: программа для автоматической отбраковки спектров; программа для автоматического выделения пиков в вибрационных спектрах [8]. Автоспектральная плотность мощности (АСПМ) сигналов от ДПД для трех режимов представлена на рисунке 3,4,5. На рисунках также показаны рассчитанные значения частот АСВ из таблицы 2.

В таблице 2, колебательный контур, образованный реактором, КД и соединительными трубопроводами обозначен 16+1+2+3+4+5, показан на рисунке 2. На

рис. 3, рис. 4, рис. 5 приведены АСПМ сигналов ДПД для трех режимов. На рисунке 5 виден доминирующий пик с частотой 2,04 Гц, который, как это следует из таблицы 2, соответствует расчетной оценке для сложного контура, образованного участками 16+1+2+3+4+5 в номинальном режиме.

В пусковых режимах 1, 2 получены частоты АСВ 2,41 и 2,31 соответственно, показанные на рис. 3, рис. 4. Так же следует отметить, что исключение элемента 16 из контура образует новый колебательный контур, в котором частота АСВ равна 2,49 Гц, этот пик выражен слабее, но его так же можно обнаружить на рисунке 5.

Следует отметить, что изменение геометрических параметров колебательного контура влечет за собой изменение величины резонансной частоты. Изменение компоновки оборудования, представленного на рисунке 2, может привести, как к увеличению частоты АСВ, так и к ее уменьшению. В случае увеличения частоты АСВ она может попасть в диапазон частот вибраций ТВС с двумя закрепленными концами, а в случае уменьшения может сместиться в диапазон частот ВАР с частотами вибраций ТВС с одним закрепленным концом.

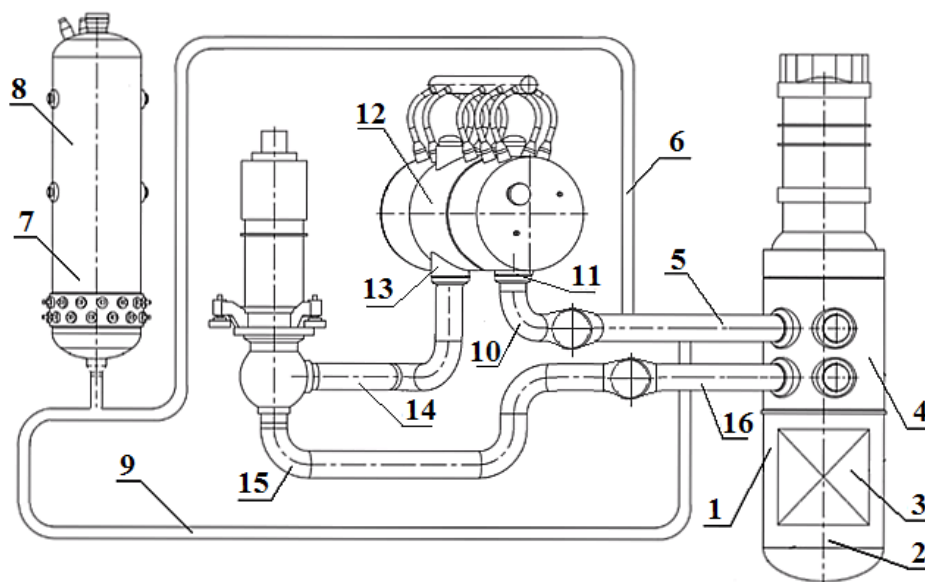


Рис. 1. – Акустическая схема АЭС с ВВЭР – 440:

1 – опускающий участок реактора; 2 – пространство под активной зоной;
3 – активная зона; 4 – пространство над активной зоной; 5 – участок главного циркуляционного контура (ГЦК) от реактора до главной запорной задвижки (ГЗЗ); 6 – дыхательный трубопровод от горячей нитки до компенсатора давления (КД); 7 – КД (вода); 8 – КД (пар); 9 – дыхательный трубопровод от КД до горячей нитки; 10 – участок горячей нитки ГЦК от ГЗЗ до горячего коллектора; 11 – горячий коллектор ПГ; 12 – теплообменная поверхность парогенератора (ПГ); 13 – холодный коллектор ПГ; 14 – участок от холодного коллектора ПГ до ГЦН; 15 – участок холодной нитки ГЦК от ГЦН до ГЗЗ; 16 – участок холодной нитки ГЦК от ГЗЗ до входа в опускающий участок реактора

[The acoustic scheme of the NPP with WWER - 440:

1 – reactor descending section ; 2 – space under the active zone;
3 – active zone; 4 – the space above the active zone; 5 – section of the main circulation circuit (MCC) from the reactor to the main gate valve (MGV); 6 – the breathing pipe from the hot thread to the pressure compensator (PC); 7 – PC (water); 8 – PC (steam); 9 – breathing duct from PC to hot thread; 10 – hot line section of MCC from MGV to hot collector; 11 – hot collector of SG; 12 – heat exchange surface of the steam generator (SG); 13 – cold collector of SG; 14 – a section from the cold collector SG to MCP; 15 – cold thread section of MCC from MCP to MGV; 16 – section of the cold line of the MCC from the MGV to the inlet to the descending section of the reactor]

Например, сместить колебания в область более высоких частот можно уменьшив длину дыхательного трубопровода. При длине дыхательного трубопровода 3 м, пик на

частоте 2,04 Гц сместится, и будет соответствовать частоте 2,29 Гц.

Таким образом, одним из эффективных способов продления срока службы АЭС является оптимизация компоновки оборудования, обеспечивающая предотвращение ВАР в оборудовании и внутрикорпусных устройствах.

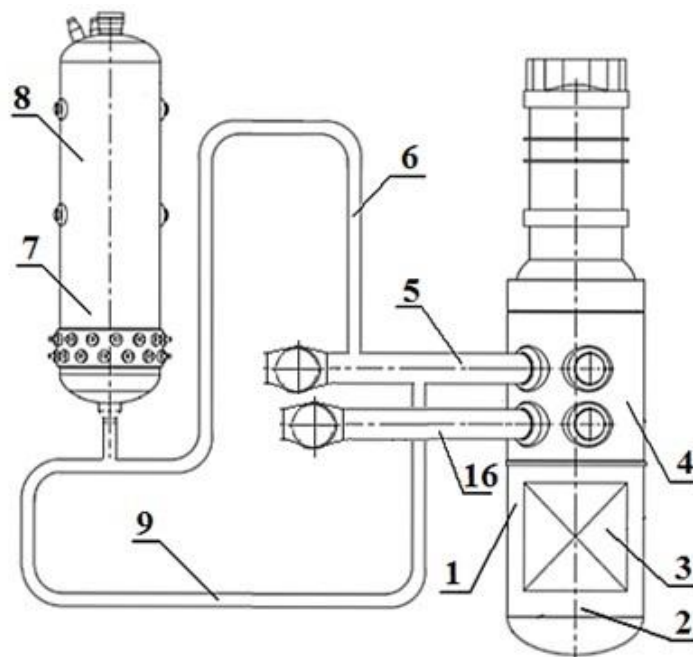


Рис. 2. – Акустический контур, образованный, КД и соединительными трубопроводами [Acoustic circuit, formed by PC and connecting pipelines]

Разработанная методика является универсальной, и применима для предотвращения ВАР в любых модификациях ВВЭР.

Значения геометрических характеристик участков акустической модели приняты в соответствии с проектом первого контура 3 блока НВАЭС. Скорость распространения акустических колебаний определялась в соответствии с [9].

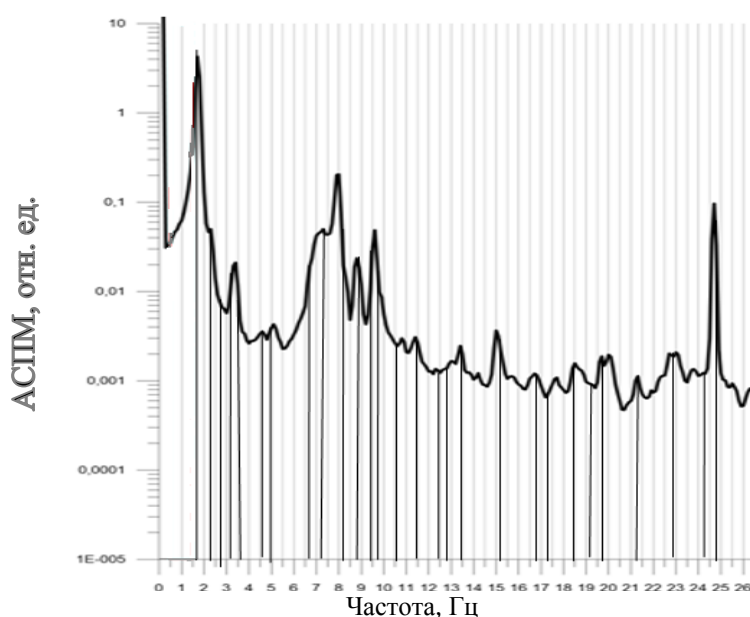


Рис. 3. – АСПМ ВВЭР-440 режим 1 [Autospectral power density of WWER-440 mode 1]

Таблица 2. – Результаты расчета частот АСВ в комбинационных контурах акустической схемы ВВЭР-440 [The calculation results of the acoustic standing waves frequencies in the combinational circuits of the WWER-440 acoustic circuit]

Номера участков в составе комбинационных контуров	Частота АСВ, Гц		
	Режим 1	Режим 2	Режим 3
1	17,5	17,5	17,5
1+2	11,3	11,0	10,9
1+2+3	9,7	9,5	9,3
1+2+3+4	6,8	6,6	6,1
1+2+3+4+5	2,93	2,81	2,49
1+2+3+4+5+6+7	2,1	2,2	2,0
1+2+3+4+5+6+7+8	0,5	0,5	0,5
1+2+3+4+5+10+11	2,1	2,1	1,8
1+3+4+5	3,2	3,3	2,8
4+5+10+11	2,7	2,8	2,3
16+1	7,2	6,9	6,9
16+1+2	4,7	4,6	4,5
16+1+2+3	4,3	4,2	4,1
16+1+2+3+4	3,73	3,58	3,14
16+1+2+3+4+5	2,41	2,31	2,04
16+1+2+3+4+5+ 10+11	1,8	1,9	1,6
2+3	22,9	22,9	22,9
10+11	19,5	19,6	19,4
11+12	11,9	11,8	11,6
13+14	16,8	16,9	16,9
6+7	0,8	0,8	0,8
8	11,5	11,5	11,5
7+8	3,8	3,8	3,8
9+7	0,8	0,8	0,8
6+7+8	0,1	0,1	0,1
9+7+8	0,1	0,1	0,1
10+11	19,4	18,5	16,3
11+12+13	9,9	9,5	8,9
10+11+12+13+14	5,0	4,8	4,5
13+14	12,7	12,3	12,2
14	19,9	19,9	19,9
4+5	8,1	8,4	7,3
5+7+8+9	2,3	2,4	2
4+5+7+8+9	2,7	2,8	2,6
7+9+10+11	3,1	3,1	3,2
7+8+9+10+11	0,6	0,6	0,6
7+8+9+10+11+12+13	0,5	0,5	0,5
ГЦН	24,9	24,9	24,9

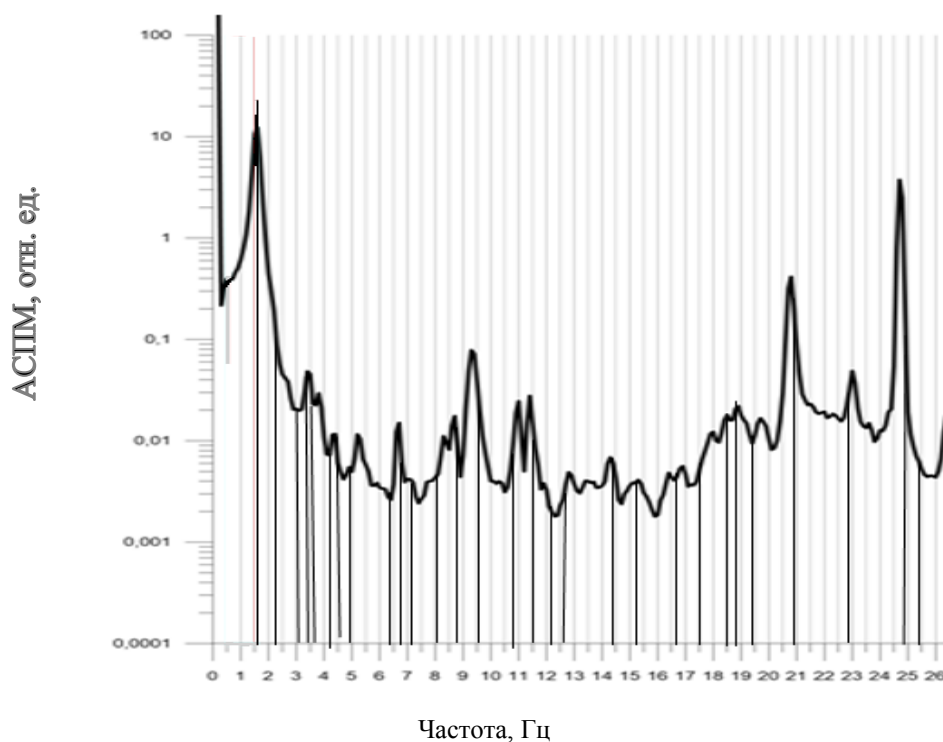


Рис. 4.– АСПМ ВВЭР-440 режим 2 [Autospectral power density of WWER-440 mode 2]

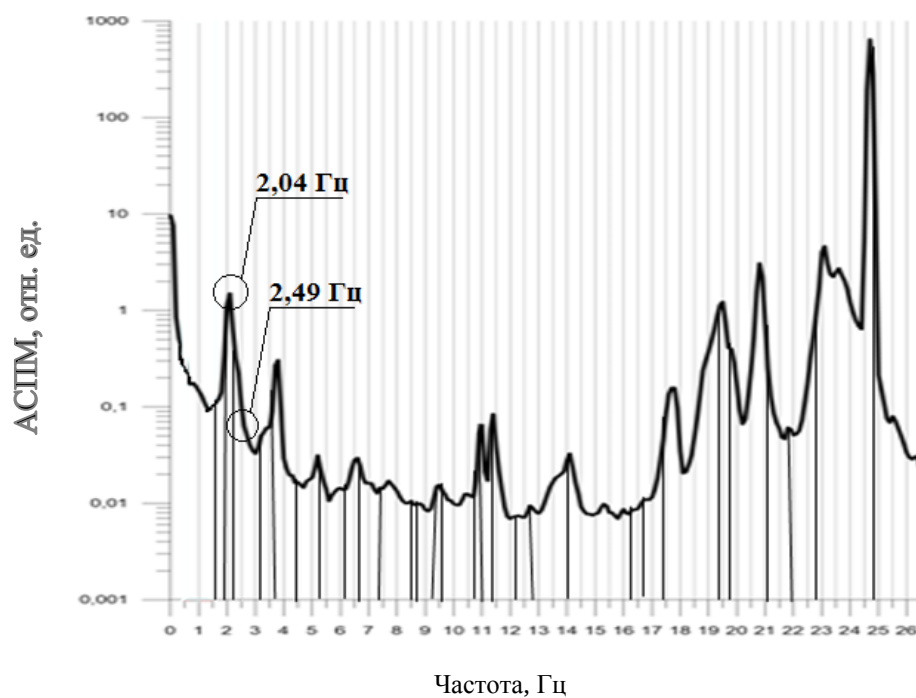


Рис. 5. – АСПМ ВВЭР-440 режим 3 [Autospectral power density of WWER-440 mode 3]

Из рисунков видно, что АСПМ имеет пилообразный характер, причем большинство из доминирующих пиков в публикациях, посвященных идентификации источников возбуждения АСВ, до настоящего времени не были интерпретированы [7,10]. Результаты расчета частоты АСВ для всех этапов сопоставлены с данными

измерений вибраций основного оборудования первого контура приведенными в [10]. Результаты сопоставления указывают на то, что в элементах оборудования АЭС в исследованных этапах пусковых режимов могут возникать ВАР.

Практически все заметные пики обусловлены колебательными процессами, например, $1+2$, $1+2+3$, $1+2+3+4$, а так же $2+4$, $1+4$ и т.д.

ВЫВОДЫ

— Достоверность результатов расчета частот акустических стоячих волн, возникающих в отдельных элементах и в комбинациях акустических элементов 1-го контура блока №3 НВАЭС в пусковых и номинальном режимах, подтверждена данными измерений пульсаций давления.

— Идентифицированные доминантные пики в АСПМ соответствуют частотам акустических стоячих волн возникающих в отдельных акустических элементах или в акустических контурах, образованных несколькими последовательно соединенными элементами.

— В исследованных этапах пусковых режимов наблюдаются резонансные взаимодействия акустических стоячих волн с вибрациями оборудования 1-го контура.

— При оценке остаточного ресурса оборудования необходимо учитывать длительность резонансных взаимодействий конструкций и теплоносителя при выводе реактора на номинальный уровень мощности и количество пусков (остановов) за весь период эксплуатации энергоблока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проскуряков, К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Текст] / К.Н. Проскуряков. - М.: МЭИ, 1984. - 67 с.
2. Капустин, С.А. и др. Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ [Текст] / С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов, В.А. Горохов: монография. - Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2015. - 347 с.
3. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A. Models and prediction algorithms of fracture of structural elements for low- and high-cycle loading based on FEM. *Materials Physics and Mechanics*, 2015, Vol. 23, pp. 79–82.
4. Антипов, А.А. и др. Экспериментально-теоретическое исследование усталости материалов и конструкций в условиях высокотемпературных многоцикловых нагружений [Текст] / А.А. Антипов, А.Н. Горохов, В.А. Горохов, Д.А. Казаков, С.А. Капустин // Проблемы прочности и пластичности. - 2014. - Вып. 76(1). - С. 26–38.
5. Пархоменко, П.П. и др. Основы технической диагностики [Текст] / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян. - М.: Энергоиздат, 1981. - 460 с.
6. ГОСТ 2091189. Техническая диагностика. Термины и определения [Текст]. - М.: Издательство стандартов, 1990. - 13 с.
7. Proskuriakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V. and Volkov G.Y. Identification of standing pressure waves sources in primary loops of NPP with WWER and PWR. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*. Vol. 4, 2016, ISSN 2412-5954, e-ISSN 2414-6935
8. Слепов, М.Т. Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС [Текст] / М.Т. Слепов. Авторефер. дисс. канд. техн. наук, Обнинск –1999.
9. Жуковский, Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах [Текст] / Н.Е. Жуковский. - М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. -108 с.
10. Аркадов, Г.В. и др. Виброшумовая диагностика ВВЭР [Текст] / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, А.И. Усанов. - М.: Энергоатомиздат, 2004. - 344 с.

REFERENCES

- [1] Proskurjakov K.N. Teplogidravlichesкое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах JaEU [Thermohydraulic Excitation of Coolant Fluctuations in In-House Devices of Nuclear Power Plants]. M. Pub. MEI [MEI], 1984, 67 p. (in Russian)
- [2] Kapustin S.A., Churilov Ju.A., Gorohov V.A. Modelirovanie nelinejnogo deformirovanija i razrushenija konstrukcij v uslovijah mnogofaktornyh vozdeystvij na osnove MKE [Modeling of Nonlinear Deformation and Destruction of Structures under Conditions of Multifactor Effects on the Basis of FEM]. Nizhnij Novgorod. Pub. Nizhegorodskij gosudarstvennyj niversitet im. N.I. Lobachevskogo [Nizhny Novgorod Lobachevsky State University], 2015, 347 p. (in Russian)
- [3] Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A. Models and prediction algorithms of fracture of structural elements for low- and high-cycle loading based on FEM. Materials Physics and Mechanics, 2015, Vol. 23, pp. 79–82. (in English)
- [4] Antipov A.A., Gorohov A.N., Gorohov V.A., Kazakov D.A., Kapustin S.A. Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie ustalosti materialov i konstrukcij v uslovijah vysokotemperaturnyh mnogociklovyh nagruzhenij [Experimental and Theoretical Study of Fatigue of Materials and Structures under Conditions of High-Temperature Multi-Cycle Loading]. Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity], 2014, Issue 76(1), pp. 26–38. (in Russian)
- [5] Parhomenko P.P., Sogomonjan E.S. Osnovy tehnicheckoj diagnostiki [Basics of Technical Diagnostics]. M. Pub. Energoizdat [Energoizdat], 1981, 460 p. (in Russian)
- [6] GOST 2091189. Tehniceskaja diagnostika. Terminy i opredelenija [Technical Diagnostics. Terms and Definitions]. M. Pub. Standartov [Publishing house of standards], 1990, 13 p. (in Russian)
- [7] Proskuriakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V. and Volkov G.Y. Identification of standing pressure waves sources in primary loops of NPP with WWER and PWR. Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Vol. 4, 2016, ISSN 2412-5954, e-ISSN 2414-6935 (in English)
- [8] Slepov M.T. Razrabotka metodov i interpretacija dannyh primenitelno k sistemam shumovoj diagnostiki reaktornyh ustanovok Novovoronezhskoj AES [Development of Methods and Interpretation of Data Applied to Noise Diagnostics Systems of Reactor Installations at Novovoronezh NPP]. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheckih nauk [PhD Thesis in Engineering]. Obninsk, 1999. (in Russian)
- [9] Zhukovskij N.E. O gidravlicheskom udare v vodoprovodnyh trubah [About Hydraulic Hit in Water Pipes]. M. Leningrad. Gosudarstvennoe izdatelstvo tehniko-teoreticheskoy literatury [State Publishing House of Technical and Theoretical Literature], 1949, 108 p. (in Russian)
- [10] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibroshumovaja diagnostika VVER [WWER Vibration Diagnosis]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoizdat], 2004, 344 p. (in Russian)

Development the Methods of Standing Wave Frequency Calculation in Operating of NPP with WWER Reactor

K.N. Proskuryakov*, A.V. Anikeev, K.I. Belyaev, D.A. Pisareva

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

Abstract – The paper carries out a comparison of calculation results of acoustic standing waves frequencies with auto-spectral power densities of the sensor signals of pressure fluctuations for complex combinations of acoustic elements of the 1st contour of nuclear power plants with WWER-440. The calculation results of acoustic standing wave frequencies are found to be in satisfactory agreement with the measurement data.

A new approach to the formation of combinational acoustic circuits in the coolant system in WWER-440 is presented. The oscillating circuit of the coolant including the reactor and pressure compensator connected by pipelines is investigated for the first time. It is found that the frequency of acoustic standing waves in this circuit is close to 2 Hz in the investigated modes. The possibility of this frequency shift in the area of resonant interaction with FA when changing the system layout is shown.

Keywords: standing waves, vibration, vibration, acoustic resonance, acoustic standing waves.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.566.6, 621.874.7

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАШИН ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ВВЭР

© 2018 А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, Л.А. Первушин

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

В статье рассматривается задача паспортизации режимов работы и определения технического состояния перегрузочной машины энергоблока ВВЭР по результатам виброакустического мониторинга. Предлагается применение псевдофазовых диаграмм для визуализации виброакустической информации. Рассмотрен пример определения эталонных характеристик режимов работы рабочей штанги машины перегрузочной энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Ключевые слова: виброакустический контроль, информационный паспорт, псевдофазовая диаграмма, перегрузка топлива, машина перегрузочная, рабочая штанга.

Поступила в редакцию: 23.05.2018

Перегрузка топлива на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 осуществляется дистанционно управляемым краном специальной конструкции – машиной перегрузочной (МП) МПС-В-1000, изображённой на рисунке 1 [1, 2]. МП перемещает тепловыделяющие сборки (ТВС), кластеры органов регулирования и некоторые другие специальные грузы, необходимые при проведении перегрузочной кампании. При выполнении МП технологических операций её оператор взаимодействует со штатной системой управления (СУ МП).

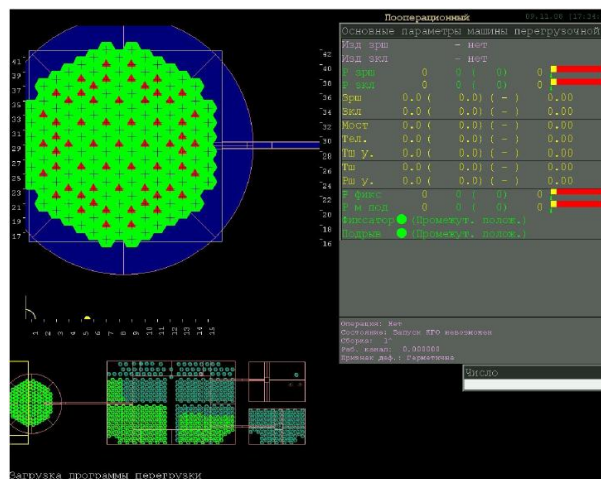


Рис. 1. – Машина перегрузочная МПС-В-1000

a – общий вид МП; б – интерфейс для оператора МП [MPS-V-1000 fuel-handling machine
a - the fuel-handling machine general view ; b - interface for the fuel-handling machine operator]

Модернизированный интерфейс СУ МП предусматривает [3, 4, 5] передачу команд оператора на исполнительные приводы механизмов МП, а также предоставление оператору информации о текущих:

- положениях механизмов МП (горизонтальные координаты моста и тележки, вертикальные отметки захватов и телекамеры, состояния захватов, углы поворота рабочей и телевизионной штанг);
- скоростях механизмов МП (мост, тележка, захваты, телекамера);
- весовых нагрузках на захватах рабочей штанги.

Кроме того, оператор получает от СУ МП телевизионный сигнал и имеет возможность управлять обзором камеры на телевизионной штанге.

Концепцией модернизации перегрузочных машин [6] с 2001 года также предусматривается оснащение МПС-В-1000 системами виброакустического контроля технического состояния основных узлов и механизмов рабочей штанги. Такие системы были поставлены на энергоблоки №№1 и 2 Тяньваньской АЭС (Китай) и энергоблок № 1 Ростовской АЭС. Структура системы виброакустического контроля обоснована в трудах ВНИИАМ и Волгодонского филиала ЮРГТУ (сейчас НИИ атомного энергетического машиностроения ВИТИ НИЯУ МИФИ) [7, 8]. В упрощённой форме схема системы виброакустического контроля рабочей штанги МП приведена на рисунке 2.

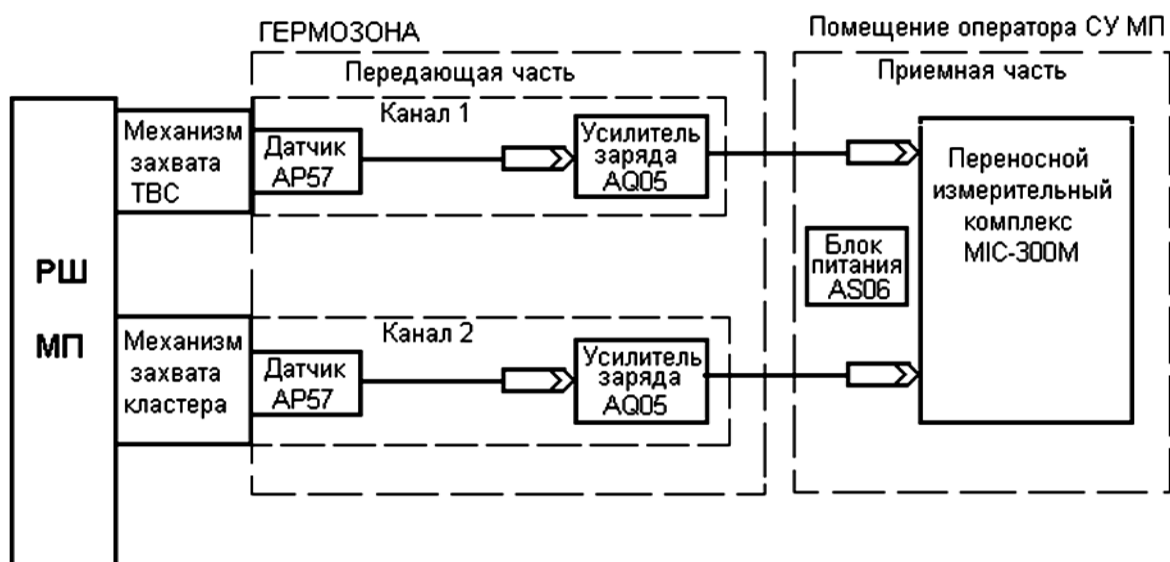


Рис. 2. – Структура системы виброакустического контроля рабочей штанги МП
 [The structure of the system of vibroacoustic control of the fuel-handling machine working rod]

Похожие по функционалу системы предлагаются южнокорейскими исследователями [9] как составная часть СУ МП с целью управления движениями МП по законам, подавляющим вибрацию рабочей штанги (применительно к водо-водяным реакторным установкам южнокорейского дизайна).

Аналогично виброакустическому информационному паспорту первого контура реакторной установки ВВЭР, предложенному в трудах К.Н. Проскурякова и др. [10], нами разрабатывается концепция виброакустического информационного паспорта кампаний перегрузки ядерного топлива. Виброакустическая паспортизация перегрузочных кампаний ВВЭР позволит поддерживать заданный уровень ядерной безопасности работ по перегрузке топлива, предоставляя оператору МП актуальную информацию:

- 1) о текущем техническом состоянии основных узлов и механизмов рабочей штанги;

2) о степени отклонения текущих характеристик сигнала от эталонных, составляющих так называемый виброакустический портрет технологической операции.

В качестве портрета технологической операции может рассматриваться массив, состоящий из числовых параметров, полученных на основе обработки виброакустического сигнала:

- временные отрезки характерных элементарных движений рабочей штанги, составляющих;
- общий уровень вибрации (среднеквадратическое значение виброускорения) и темп его изменения во времени;
- вариация (среднеквадратическое отклонение и пик-фактор);
- мощности сигнала по отдельным спектральным полосам;
- характерные резонансные частоты и полосы;
- иные характеристики, способные отобразить изменения режима работы и технического состояния механизмов рабочей штанги.

Степень отклонения текущих характеристик от эталонных может показать, к примеру, расстояние d между эталонным и фактически зарегистрированным диагностическими массивами, либо другая подобная мера.

$$d^2 = \sum_i (x_i^2 - x_{i(\Theta)}^2)$$

$$d \leq [d]$$

Допуск $[d]$ должен определяться в зависимости от опыта эксплуатации измерительной системы и от класса безопасности обследуемого оборудования.

Первая задача может быть решена с имеющимся программным и приборным обеспечением системы виброакустического контроля. Для решения второй необходимо усовершенствование математического аппарата с целью выявления эталонных портретов заведомо качественно выполненных технологических операций. С этой целью в данной работе рассматривается применение аналитического аппарата нелинейной динамики к идентификации текущего режима работы перегрузочной машины.

Отечественные и зарубежные исследования 2010-х годов показывают, что в электромеханических системах имеются предпосылки возникновения нелинейной динамики из-за мгновенных изменений трения, демпфирования или условий нагружения. Данные факторы усугубляются при развитии дефекта. В частности, данный подход применяется НИИ АЭМ ВИТИ НИЯУ МИФИ в диагностике электроприводной арматуры АЭС [11].

В нелинейной динамике движущихся тел базовым аналитическим средством являются фазовые диаграммы, показывающие траектории движения в фазовом пространстве координат и скоростей:

$$\mathcal{R}(x, y, z, \frac{\partial x}{\partial t}, \frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial z}{\partial t})$$

Фигура, к которой стремятся траектории системы в фазовой диаграмме, называется её аттрактором.

В связи с тем, что виброакустический сигнал, зарегистрированный одним измерительным каналом, представляет собой временной ряд, построение фазовой диаграммы напрямую невозможно. В таких случаях Ф. Муном рекомендуется построение траекторий в псевдофазовом пространстве (далее – псевдофазовых

диаграмм) [12]. Псевдофазовая диаграмма представляет собой отображение временного ряда (в данной работе последовательности значений виброакустического сигнала через равные промежутки времени, определяемые частотой дискретизации f).

$$\Delta t = \frac{1}{f}$$

Отображение строится как множество точек в плоскости:

$$(a_i, a_{i+1})$$

Логика отображения связана с тем, что если классическая фазовая диаграмма будет в одномерном случае построена в плоскости:

$$(x, \frac{\partial x}{\partial t}),$$

то при бесконечно малом временном шаге Δt псевдофазовую плоскость можно представить похожим образом: по одной оси откладывается значение сигнала, по второй – величина, линейно связанная с его первой производной во времени:

$$(a_i, a_i + \frac{\partial a}{\partial t} \cdot \Delta t)$$

Таким образом, отображение временного ряда в псевдофазовой диаграмме сходно по смыслу с отображением движения тела с одной степенью свободы в классической фазовой диаграмме [12].

Текущее десятилетие характеризуется всплеском интереса к нелинейным и хаотическим методам анализа данных. Так, отображения в псевдофазовой плоскости позволили португальским исследователям выявлять закономерности в лесных пожарах [13], землетрясениях [14] и других случайных событиях.

Для понимания закономерностей псевдофазового отображения примеры для простых сигналов приведены на рисунке 3.

Как видно, регулярное движение формирует аттрактор в виде замкнутой линии (количество замкнутых контуров связано с количеством гармоник), чистый шумовой сигнал равномерно занимает псевдофазовую плоскость, хаотический сигнал формирует фрактальный аттрактор. Линейные комбинации сигналов разного сорта сочетают узнаваемые элементы отображений на псевдофазовой диаграмме.

При построении псевдофазовых диаграмм сигналов, зарегистрированных описанной выше системой виброакустического контроля, выявлены характерные фигуры – аттракторы, которые можно связать с режимами рабочей штанги МП. Для перемещения первой секции рабочей штанги на различных скоростях осциллограммы и отображения сигналов приведены на рисунке 4.

На рисунках приведены отображения временных рядов виброускорения, обезразмеренного по формуле:

$$a_i = \frac{A_i - \min(A)}{\max(A) - \min(A)},$$

где A – виброускорение, м/с^2 ,
 a – нормированное виброускорение.

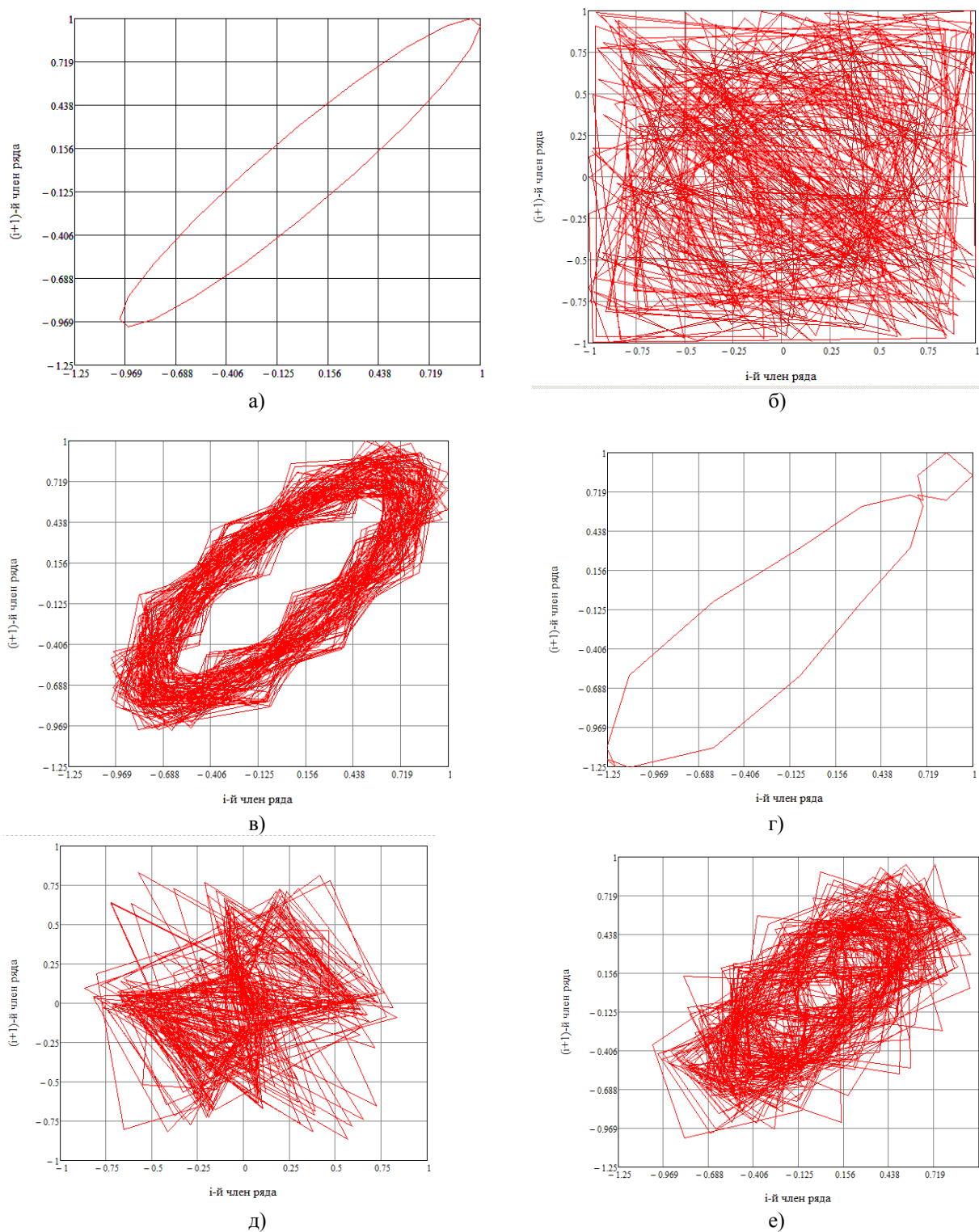


Рис. 3. – Характерные отображения различных сигналов в псевдофазовой диаграмме
а – отображение гармонического сигнала; б – отображение белого шума; в – отображение
линейной комбинации гармонического сигнала и белого шума; г – отображение полигармонического
сигнала; д – хаотический сигнал (аттрактор Лоренца); е – отображение линейной комбинации
гармонического и хаотического сигналов

[Characteristic mappings of various signals in a pseudo-phase diagram
а – harmonic signal display; б – white noise display; в – display of a linear combination of a harmonic
signal and white noise; д – a polyharmonic signal mapping; е – chaotic signal (Lorenz attractor); ф – mapping of
a linear combination of harmonic and chaotic signals]

Для движений рабочей штанги с ТВС в захвате характерны аттракторы в форме замкнутых линий с достаточно широкими областями, занятыми траекториями системы. Это позволяет сопоставить изображения рисунков 4,а и 4,в с отображениями рисунков 3,а и 3,в. Таким образом, тип движения рабочей штанги с ТВС в захвате можно охарактеризовать, как регулярный со значительной шумовой компонентой.

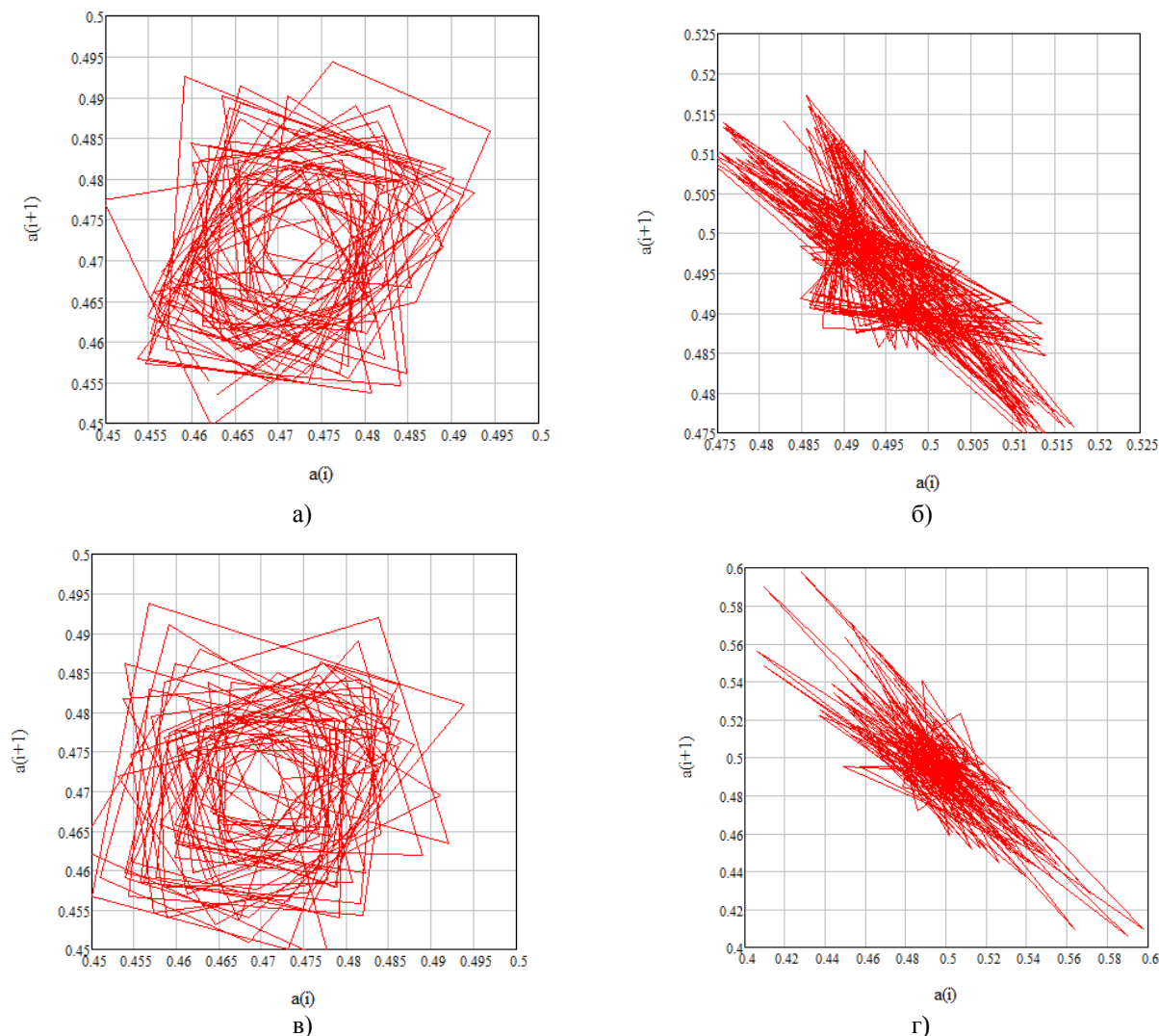


Рис. 4. – Отображения виброакустических сигналов, зарегистрированных при движении первой секции рабочей штанги

а – движение на рабочей скорости с ТВС в захвате; б – движение на малой скорости без нагрузки на захватах; в – движение на транспортной скорости с ТВС в захвате; г – движение на средней скорости без нагрузки на захватах [Vibroacoustic signals recorded when moving the first section of the working rod a – moving at the working speed with the fuel assembly in the grip; b – motion at low speed without load on the grippers; c - movement at the transport speed from the fuel assembly in the grip; g - motion at medium speed without load on the grippers]

Движение рабочей штанги без груза в захвате характеризуется аттрактором сложной формы в виде вытянутой многолучевой звезды. Таким образом, можно говорить о частично хаотическом характере движения ненагруженной рабочей штанги.

Исследование на множестве фрагментов виброакустического сигнала позволило подтвердить выводы о смене характера отображения в псевдофазовой диаграмме при смене режима нагружения рабочей штанги. Для практического использования

псевдофазовых диаграмм следует в дальнейших исследованиях выявить наиболее представительные численные показатели отображений, способные выступать как критерии для идентификации режима работы и технического состояния, совместно с классическими спектральными характеристиками.

Рассмотренный метод может использоваться для визуализации виброакустической информации в системе мониторинга. Типовые паттерны псевдофазовой диаграммы являются частью виброакустического портрета технологической операции, выполняемой машиной перегрузочной.

Работы по продлению сроков эксплуатации МПС-В-1000, выполненные НИИ АЭМ ВИТИ НИЯУ МИФИ в 2014-2016 годах [15], подтверждают перспективность структурирования информации об обследованиях и ремонтах машин перегрузочных в едином информационном пространстве. Исходя из вышесказанного, концепция виброакустического информационного паспорта перегрузочной кампании актуальна в свете требований новых федеральных норм и правил НП-096-15 [16], предписывающих накопление диагностической информации за весь срок эксплуатации для его обоснованного продления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрушечко, С.А. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации к эволюции проекта [Текст] / С.А. Андрушечко, А.М. Афров, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Сенченков, В.Ф. Украинцев. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
2. Шиянов, А.И. и др. Системы управления перегрузочных манипуляторов АЭС с ВВЭР [Текст] / А.И. Шиянов, М.И. Герасимов, И.В. Муравьев. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 176 с.
3. Якубенко, И.А. Модернизация системы управления перегрузкой ядерного топлива на энергоблоке №1 Ростовской АЭС [Текст] / И.А. Якубенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 4(9). – С. 35–39.
4. Терехов, Д.В. и др. Модернизация перегрузочной машины энергоблока №5 Нововоронежской АЭС [Текст] / Д.В. Терехов, В.И. Дунаев. // Теплоэнергетика. – 2014. – №2. – С. 65–71.
5. Korobkin V.V., Povarov V.P. New generation refueling machine information and control system. Nuclear Energy and Technology, Vol. 3, Issue 4, December 2017, pp. 302–306.
6. РЭ АТЭ.118.0003-2001. Модернизация перегрузочных машин для энергоблоков АЭС с ВВЭР. Концепция модернизации перегрузочных машин. Концерн «Росэнергоатом» [Текст], М., 2001. – 57 с.
7. Никифоров, В.Н. и др. Контроль технического состояния рабочей штанги перегрузочной машины для ВВЭР-1000 В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачёва, О.В. Паламарчук // Теплоэнергетика. – 2003 – №5 – С. 33–34.
8. Никифоров, В.Н. и др. Канал контроля технического состояния рабочей штанги машины перегрузочной типа МПС-В-1000-3У4.2 [Текст] / В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева, А.В. Чернов // Тез. докл. II всерос. науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – 19-23.11. 2001 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2001. – С. 116–117.
9. Umer Nameed Shah, Keum-Shik Hong. Active vibration control of a flexible rod moving in water: Application to nuclear refueling machines. Automatica, Vol. 93, July 2018, pp. 231–243.
10. Проскуряков, К.Н. Виброакустическая паспортизация АЭС – средство повышения их надежности и безопасности [Текст] / К.Н. Проскуряков // Теплоэнергетика. – 2005. – №12. – С. 30–34.
11. Абидова, Е.А. и др. Диагностирование электроприводной арматуры с использованием энтропийных показателей Е.А. Абидова, Л.С. Хегай, А.В. Чернов, О.Ю. Пугачёва // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №4(21). – С. 69–77.
12. Мун, Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров [Текст] / Ф. Мун: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 312 с., ил.
13. Antonio M. Lopes, J.A. Tenreiro Machado. Analysis of Forest Fires by means of Pseudo Phase Plane and Multidimensional Scaling Methods. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2014, Article ID 575872 – 8 p.
14. Antonio M. Lopes, J.A. Tenreiro Machado. Dynamic analysis of earthquake phenomena by means of pseudo phase plane. Nonlinear Dynamics, 2013, Vol. 74, Issue 4, pp. 1191–1202.

15. Лапкис, А.А. и др. Особенности продления срока эксплуатации перегрузочных машин энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000. [Текст] / А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачёва // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №1(18). – С. 95–103.
16. НП-096-15. Требования к управлению ресурсом оборудования и трубопроводов атомных станций. Основные положения. – Утв. приказом Ростехнадзора №410 от 15.10.2015 г. [Текст] [Б.м.], 2015.

REFERENCES

- [1] Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasil'ev B.Ju., Generalov V.N., Kosourov K.B., Senchenkov Ju.M., Ukraincev V.F. AES s reaktorom tipa VVER-1000. Ot fizicheskikh osnov jekspluatacii k jevoljucii proekta [NPP with WWER-1000 Reactor. From the Physical Exploitation Basics to the Evolution of the Project]. M. Pub. Logos, 2010, 604 p. (in Russian)
- [2] Shijanov A.I., Gerasimov M.I., Muravjov I.V. Sistemy upravlenija peregruzochnyh manipuljatorov AES s VVER [Control Systems for Handling Manipulators of NPP WWER reactor]. M. Pub. Energoatomizdat, 1987, 176 p. (in Russian)
- [3] Jakubenko I.A. Modernizacija sistemy upravlenija peregruzkoj jadernogo topliva na jenergobloke №1 Rostovskoj AES [Modernization of the Nuclear Fuel Congestion Management System at Unit 1 of Rostov NPP]. Globalnaja jadernaja bezopasnost [Global nuclear safety], 2013, №4(9), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 35–39. (in Russian)
- [4] Terehov D.V., Dunaev V.I. Modernizacija peregruzochnoj mashiny jenergobloka №5 Novovoronezhskoj AES [Modernization of the Fuel-Handling Machine of the Novovoronezh NPP Power Unit No. 5]. Teplojenergetika [Heat Power Engineering], 2014, №2, pp. 65–71 (in Russian)
- [5] V.V. Korobkin, V.P. Povarov. New generation refueling machine information and control system. Nuclear Energy and Technology, Volume 3, Issue 4, December 2017, DOI: 10.1016/j.nucet.2017.11.005, pp. 302–306. (in English)
- [6] RJe ATJe.118.0003-2001. Modernizacija peregruzochnyh mashin dlja jenergoblokov AES s VVER. Koncepcija modernizacii peregruzochnyh mashin. Koncern «Rosjenergoatom» [RE ATE.118.0003-2001. Modernization of Fuel-Handling Machines for NPP WWER Reactor. The Concept of Modernization of Fuel-Handling Machines. Rosenergoatom Concern], M. 2001, 57 p. (in Russian)
- [7] Nikiforov V.N., Pugachjova O.Ju., Palamarchuk O.V. etc. Kontrol tehničeskogo sostojanija rabochej shtangi peregruzochnoj mashiny dlja VVER-1000 [Monitoring of the Technical Condition of the Fuel-Handling Machine Working Rod for WWER-1000]. Teplojenergetika [Heat Power Engineering], 2003, №5, pp. 33–34. (in Russian)
- [8] Nikiforov V.N., Pugacheva O.Ju., Chernov A.V. Kanal kontrolja tehničeskogo sostojanija rabochej shtangi mashiny peregruzochnoj tipa MPS-V-1000-3U4.2. Tezisy dokladov II vsrossijskoj nauchno-tehničeskoj konferencii «Obespečenie bezopasnosti AES s VVER», 19–23 nojabrja 2001 [The channel for Monitoring of the Technical Condition of the MPS-V-1000-3U4.2 Fuel-Handling Machine Working Rod. Theses of Reports II all-Russian Scientific and Technical Conference "Providing the Safety of Nuclear Power Plants with WWER", 19-23 November, 2001], Podolsk. Pub. OKB «Gidropress» [OKB Gidropress], 2001, pp. 116–117. (in Russian)
- [9] Umer Hameed Shah, Keum-Shik Hong. Active vibration control of a flexible rod moving in water: Application to nuclear refueling machines. Automatica, Volume 93, July 2018, pp. 231–243. (in English)
- [10] Proskurjakov K.N. Vibroakustičeskaja pasportizacija AES – sredstvo povyššenija ih nadežnosti i bezopasnosti [Vibroacoustic Certification of Nuclear Power Plants is a Means of Increasing their Reliability and Safety]. Teplojenergetika [Heat Power Engineering], 2005, №12, pp. 30–34. (in Russian)
- [11] Abidova E.A., Hegaj L.S., Chernov A.V., Pugachjova O.Ju. Diagnostirovanie jelektroprivodnoj armatury s ispol'zovanijem jentropijnyh pokazatelej [Diagnosis of Electric Drives Using Entropy Indicators]. Globalnaja jadernaja bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №4,(21), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 69–77. (in Russian)
- [12] Mun F. Haotičeskie kolebanija: Vvodnyj kurs dlja nauchnyh rabotnikov i inženerov [перевод]. Perevod s anglijskogo [Chaotic Oscillations: Introductory Course for Scientists and Engineers]. M. Pub. Mir, 1990, 312 p. (in Russian)
- [13] Antonio M. Lopes, J.A. Tenreiro Machado. Analysis of Forest Fires by means of Pseudo Phase Plane and Multidimensional Scaling Methods. Mathematical Problems in Engineering, Volume 2014, Article ID: 575872, DOI: 10.1155/2014/575872, 8 p. (in English)
- [14] Antonio M. Lopes, J.A. Tenreiro Machado. Dynamic analysis of earthquake phenomena by means of pseudo phase plane. Nonlinear Dynamics, 2013, Volume 74, Issue 4, pp. 1191–1202. (in English)

- [15] Lapkis A.A., Nikiforov V.N., Pugachjova O.Ju. Osobennosti prodlenija sroka jekspluatacii peregruzochnyh mashin jenergoblokov s reaktorami VVER-1000 [Peculiarities of Extending the Service Life of Fuel-Handling Machines with WWER-1000 Reactor Power Units]. Globalnaja jadernaja bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №1(18), ISSN 2305-414X, eISSN 2499-9733, pp. 95–103. (in Russian)
- [16] NP-096-15. Trebovanija k upravleniju resursom oborudovanija i truboprovodov atomnyh stancij. Osnovnye polozhenija. Utverzhdeny prikazom Rostekhnadzora №410 ot 15.10.2015 [NP-096-15. Requirements for Resource Management of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants. Basic Provisions. - Approved Order of Rostekhnadzor No.410, October, 15, 2015.]. (in Russian)

Vibroacoustical Certification of Operating Modes of WWER Fuel-Handling Machines

A.A. Lapkis, V.N. Nikiforov, L.A. Pervushin

*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 article deals with the task of certification of operating modes and determining the technical state of the WWER fuel-handling machine based on the results of vibroacoustic monitoring. The use of pseudo-phase diagrams for vibroacoustic information visualization is proposed. An example of determining the reference characteristics of working rod operating modes of the WWER-1000 fuel-handling machine is considered.

Keywords: vibroacoustic control, information passport, pseudo-phase diagram, fuel overload, fuel-handling machine, working rod.

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

УДК 159.9:62

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОМЫШКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЧЕБНЫХ
И УЧЕБНО-ТРЕНИРОВОЧНЫХ ЗАНЯТИЙ¹**

© 2018 М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Сформулированы основные условия обеспечения эффективности учебных и учебно-тренировочных занятий. Показана актуальность мониторинга текущего состояния обучающихся в процессе проведения занятий. Рассмотрены достоинства использования компьютерной биомышки (КБМ) для осуществления мониторинга состояния обучающихся непосредственно во время учебных занятий. Анализируются результаты экспериментальных исследований эффективности применения КБМ. Выявлена достаточно высокая корреляция между уровнем артериального давления и индексом напряженности, измеряемым с помощью КБМ.

Ключевые слова: компьютерная биомышка, эффективность учебных занятий, мониторинг текущего состояния обучающихся.

Поступила в редакцию: 25.05.2018

Бурный рост объема новых знаний приводит к необходимости повышения эффективности образовательных технологий, включая профессиональную подготовку в рамках учебных и учебнотренировочных занятий [1, 2]. Эффективность учебных и учебно-тренировочных занятий имеет принципиальное значение для минимизации влияния человеческого фактора на надежность и безаварийность функционирования опасных объектов, к числу которых, в первую очередь, относятся тепловые и атомные станции. Одним из направлений повышения эффективности учебных и учебно-тренировочных мероприятий является создание и поддержание условий, обеспечивающих высокий уровень понимания и усвояемости учебного материала и практических навыков. Наиболее важными из вышеупомянутых условий являются: нормальное питание, полноценный сон и отдых обучающихся; высокий профессионализм учебно-преподавательского состава; комфортные санитарно-климатические условия проведения занятий; актуальность тематики проводимых занятий. Все перечисленные факторы в конечном итоге обуславливают нормальное рабочее состояние обучающихся и их заинтересованность в получении новых знаний, компетенций и навыков.

К сожалению, не все вышеперечисленные условия соблюдаются на практике. Неполноценный сон и отдых, нерегулярное питание, жара и духота в помещении, низкая квалификация преподавателя и недостаточная проработанность учебно-

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

методического материала приводят к быстрой утомляемости обучающихся в процессе проведения занятий и, как следствие, к низкому уровню профессиональной подготовки. С этой точки зрения, создаваемые в последнее время средства мониторинга текущего функционального и психоэмоционального состояния человека [3, 4] следует рассматривать в качестве инструмента, позволяющего осуществлять постоянный контроль восприимчивости обучающихся к новым знаниям, а также индикатора нормального рабочего состояния учебной группы. Для реализации непрерывного мониторинга текущего состояния каждого обучающегося на практике используется целая совокупность современных информационных технологий, которые дают возможность в режиме реального времени осуществить регистрацию основных биопараметров человека [5]. Последующий анализ динамики изменения биопараметров позволяет получить информацию о текущем состоянии человека, а также же сделать прогноз о его наиболее вероятном изменении.

Наиболее просто с технической и методической точек зрения задача непрерывного мониторинга решается в случае квазистатического расположения обучающихся [6]. Такое расположение обучающихся, либо тренируемых людей типично, например, при проведении учебных и учебно-тренировочных занятий в классе, в тренажерном зале, а также на полномасштабных тренажерах. Квазистатическое расположение человека существенным образом облегчает решение задачи поиска изображения лица человека с целью его последующей обработки в видимом и инфракрасном спектрах [7, 8] для измерения многих из вышеупомянутых биопараметров [3]. Основным недостатком такого подхода является достаточно высокая стоимость оборудования, работающего в инфракрасной области оптического излучения.

Последние достижения в области создания малогабаритных встраиваемых биометрических систем позволяют на новом технологическом уровне подойти в решению задачи осуществления непрерывного мониторинга текущего состояния обучающихся непосредственно в процессе проведения учебных и учебно-тренировочных занятий. Одной из таких биометрических систем является компьютерная биометрическая мышка (КБМ).

Целью работы являются экспериментальные исследования эффективности применения КБМ при проведении учебных и учебно-тренировочных занятий.

КБМ является одним из представителей современных высокотехнологичных средств, позволяющих осуществить мониторинг текущего состояния человека наряду с измерительными кольцами, браслетами, кулонами и разнообразными гаджетами. По сравнению с последними КБМ имеет целый ряд преимуществ, которые обуславливают целесообразность ее применения при проведении учебных и учебно-тренировочных занятий. Наиболее существенными из которых являются:

- КБМ не вызывает психологических проблем с обучающимися, т.к. многие из учебных и учебно-тренировочных занятий осуществляются с использованием компьютеризированных стендов, использование компьютерной мышки в которых является естественным;

- использование КБМ обычно не требует изменения запланированного временного графика проведения занятий;

- КБМ позволяет организовать мониторинг состояния всей учебной группы на основе использования современных сетевых компьютерных технологий.

В наиболее простом случае КБМ регистрирует фотоплетизмограмму (ФПГ) человека, анализ которой дает возможность оценить целую совокупность параметров, характеризующих текущее функциональное и психоэмоциональное состояние обучающихся. На рисунке 1 показан вариант наиболее типичного применения КБМ при

проведении занятий с использованием компьютерной техники (1 – персональный компьютер; 2 – монитор персонального компьютера, отображающий учебный материал; 3 – обычная компьютерная мышка; 4 – КБМ; 5 – клавиатура).

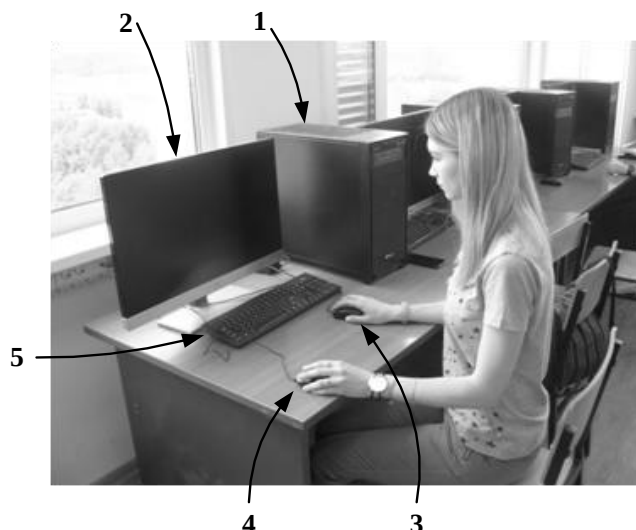


Рис. 1. – Использование двух компьютерных мышек [Using two computer mice]

Одновременное использование двух независимых компьютерных мышек обусловлено следующими факторами:

- для правильной регистрации ФПГ необходимо обеспечить малую подвижность кисти руки, которая контактирует с КБМ;
- периодическая регистрация ФПГ не должна прерывать учебных занятий;
- КБМ не всегда сопрягается с действующим образовательным программным обеспечением на информационном уровне.

План экспериментального исследования эффективности КБМ включал в себя следующие процедуры:

- выполнение учебного задания на компьютерном стенде;
- периодическую (в среднем каждые 15–20 минут) регистрацию ФПГ каждого обучающегося с помощью КБМ;
- одновременное с регистрацией ФПГ измерение артериального давления (АД) обучающихся с помощью сертифицированного автоматизированного измерителя манжетного типа.

Необходимо отметить, что параметры, характеризующие работу сердечно-сосудистой системы человека, являются чрезвычайно важными, во многом обуславливающими оценки его текущего функционального и психоэмоционального состояния [9-11].

На рисунке 2 показана процедура измерения АД у обучающихся (тренируемых).

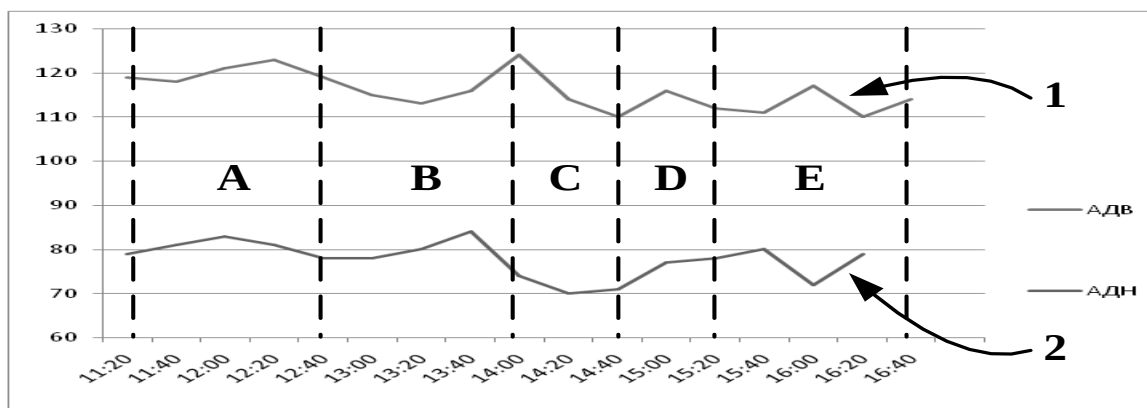
АД было выбрано в качестве одного из показателей, характеризующего текущее состояние обучающихся, по следующим причинам:

- процедура, а также используемые технические и методические средства измерения АД являются сертифицированными и стандартизованными;
- АД является интегральным показателем, объективно характеризующим текущее состояние человека;
- анализ динамики изменения АД дает возможность отследить достаточно быстрые изменения текущего состояния обучающихся.

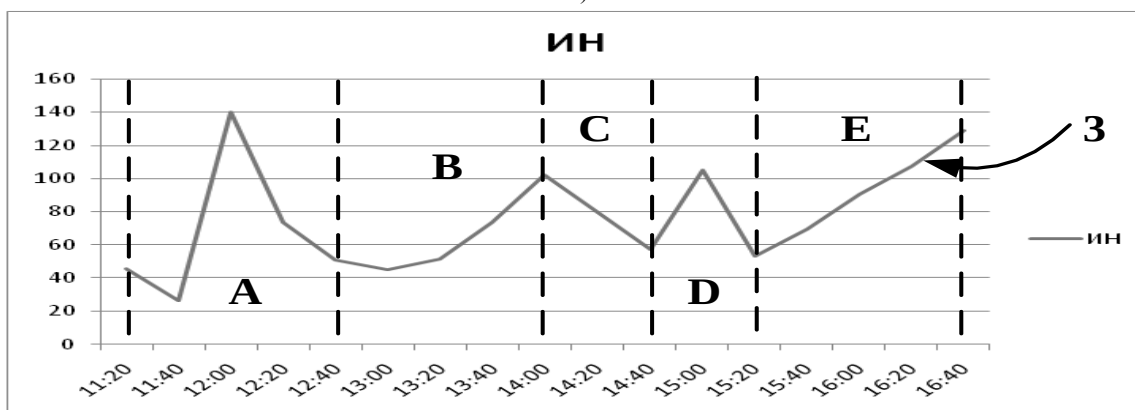


Рис. 2. – Процедура измерения АД [Procedure for blood pressure measuring]

На рисунке 3а представлены пример мониторинга АД, измеряемого в мм ртутного столба (АДВ (1) и АДН (2) – соответственно верхнее и нижнее давление) для одного из обучающихся. На рисунке 3б показана динамика изменения, так называемого, индекса напряжения ИН (3), измеряемого с помощью КБМ (в процентах).



а)



б)

Рис. 3. – Мониторинг АД и ИН в процессе учебных занятий

а) мониторинг АД; б) динамика изменения индекса напряжения ИН (3)

[Monitoring AP and SI during the training classes

a) monitoring of blood pressure b) the dynamics of the change in strain index, SI (3)]

Анализ экспериментальных данных подтвердил достаточно высокую корреляцию параметров АД и ИН. Так, мониторинг всего учебного процесса позволил выделить его следующие основные фазы: ознакомление с заданием (проявление некоторого испуга) – А; нормальная работа с накоплением усталости – В; обеденный перерыв и отдых – С (во время обеденного перерыва измерений не осуществлялось, точки графика получены путем линейной аппроксимации крайних значений); продолжение выполнения задания и некоторое волнение – D; накопление усталости – Е.

Проведенные экспериментальные исследования были проведены для различных видов учебных и учебно-тренировочных занятий, предполагающих и не предполагающих использование компьютерной техники. В последнем случае измерения проводились на специально выделенном компьютеризированном стенде и включали в себя одновременное измерение АД и ИН.

Полученные экспериментальные данные подтвердили высокую надежность и эффективность использования КБМ как средства мониторинга текущего функционального и психоэмоционального состояния обучающихся при выполнении условий ее применения.

Таким образом, данные, получаемые с помощью КБМ, дают возможность объективно оценивать текущее состояние каждого обучающегося в отдельности, а также учебной группы в целом. Они являются основой для обоснованного планирования насыщенности учебных и учебно-тренировочных занятий, а также могут быть использованы для объективизации уровня полученных профессиональных знаний, навыков и компетенций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 30 декабря 2012 г. №2620-р Об утверждении плана мероприятий ("дорожной карты") "Изменения в отраслях социальной сферы, направленные на повышение эффективности образования и науки" [Б.м.].
2. Федеральный закон от 29.12.2012 №273-ФЗ от 07.03.2018) "Об образовании в Российской Федерации" [Б.м.].
3. *Алюшин, М.В. и др.* Мониторинг биопараметров человека на основе дистанционных технологий [Текст] / М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина // Вопросы психологии. – 2014. – № 6. – С. 135–144.
4. *Тизенберг, А.Г. и др.* Новые подходы к профессиональной диагностике в целях оптимизации профессионального отбора и профессиональной ориентации [Текст] / А.Г. Тизенберг, Г.М. Тизенберг // Известия ИГЭА. – 2013. – № 4(90). – С. 76–79.
5. Alyushin M.V., Kolobashkina L.V. Education technology with continuous real time monitoring of the current functional and emotional students' states. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 1797, 020001, 2017. DOI: 10.1063/1.4972421
6. Alyushin M.V., Alyushin A.M., Kolobashkina L.V. Laboratory approbation of the algorithm for isolating people's faces on a thermal infrared image in the case of their quasi-stationary arrangement in a room. Proceedings of the Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA 2017). Moscow, Russia, 1-6 August 2017. DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.003
7. Kolobashkina L.V., Filippova A.T. A person's face complex image processing in the visible and infrared ranges for current psycho-emotional and functional state monitoring systems. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE *Xplore* Digital Library. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317462
8. Alyushin M.V., Lyubshov A.A. The Viola-Jones algorithm performance enhancement for a person's face recognition task in the long-wave infrared radiation range. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE *Xplore* Digital Library. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317459
9. *Бокерия, Л.А. и др.* Вариабельность сердечного ритма: методы измерения, интерпретация, клиническое использование [Текст] / Л.А. Бокерия, О.Л. Бокерия, И.В. Волковская // Анналы аритмологии. – 2009. – №4. – С. 21–32.
10. *Деваев, Н.П.* Влияние экзаменационного стресса на регуляцию сердечного ритма и биоэлектрическую активность головного мозга у студенток [Текст] / Н.П. Деваев //

Физиология. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2010. – № 2 (2). – С. 622–626.

11. Сафонова, В.Р. и др. Параметры variability сердечного ритма студенток северного медицинского вуза при экзаменационном стрессе [Текст] / В.Р. Сафонова, Е.Ю. Шаламова // Экология человека. – 2013. – №8. – С. 11–16.

REFERENCES

- [1] Rasporjazhenie Pravitel'stva RF ot 30 dekabrya 2012 g. №2620-r Ob utverzhdenii plana meroprijatij ("dorozhnoj karty") "Izmeneniya v otraslyah social'noj sfery, napravlennye na povyshenie jeffektivnosti obrazovaniya i nauki" [Decree of the Government of the Russian Federation, December 30, 2012 No. 2620-r The Action Plan Approval ("Road Map") "Changes in Social Sectors to Improve the Efficiency of Education and Science"]. (in Russian)
- [2] Federalnyj zakon ot 29.12.2012 N 273-FZ ot 07.03.2018) "Ob obrazovanii v Rossijskoj Federacii" [Federal Law, December 29, 2012 № 273-ФЗ of 07.03.2018) " Education in the Russian Federation"]. (in Russian)
- [3] Aljushin M.V., Kolobashkina L.V. Monitoring bioparametrov cheloveka na osnove distancionnyh tehnologij [Monitoring of Human Bioparameters Based on Remote Technologies]. Voprosy psihologii [Psychology Issues], 2014, №6, pp. 135–144. (in Russian)
- [4] Tizenberg A.G., Tizenberg G.M. Novye podhody k professional'noj diagnostike v celjah optimizacii professional'nogo otbora i professional'noj orientacii [New Approaches to Professional Diagnosis in order to Optimize Professional Selection and Professional Orientation]. Izvestija IGEA [IGEEA News], 2013, №4(90), pp. 76–79. (in Russian)
- [5] Alyushin M.V., Kolobashkina L.V. Education technology with continuous real time monitoring of the current functional and emotional students' states. AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 1797, 020001, 2017. DOI: 10.1063/1.4972421 (in English)
- [6] Alyushin M.V., Alyushin A.M., Kolobashkina L.V. Laboratory approbation of the algorithm for isolating people's faces on a thermal infrared image in the case of their quasi-stationary arrangement in a room. Proceedings of the Biologically Inspired Cognitive Architectures (BICA 2017). Moscow, Russia, 1-6 August 2017. DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.003 (in English)
- [7] Kolobashkina L.V., Filippova A.T. A person's face complex image processing in the visible and infrared ranges for current psycho-emotional and functional state monitoring systems. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE Xplore Digital Library. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317462 (in English)
- [8] Alyushin M.V., Lyubshov A.A. The Viola-Jones algorithm performance enhancement for a person's face recognition task in the long-wave infrared radiation range. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE Xplore Digital Library. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317459 (in English)
- [9] Bokerija L.A. Bokerija O.L., Volkovskaja I.V. Variabelnost serdechnogo ritma: metody izmereniya, interpretacija, klinicheskoe ispolzovanie [Heart Rate Variability: Measurement Methods, Interpretation, Clinical Use]. Annaly aritmologii [Annals of Arrhythmology], 2009, №4, pp. 21–32. (in Russian)
- [10] Devaev N.P. Vliyanie jekzamenacionnogo stressa na reguljaciju serdechnogo ritma i bioelektricheskiju aktivnost golovnogogo mozga u studentok [The Influence of Exam Stress on the Regulation of Heart Rhythm and Bioelectrical Activity of the Brain in Female Students]. Fiziologija. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Physiology. Bulletin of Lobachevsky Nizhny Novgorod University.], 2010, №2(2), pp. 622–626. (in Russian)
- [11] Safonova V.R., Shalamova E.Yu. Parametry variabelnosti serdechnogo ritma studentok severnogo medicinskogo vuza pri jekzamenacionnom stresse [Parameters of Heart Rate Variability of Students of the Northern Medical University in Examination Stress]. Ekologija cheloveka [Human Ecology], 2013, №8, pp. 11–16. (in Russian)

Experimental Studies of Bio Mouse Usage Efficiency during Educational and Training Classes

M.V. Alyushin^{*}, L.V. Kolobashkina^{}**

*National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, Russia 115409
e-mail: MVAlyushin@mephi.ru*

ORCID: 0000-0001-7806-3739
WoS Researcher ID: R-7928-2016
**
e-mail: LVKolobashkina@mephi.ru

Abstract – Main conditions of ensuring the effectiveness of educational and training classes are formulated. The relevance of monitoring the current state of students in the process of setting classes is shown. The advantages of using a computer bio mouse (CBM) for monitoring the status of students directly during training classes are considered. The results of experimental studies on the effectiveness of CBM are analyzed. A fairly high correlation is found between the level of arterial pressure and the tension index measured by CBM.

Keywords: computer bio mouse, training classes efficiency, student current state monitoring

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

УДК 378.147:811.111

**ОСОБЕННОСТИ СОЦИАЛЬНОЙ АДАПТИВНОСТИ СТУДЕНТОВ
ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА В ПОЛИКУЛЬТУРАЛЬНЫХ СРЕДАХ
(НА ПРИМЕРЕ РАБОТЫ С ИНОСТРАННЫМИ СТУДЕНТАМИ
В РАМКАХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРАКТИКИ В РЕСУРСНОМ
ЦЕНТРЕ НА БАЗЕ ПРЕДПРИЯТИЙ РОСАТОМА)**

© 2018 Л.В. Захарова, Л.А. Гунина, И.В. Зарочинцева, Ю.А. Лупиногина

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

В работе проанализировано влияние языковой подготовки на социальную адаптацию студентов ВИТИ НИЯУ МИФИ, изучена роль английского языка в процессе социальной адаптации, проведен сравнительный анализ характеристик социальной адаптивности студентов ВИТИ и студентов, приоритетно изучающих английский язык, в процессе общения с иностранными студентами в рамках производственной практики в Ресурсном центре НИЯУ МИФИ.

Ключевые слова: социальная адаптация студентов, языковая подготовка, характеристики социальной адаптивности.

Поступила в редакцию: 18.06.2018

Тема социальной адаптивности студентов технического вуза в поликультуральных средах приобретает сегодня все большую актуальность. Основная причина – современные проблемы общественного переустройства, которые требуют приспособления студентов к условиям новой социальной среды, имеющей свои культурные особенности, не только традиции и обычаи, но и менталитет, ценности, нормы поведения [1]. Знакомство именно с этим аспектом культуры помогает в адаптации студентов к новой среде [2]. В данной статье тема социальной адаптивности студентов будет рассмотрена на примере работы с иностранными студентами в рамках производственной практики в Ресурсном центре НИЯУ МИФИ.

В соответствии с утверждённой Правительством РФ «Концепцией долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» [3], необходимо создавать условия для привлечения в Россию иностранных студентов, это одна из приоритетных задач в деятельности Министерства образования и науки и самих российских высших учебных заведений. В Ресурсном центре НИЯУ МИФИ созданы все необходимые условия для привлечения в Россию иностранных студентов.

Ресурсный центр НИЯУ МИФИ по технической эксплуатации и ремонту оборудования АЭС в г. Волгодонске создан в 2015 году для обеспечения практико-ориентированной подготовки специалистов в условиях наукоемкого и высокотехнологичного производства атомной промышленности. Сотни студентов головной площадки университета, работая на полномасштабном оборудовании предприятий ГК «Росатом» в г. Волгодонске, смогли улучшить свои практические умения и навыки. Это студенты таких стран, как Вьетнам, Иордания, Монголия, Бангладеш, Чили, Египет, Армения, Болгария и другие. Приток иностранных студентов

подтверждает высокий уровень и высокий статус Ресурсного центра НИЯУ МИФИ [4].

В настоящее время в Ресурсном центре обучаются как российские, так и иностранные студенты. Обучение иностранных студентов в Ресурсном Центре НИЯУ МИФИ ведется в соответствии с Положением о Ресурсном Центре, осуществляется квалифицированными специалистами предприятий ГК «Росатом» в г. Волгодонске и профессорско-преподавательским коллективом ВИТИ НИЯУ МИФИ.

Волгодонский инженерно-технический институт как структурное подразделение НИЯУ МИФИ является уникальным для реализации проекта по созданию и функционированию Ресурсного центра. По мнению руководителя ВИТИ НИЯУ МИФИ профессора В.А. Руденко, уникальность Ресурсного центра состоит в том, что появилась возможность готовить конкретного специалиста на конкретную должность, учитывая все до мельчайших деталей. В январе 2018 года очередной этап реализации проекта «Ресурсный центр НИЯУ МИФИ в г. Волгодонске» подтвердил высокое качество образования: Волгодонский инженерно-технический институт встретил иностранных студентов из Томского политехнического университета, прибывших в Ресурсный центр НИЯУ МИФИ для прохождения практико-ориентированного обучения. Это будущие специалисты зарубежной атомной отрасли, представители таких стран, как Индия, Китай, Гана, Танзания, Нигерия. Основным языком общения иностранных студентов выступал английский язык. Всё обучение студентов в ходе прохождения практики осуществлялось именно на этом языке.

Программа пребывания зарубежных студентов в Ресурсном центре НИЯУ МИФИ наряду с практико-ориентированным обучением в обязательном порядке предполагает целый ряд мероприятий, направленных на культурное взаимодействие, которое в свете экспортоориентированной стратегии Госкорпорации «Росатом» приобретает особое значение. Чтобы добиваться эффективности делового общения с представителями разных национальностей, чтобы вести бизнес с зарубежными компаниями, необходимо знать культуру, традиции, законы общения этих людей, для этого проводятся различные мероприятия, в ходе которых как раз и происходит обмен особенностями национальных культур. Поскольку основным языком выступает английский, то в мероприятиях участвовали студенты ВИТИ, владеющие английским разговорным языком, и студенты, обучающиеся по двухгодичной дополнительной образовательной программе «Переводчик в сфере профессиональной коммуникации» первого и второго курсов. Такое достаточно длительное общение студентов ВИТИ с иностранцами (более месяца) происходило впервые, сам процесс общения вызвал большой интерес. В свободное от учебы время они помогали иностранным студентам приобщаться к русской культуре, проводили экскурсии по городам Волгодонск, Цимлянск и ст. Романовской, отмечали Масленицу, принимали участие в спортивных товарищеских матчах и многое другое.

В процессе перевода на английский язык у студентов возникали разные вопросы, им приходилось самостоятельно принимать спонтанные решения, так, например, посещая Музей истории донской народной культуры, ремесел и быта «Казачий курень», или участвуя в «Казачьих посиделках», где действие происходило в зале, стилизованном под казачий курень с имитацией русской печи, предметами старинного казачьего быта и накрытым столом с блюдами казачьей кухни, ребята столкнулись с проблемой перевода социокультурных реалий. Пришлось переводить и песни казачьи, и комментировать танцы, и даже мастер-класс по рукоделию и демонстрации навыков казачьей фланкировки. Все это требовало не только хороших знаний в английском языке, но и навыков кросскультурной компетенции, определенного уровня лингвокультурной компетенции, толерантности, гибкого стиля общения.

Чтобы проанализировать влияние языковой подготовки на социальную адаптацию студентов, на кафедре иностранных языков ВИТИ МИФИ была проведено анкетирование, основной целью которого стало изучение роли иностранного (английского) языка в процессе социальной адаптации. В задачу исследования входил сравнительный анализ характеристик социальной адаптивности студентов ВИТИ (два часа изучения английского языка в неделю в течение двух лет) и студентов, приоритетно изучающих английский язык, в дальнейшем «билингвов», (12 часов изучения английского языка в неделю в течение двух лет), в поликультуральных средах.

В анкетировании принимали участие всего 96 человек, из них 20 студентов дневного обучения первого курса, 52 студента второго курса ВИТИ (в дальнейшем первая группа) и 24 студента первого и второго курсов, обучающихся по дополнительной образовательной программе «Переводчик в сфере профессиональной коммуникации» (в дальнейшем вторая группа «переводчики»).

Рассмотрим роль иностранного (английского) языка в современном мире.

Сегодня информационный век сменил промышленный и сократил время и расстояния. Это трансформирующаяся мировая экономика от индустриального производства до осведомленности о товарах и услугах. Игнорируя географию и границы, информационная революция вновь дает определение нашему миру. Менее чем за 20 лет обработка информации, ограниченная печатным словом, проложила путь к компьютерам и к Интернету. Коммуникация посредством компьютера закрывает пробел между разговорным и письменным английским. Создается неформальный разговорный язык, более терпимый к разнообразию и индивидуальному стилю, в результате английский в Интернете заменяет влияние языковых институтов и практики [5].

Молодежь довольно чутко реагирует на изменения в экономической ситуации, и их интересы направлены в первую очередь на приобретение тех навыков, которые позволят в будущем повысить их социальный статус и уровень доходов. В процессе анализа подобного рода информации у студента формируется внутреннее убеждение в необходимости усиленного изучения английского языка, формируется языковая стратегия.

Рассмотрим готовность изучать английский язык студентами нашего университета. В первой группе обязательный период – два года – в соответствии с учебной программой, готовы изучать 25% студентов; такой же процент – 25% – хотели бы изучать язык весь период обучения (4-5 лет); 43% студентов готовы изучать язык более обязательного установленного периода, если потребуется для профессиональной деятельности, что говорит о формировании пролонгированной стратегии изучения английского языка; и лишь 7% студентов негативно относятся к изучению иностранного языка. Как видно, несмотря на то, что самосознание, ответственность, долг и другие социальные характеристики не у всех студентов находятся на должном уровне, и что студенты сегодня социализируются в среде своего статуса по устаревшей образовательной традиции – «не перегружаться», растет число студентов с более выраженной языковой стратегией. Это позволяет нам сделать вывод о высокой ценности иностранного языка для студентов технического вуза.

Во второй группе («переводчики») 37,5% студентов готовы изучать язык весь период обучения (4-5 лет); 62, 5% формируют пролонгированную стратегию в изучении языка, если потребуется для профессиональной деятельности.

Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о том, что у студентов-переводчиков внутренняя мотивация уже оформлена сознательно, в отличие от студентов первой группы, у которых стратегия пролонгированного обучения только

формируется [6].

Рассмотрим причины, побудившие студентов изучать иностранный язык. Популярность изучения английского языка признается обеими группами – 44,4% и 33,3%. Однако у студентов первой группы на первом месте стоит вероятность того, что язык может пригодиться в будущем – 61,1%. У студентов второй группы доминирует желание осуществлять профессиональную деятельность, сотрудничая с зарубежными фирмами – 75%, что показывает достаточно высокий уровень профессионального и социального самоопределения. И есть еще одна цифра – 38,9% студентов первой группы, которые вынуждены изучать язык, у студентов второй группы такие данные не выявлены.

Какие причины мешают студентам успешно осваивать иностранный язык в вузе?

Основная причина, на наш взгляд, достаточно объективная – отсутствие языковой практики за пределами аудитории, это отмечают обе группы – 66,7% и 54,2%, а вот недостаточный уровень довузовской подготовки – 44,4% и 20,8% – свидетельствует о занижении статуса иностранного языка при поступлении в технические вузы по сравнению с другими дисциплинами. Известно, что никакая, даже самая рациональная, методика обучения не сможет обеспечить достижения поставленных целей, если слишком мал срок обучения, если число недельных часов аудиторных занятий недостаточно, или учащиеся перегружены чрезмерно другими дисциплинами и не имеют времени на самостоятельные занятия по языку, если число учащихся в группе слишком велико и т.д.

Что же помогает совершенствовать языковую подготовку в вузе?

На первое место студенты ставят высокий уровень квалификации преподавателя – 73,6% в первой группе и 100% во второй, что свидетельствует о том, что более значимым становится профессиональный статус преподавателей. Изменяющиеся социокультурные условия в современном мире требуют постоянного пересмотра целей образования и роли педагогов. Появляются новые модели обучения, например, социально-когнитивные и социальные, в наибольшей степени заинтересованные во вкладе культурных и социальных факторов в обучение. Главной задачей педагогов, осознающих необходимость принимать во внимание культурные и социальные условия обучения, является подготовка обучаемых к социальным переменам.

О качестве преподавания иностранного языка в ВИТИ говорят такие цифры: 45,8% студентов первой группы оценивают качество преподавания на отлично и 44,4% – на хорошо. Группа «переводчиков» оценивает качество преподавания по высшей шкале – 79,2% и хорошо – 20,8%, что позволяет сделать вывод о высокой квалификации педагогического состава.

Пониманию важности иностранного языка в дальнейшей судьбе студентов соответствует 37,5% по общей выборке, а среди студентов-переводчиков это наибольший процент – 83%. Данный фактор, помогающий совершенствовать языковую подготовку, можно рассматривать как позитивную установку, но для того, чтобы перейти к практическим действиям, студентам необходимо иметь «канал» (по терминологии К. Левина), через который намерения совершить действие могли бы претвориться в реальное поведение. В данной ситуации «канальными факторами» выступает самостоятельная работа (22,2% и 33,3% соответственно) и работа в Интернете, (41,7 и 20,8%), позволяющие реально применить знания иностранного языка на практике. Возможности общения с иностранными специалистами создают для многих студентов ситуацию выбора, стимула индивидуального развития, некоторой конкуренции, что также объективно делает их активными субъектами всей вузовской жизни. На сегодняшний день слушать учебные лекции на английском языке готовы 34,7% студентов в первой группе, это значительный результат, свидетельствующий об

интенциях студентов к развитию и международному общению, учитывая то, что сами студенты оценивают свои знания весьма скромно – 36,1% – третий уровень из пяти в первой группе, у «переводчиков» доминирует четвертый уровень, что дает основания говорить о функциональном владении ими иностранным языком.

Как известно, студенты, владеющие иностранным языком функционально, уже сейчас имеют почти неограниченный доступ к информации, особенно, если речь идет о такой глобальной информационной сети как Интернет, в изобилии поставляющей сведения от потенциальных российских и зарубежных работодателей. Особое положение занимают системы обучения, в которых коммуникация на иностранном языке трактуется как профессиональная дисциплина. Таковы специальные языковые средние и высшие учебные заведения, а также разного рода курсы, готовящие преподавателей иностранных языков, переводчиков и работников смежных специальностей. Коммуникативные цели таких систем обучения могут быть либо остронаправленными (например, при подготовке переводчиков специальных технических текстов), либо весьма широкими (при подготовке преподавателей иностранных языков). Общим для всех этих систем является условие высокой степени совершенства в тех видах коммуникативной деятельности, которые избраны для освоения. Как показывает опрос, студенты ВИТИ готовы слушать лекции на английском языке по дисциплинам гуманитарного и социально-экономического блока – 20,8%, меньше всего оказалось желающих слушать лекции по общепрофессиональным дисциплинам – 4,9%, однако, в группе «переводчиков» студенты предпочитают именно этот блок – 50%; по специальным дисциплинам тоже значительный отрыв – 9,7% и 20,8% соответственно; по естественно-научным – 12,5% и 33,3%, но наибольший процент – 55,6% студентов выразили желание слушать лекции по иностранному языку, причем и в группе «переводчиков» это желание доминирует – 66,7%. Как видим, в процессе профессиональной социализации к языку проявляется все больший интерес, формируются собственные убеждения и стремления личности, т.е. мотивы становятся осознанными, формируются билингвальные предпочтения. Иностранный язык, экспонируется как дополнительный вспомогательный ресурс, способствующий карьерному росту, статусу и социальной мобильности.

Какое же место отводят студенты технического вуза знаниям иностранного языка в своей профессиональной карьере.

В обеих группах язык занимает значительное место – 19,4%, причем, он может иметь не определяющее значение – 56,9% и 12,5%, но студенты уже точно знают, что иностранный язык может способствовать их карьерному росту. Нетрудно заметить практически тотальную убежденность студентов в значимости иностранных языков для достижения социальных и индивидуальных целей.

Давайте посмотрим, каким конкретно целям студенты отдают предпочтения. Обе группы предпочитают язык повседневного общения – 70,8% и 83,3%; 27,8% и 25% изучают язык для овладения языком программ для ПК, 20,8% и 70,8% студентов язык необходим для чтения технических текстов, 41,7 и 8,3% предпочитают язык песенных жанров. Как видим, студенты имеют узконаправленные цели, это носители стратегии прагматического поведения, для них изучение иностранного языка в техническом вузе является чисто инструментальной ценностью – получить больше шансов для престижной профессиональной карьеры.

Однако есть значительный процент студентов – 18,0% и 33,3%, которые отдают предпочтения языку как универсалии культуры, литературы другой страны. Овладение языком эта группа студентов рассматривает как предпосылку, ключ к познанию страны изучаемого языка. Как справедливо замечено, «именно социокультурный контекст формирует ценности, вкусы, идеалы и установки личности. Для понимания личности

необходимо знать не только формулы естествознания, но и всю историю человеческой культуры» [7, 8]. Знание иностранного языка вызывает чувство уважения к культурным достижениям другого народа, осознание сопричастности к его проблемам и трудностям, стремлением к культурному сотрудничеству с зарубежными странами. Для студентов с профессиональной стратегией иностранный язык представляет собой скорее терминальную ценность, нежели инструментальную.

Говоря о роли иностранного языка в становлении будущего специалиста, следует уделить отдельное внимание его возможностям в развитии интеллекта. Научные исследования показали, что студенты, изучающие иностранный язык по углубленной программе, превосходят других по показателям, свидетельствующим о развитии интеллекта: уровню внимания, продуктивности запоминания, логичности мышления. В процессе изучения иностранного языка активизируются такие психические процессы, как внимание, память, мышление, речь, воображение, развивается интеллект. Ученые пришли к выводу, что студенты, углубленно изучающие язык, в значительно большей степени, чем другие студенты, склонны к абстрактному и аналитическому мышлению, у них более развиты воображение и интерес, они обладают более высоким творческим потенциалом и более быстрой обучаемостью [9].

Посмотрим, как студенты технического вуза используют язык в процессе научно-исследовательской деятельности. 51,4% респондентов первой группы не использовали иностранный язык в научно-исследовательской деятельности или таковой не занимались вообще (учитывая то, что респонденты – студенты первого и второго курсов, можно предполагать, что на этом этапе их вузовской деятельности научно-исследовательская работа может лишь только начинаться). В основном же студенты используют иностранный язык для составления рефератов, аннотаций на иностранном языке, что связано с современными требованиями к написанию дипломных работ.

В группе «переводчиков» результаты более впечатляющие: 25% участвуют в переводе технической документации, 12,5% – в конкурсе на лучший перевод, 33,3% – составляют реферат, аннотации, 20,8% участвуют в работе студенческих научных конференций.

Эти данные позволяют нам сделать следующие выводы. Студенты технического вуза уже на первом курсе имеют больше шансов добиться успеха в научно-исследовательской деятельности и в успеваемости, применяя знания иностранного языка в своей практической деятельности. Выделяется группа успешно занимающихся студентов в среде студенческой молодежи. Таким образом, иностранный язык, являясь стратифицирующим фактором, маркирует наиболее активных, грамотных и преуспевающих студентов.

Если на первых ступенях развития молодежного сознания (в подростковом возрасте) освоение теоретических и мировоззренческих проблем происходит через «пассивное» преимущественно словесное постижение знаний и опыта, то в последующем, все большее место и значение приобретает творческое сочетание накопления знаний с закреплением их и проверкой через практическую деятельность. Студенты технического вуза ВИТИ имеют возможность реализовать полученные знания на практике, защищая диплом на английском языке, пробовать свои силы в написании статей на международные студенческие конференции или участвовать во встречах с представителями других стран. Посмотрим, каким образом студенты позиционируют возможности активного использования знаний иностранного языка в вузе.

Не изъявил желания использовать иностранный язык на каких-либо мероприятиях в вузе основной массив респондентов первой группы – 45,8%. Это, на наш взгляд, напрямую коррелирует со скромным уровнем владения иностранным языком. Данная

ситуация порождает необходимость освоения дополнительных навыков, знаний и умений, которые студенты приобретают, посещая курсы референтов-переводчиков – 5,6% респондентов. Особого внимания заслуживают варианты ответов тех студентов, которые пишут статьи на международные студенческие конференции – 4,2% и участвуют во встречах с иностранными студентами из других стран – 11,1%. Мы можем предположить у них высокий уровень мотивации в изучении иностранного языка. Весьма очевидно, что иностранный язык занимает значительное место в планировании будущей деловой карьеры той части студенческой молодежи, которая выразила намерение защищать диплом на иностранном языке – 33,3%, что становится уже обычным делом в последние годы в ВИТИ и демонстрирует актуальность иноязычной компетенции для будущего профессионального становления в сознании студентов.

Но не только в стенах учебного заведения студенты общаются и получают информацию на английском языке. 70,8% в первой группе и 50% «переводчиков» активно работают за компьютером и в Интернете. Читать книги на английском предпочитают «переводчики» – 70,8%, также как и активно общаться с зарубежными студентами, обучающимися в ВИТИ НИЯУ МИФИ – 15,% и 29,2%. Не прочь побеседовать с друзьями и знакомыми – 41,7% и 25% опрошенных.

Обобщая вышесказанное, можно сделать следующие выводы. Возрастающий спрос на обучение иностранным языкам в технических вузах породил совершенно новое явление – организацию и открытие всевозможных лингвистических курсов, центров, отделений и факультетов в стенах этих учебных заведений. Главной целью обучения этих образовательных учреждений является иноязычная компетентность в сфере профессиональной коммуникации. В данном случае ценность иностранного языка заключается не в самой образованности, а в приобретении социального статуса для последующего успешного трудоустройства. Об этом говорят результаты опроса студентов группы «переводчики», которые, как правило, планируют защищать диплом на английском языке – 66,7% и с удовольствием участвуют во встречах с иностранцами – 29,2%. Для этой группы студентов владение иностранным языком приобретает ценностно-рациональную значимость, что по-новому создает образ иностранного языка, который начинает применяться в сфере специализированного труда для расширения профессионального кругозора. Будущие обладатели технического диплома позиционируют знание иностранного языка как возможность стать широкообразованным специалистом, завязать деловые контакты и предложить свои знания на внутренний и международный рынок труда. Как мы видим, высокий мотив в обучении иностранному языку влияет на высокие достижения в образовательном процессе.

Резюмируя вышеизложенное, можно сделать вывод, что владение иностранным языком влечет за собой различия в стремлениях, адаптивных стратегиях, шансах и возможностях как для последующего, так и настоящего социального и профессионального самоопределения студентов.

В связи с расширением межкультурного взаимодействия владение иностранным языком стало одним из необходимых условий диалога и обмена информацией различных групп людей. Присутствие иностранных студентов в Ресурсном центре ВИТИ НИЯУ МИФИ становится неотъемлемой частью современной системы образования в России, демонстрирует востребованность Ресурсного центра и ВИТИ, повышает их рейтинг, а также способствует включению России в международную образовательную систему.

Уровень образованности студентов включает, прежде всего, профессионализм и мастерство, являющиеся важнейшими факторами успешной социальной адаптации

[10]. Сегодня образованный инженер это не только «человек знающий», сколько подготовленный к жизни, ориентирующийся в сложных процессах современных преобразований, способный осмыслить свое место в мире, имеющий достаточно высокую степень адаптированности.

Владение иностранным языком обозначает новый этап в профессиональной социализации инженера ВИТИ МИФИ – выход на международные рынки труда, что способствует плюрализации инженерной профессии и ее современной трактовке в контексте международного сотрудничества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарова, Л.В. Сравнительный анализ установки на изучение английского языка и характеристика образовательной активности студентов [Текст] / Л.В. Захарова // Наука и образование. – 2004. – №4(12). – С. 161–165.
2. Система адаптации иностранных студентов – подход НГУ. – Режим доступа: URL: http://www.akvobr.ru/sistema_adaptatsii_inostrannih_studentov.html – 10.06.2018.
3. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/ – 10.06.2018.
4. В продолжение культурной программы [Электронный ресурс]: официальный сайт ВИТИ НИЯУ МИФИ. – Режим доступа: URL: <http://www.viti-mephi.ru/news/v-prodolzhenie-kulturnoy-programmy> – 10.06.2018.
5. Anne Pakir. Connecting with English in the Context of Internashionalisation. TESOL Quarterly, Vol. 33, №1, 1999.
6. Захарова, Л.В. Factors affecting on motivation in learning a foreign language = Факторы, влияющие на мотивацию в изучении иностранного языка [Текст] / Л.В. Захарова. Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. Vol. 7 Culture Science, Philosophy, Philology, Art History and Archeology. Research articles. Titusville, FL, USA = Научные исследования в современном мире: теоретические основы и инновационный подход : науч. ст. – Титусвайл, [2014]. – Т. 7.: Культурология, философия, филология, искусство, история и археология. – С. 158–159.
7. Волков, Ю.Г. и др. Социология в вопросах и ответах [Текст] / Ю.Г. Волков, И.В. Мостовая. – М., 1999. – 374 с.
8. Волков, Ю.Г. и др. Социология в вопросах и ответах [Текст] / Ю.Г. Волков, И.В. Мостовая. – М., 1999. – С. 203.
9. Юсев, Е.К. Личностная ориентация обучения как условие развития компетентности студентов технического университета (на материале ин. яз.) [Текст] / Е.К. Юсев : автореф. дисс. канд. пед. наук. – Ростов н/Д, 2001.
10. Павлюкова, Ю.В. и др. Особенности социально-педагогической адаптации иностранных студентов в вузе (на примере арабских студентов в центре предвузовской подготовки) [Текст] / Ю.В. Павлюкова, Е.А. Дрягалова // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №6.

REFERENCES

- [1] Zaharova L.V. Sravnitel'nyj analiz ustanovki na izuchenie anglijskogo yazyka i harakteristika obrazovatelnoj aktivnosti studentov [Comparative Analysis of English Study Attitudes and Characteristics of Student Educational Activity]. Nauka i obrazovanie.[Science and Education], 2004, №4(12), pp. 161–165. (in Russian)
- [2] Sistemaadaptaciiinostrannyhstudentov – podhod NGU [Adaptation System for Foreign Students – NSU Approach]. Available at: http://www.akvobr.ru/sistema_adaptatsii_inostrannih_studentov.html (in Russian)
- [3] Konceptiya dolgosrochnogo socialno-ehkonomicheskogo razvitiya Rossijskoj Federaciina period do 2020 goda [Concept of Long-Term Socio-Economic Development of the Russian Federation for the Period until 2020]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/ (in Russian)
- [4] V prodolzhenie kulturnoj programmy. Available at: <http://www.viti-mephi.ru/news/v-prodolzhenie-kulturnoy-programmy> (in Russian)
- [5] Anne Pakir. Connecting with English in the Context of Internashionalisation. TESOL Quarterly,

- Vol. 33, №1, 1999. (in English)
- [6] Zaharova L.V. Factors affecting on motivation in learning a foreign language = Faktory, vliyayushchie na motivaciyu v izuchenii inostrannogo yazyka Scientific enquiry in the contemporary world: theoretical basics and innovative approach. Vol. 7 Culture Science, Philosophy, Philology, Art History and Archeology. Research articles. Titusville, FL, USA = Nauchnye issledovaniya v sovremennom mire: teoreticheskie osnovy i innovacionnyj podhod : nauch. st. Titusville, [2014], Vol. 7: Kulturologiya, filosofiya, filologiya, iskusstvo, istoriya i arheologiya. – С. 158-159.
 - [7] Volkov Yu.G., Mostovaya I.V. Sociologiya v voprosah i otvetah [Sociology in Questions and Answers]. M. 1999, 374 p. (in Russian)
 - [8] Volkov Yu.G., Mostovaya I.V. Sociologiya v voprosah i otvetah [Sociology in Questions and Answers]. M. 1999, p. 203. (in Russian)
 - [9] Yusev E.K. Lichnostnaya orientaciya obucheniya kak uslovie razvitiya kompetentnosti studentov tekhnicheskogo universiteta (na materiale in. yaz.) [Personality Orientation of Training as a Condition of Technical University Students Competence Development (on the English Language Material)] Avtoreferat dis. nasoisk. uch. st.k.p.n. [Thesis Abstract of PhD in Education]. Rostov n/D, 2001. (in Russian)
 - [10] Pavlyukova Yu.V., Dryagalova E.A. Osobennosti social'no-pedagogicheskoy adaptacii inostrannykh studentov v vuze (na primere arabskikh studentov v centre predvuzovskoj podgotovki) [Peculiarities of Social and Pedagogical Adaptation of Foreign Students in the University (on the Example of Arab Students in the Pre-University Training Center)]. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. [Modern Problems of Science and Education], 2015, №6. (in Russian)

Social Adaptability Features of Technical University Students in Polycultural Environments (on the Example of Working with Foreign Students within the Work Practice in the Resource Center on the Basis of Rosatom Enterprises)

L.V. Zakharova*, L.A. Gunina, I.V. Zarochintseva***, Yu.A. Lupinogina******

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

* ORCID:0000-0003-1496-3935

WoS Researcher ID: M-3905-2018

e-mail: zakharova11@mail.ru;

** ORCID:0000-0002-5789-5816

WoS Researcher ID: M-3844-2018

e-mail: Gavrik3554@mail.ru;

*** ORCID:0000-0001-6412-8714

WoS Researcher ID: M-3835-2018

e-mail: michael.mus.2000@mail.ru;

**** ORCID:0000-0002-4327-1172

WoS Researcher ID: M-3826-2018

e-mail: matashonok@mail.ru

Abstract – The paper analyzes Language training influence on social adaptation of VETI NRNU MEPhI students, studies the role of English language in the course of social adaptation. It carries out the comparative analysis of social adaptability characteristics of VETI students and students learning English in priority during the communication with foreign students within the work practice in the NRNU MEPhI Resource center.

Keywords: social adaptation of students, language training, characteristics of social adaptability.

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

УДК 621.039.58 : 621.311.25

**КЫШТЫМСКАЯ РАДИАЦИОННАЯ АВАРИЯ 1957 ГОДА:
ПЕРВЫЕ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ
ПОСЛЕ ВЗРЫВА**

© 2018 В.С. Толстиков*, В.Н. Кузнецов**

** Челябинский государственный институт культуры, Челябинск, Россия*

*** Институт истории и археологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия*

В статье анализируются первые оценки радиационной аварии 1957 г., произошедшей в процессе производственной деятельности Государственного химического завода имени Д.И. Менделеева, вследствие которой возникло радиоактивное загрязнение территории Челябинской, Свердловской и Тюменской областей, получившее название «Восточно-Уральский радиационный след».

Ключевые слова: Государственный химический завод имени Д.И. Менделеева, химкомбинат «Маяк», радиационная авария, радиоактивное загрязнение, Восточно-Уральский радиационный след.

Поступила в редакцию: 26.05.2018

История реализации атомного проекта в СССР в первые годы XXI века, после рассекречивания ряда государственных архивных фондов, привлекла большое количество исследователей, как в России, так и за рубежом. На их основе созданы и опубликованы научные труды, а также публикации журналистов в средствах массовой информации. Несмотря на это, все эти исследования являются фрагментарными, носящими сенсационный и популистский характер, поэтому во многих из них выводы являются необъективными.

За более чем полувековую историю развития атомной энергетики в мире произошли такие крупные аварии как: в Англии на атомной станции «Уиндскейл», в США на атомной станции «Три-Майл-Айленд», в Советском Союзе в Чернобыле и в Японии атомной электростанции (АЭС) «Фукусима-1». Об одной из серьезнейших радиационных аварий, имевшей место на Южном Урале почти за 30 лет до Чернобыльской трагедии, на протяжении длительного времени мало что было известно. Эта авария произошла на Государственном химическом заводе (ГХЗ) имени Д.И. Менделеева (ныне – Производственное объединение (ПО) «Маяк») 29 сентября 1957 г.

В течение многих лет в Советском Союзе об этой аварии ничего не сообщалось. Фактически все сведения об аварии 1957 г. скрывались официальными властями от населения страны и от жителей Уральского региона, оказавшегося в зоне радиоактивного загрязнения. Однако скрыть полностью эту радиационную аварию оказалось практически невозможно. Прежде всего, из-за большой площади загрязнения радиоактивными веществами и вовлечения в сферу послеаварийных работ значительного числа людей, многие из которых разъехались потом по всей стране. Слухи об «атомном взрыве», «ядерной аварии», о «взрыве атомного реактора» вблизи

г. Кыштым Челябинской области разошлись далеко за ее пределы, в том числе и за границу.

Сегодня установлено, что западным аналитико-разведывательным службам факт аварии на Урале стал известен достаточно скоро, но сведения об этом инциденте были также скрыты от общественности, в первую очередь в США, под влиянием атомного лобби, не допускавшего дискредитирующего влияния потенциальных ядерных аварий на американскую программу атомных вооружений [1].

Впервые об аварии под Кыштымом сообщила 13 апреля 1958 г. копенгагенская газета «Берлингске Туденде». В публикации утверждалось, что произошла какая-то авария во время советских ядерных испытаний в марте 1958 г. и вызвала радиоактивные выпадения в СССР и близлежащих государствах.

Несколько позже в докладе Национальной лаборатории США, расположенной в Лос-Аламосе, появилось предположение, что в Советском Союзе якобы произошел ядерный взрыв во время больших военных учений. Строились и другие догадки, выдвигались различные версии.

Только в 1976 г., спустя почти 20 лет после аварии на Урале, Ж. Медведев, ученый-биолог, сделал первое краткое сообщение о ней в английском журнале «Нью-Сайентист» [2].

Эта публикация Ж. Медведева вызвала на Западе сенсационный резонанс. Первой реакцией читателей было неверие в возможность подобной аварии. Большинство западных экспертов заявило, что взрыв хранилища радиоактивных отходов невозможен, хотя при этом признавали, что после какого-то ядерного инцидента значительная часть территории Урала, действительно, стала загрязненной радионуклидами. Для объяснения причин всего этого снова выдвигались самые разные гипотезы и версии, отвергающие взрыв емкости-хранилища с радиоактивными отходами.

В 1979 г. в США вышла книга Ж. Медведева под названием «Ядерная катастрофа на Урале», в которой приводились некоторые подлинные факты, касающиеся аварии 1957 г. Но многие первоначальные оценки Ж. Медведева по целому ряду показателей были слишком устрашающими, далекими от истинного положения дел. Даже после появления уже откорректированной книги западные ученые не испытывали полного доверия к его информации.

Почему именно Ж. Медведеву в принципе удалось в какой-то мере расшифровать тайну Кыштымской аварии? Оказывается, до 1962 г. он работал в закрытой биофизической лаборатории Тимирязевской сельскохозяйственной академии, сотрудничая с академиком В.М. Ключковским, который, в свою очередь, с 1958 г. и до своей кончины в 1971 г. был научным руководителем Опытной научно-исследовательской станции ПО «Маяк». В 1962–1973 гг. Ж. Медведев проводил исследования по радиационной биологии в Институте медицинской радиологии Академии медицинских наук в г. Обнинске. От В.М. Ключковского он и узнал о «Кыштымской» аварии [3].

В 1980 г. появилась статья американских ученых из атомного центра Ок-Риджа, под названием «Анализ ядерной аварии в СССР в 1957–1958 гг. и ее причины». Ее авторы, известные специалисты-атомщики Д. Трабалка, Л. Эйман, С. Ауэрбах впервые после Ж. Медведева признавали, что в СССР имела место крупная радиационная авария, связанная с взрывом радиоактивных отходов. Причем в своих анализах они не скрывали, что первоначальные доказательства факта аварии получили из рассекреченной информации, хранящейся в анналах ЦРУ. Оценки американских ученых, хотя и были близки к реальным, но, тем не менее, до 1989 г. не носили характера полной доказанности [4].

В Советском Союзе факт взрыва на химкомбинате «Маяк» впервые подтвердили в июле 1989 г. на сессии Верховного Совета СССР. Затем были проведены слушания по этому вопросу на совместном заседании Комитета по экологии и Комитета по здравоохранению Верховного Совета СССР с докладом первого заместителя министра атомной энергетики и промышленности СССР Б.В. Никипелова [5].

30 июля 1989 г. Межведомственный совет по информации и связям с общественностью в области атомной энергии опубликовал специальный бюллетень «Об аварии на Южном Урале 29 сентября 1957 г.».

Основными источниками появившейся информации об аварии являлись ранее секретные материалы, такие как аналитический отчет «Изучение радиоэкологических, радиационно-гигиенических и социальнохозяйственных последствий массированного радиоактивного загрязнения больших площадей (1958–1984 гг.)», подготовленный специалистами ПО «Маяк» и челябинского филиала №4 Института биофизики (ФИБ-4), а также монография «Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана», тоже подготовленная коллективом ученых ФИБ-4.

В ноябре 1989 г. международная научная общественность была ознакомлена с данными о причинах, характеристиках, радиоэкологических последствиях этой аварии на симпозиуме Международного агентства по атомной энергии [6].

Таким образом, завеса секретности с радиационной аварии 1957 г. была снята. После этого на общественность обрушился буквально шквал информации об аварии, захлестнувший печать, радио и телевидение. Поток публикаций, сообщений продолжается и поныне как в нашей стране, так и за рубежом.

Радиационную аварию 1957 г. в средствах массовой информации называют не иначе, как «Кыштымская ядерная катастрофа», хотя к г. Кыштым она практически не имела непосредственного отношения.

В связи с тем, что все сведения о радиационной аварии на химкомбинате «Маяк» содержались долгое время в строгом секрете, это способствовало распространению массы различных слухов и домыслов, искажающих причины, масштабы и последствия ядерной катастрофы на Урале. Как в зарубежных, так и в отечественных средствах массовой информации, научных публикациях не раз сообщалось о гибели большого числа людей во время аварии.

Так, в «Книге рекордов Гиннеса» в специальном разделе «Наиболее тяжелые в мире аварии и катастрофы» об уральской трагедии сказано: «Авария с ядерными отходами: выброс плутониевых отходов. Кыштым, СССР, приблизительно декабрь 1957 г. Число погибших: много, но не раскрыто» [7]. Здесь немало неточностей, даже время аварии указано ошибочно, ее последствия преувеличены. Ж. Медведев неоднократно утверждал в своих публикациях, что по его расчетам во время «Кыштымской» аварии должны быть сотни погибших. Он при этом ссылаясь на свидетелей, которые якобы рассказывали о том, что видели больницы, заполненные «очень тяжелыми» пациентами, у которых сходила кожа [8].

Печать, радио, телевидение также тиражировали различные мифы и вымыслы об этой трагедии. Вот что, например, сообщалось в газете «Комсомольская правда»: «Самый глобальный ужас случился в 1957 г., когда рядом с Кыштымом рванул секретный завод по производству атомного оружия, погубив народу более чем Чернобыль» [9].

Изучение документальных материалов, многочисленные беседы с ликвидаторами последствий аварии, ветеранами химкомбината «Маяк» подтверждают тот факт, что, действительно, во время аварии и после нее не было смертельных случаев. Никто не погиб как во время аварии, так и после прохождения радиоактивного облака над

территорией Челябинской и Свердловской областей.

Чтобы получить определенное представление о степени изученности, поднятой в настоящей статье темы, необходимо сделать краткий историографический обзор основных исследований по данной проблематике.

К первой группе источников следует отнести работы, опубликованные в период до середины 1990-х гг. При отсутствии большей части рассекреченных документов на этом этапе данные публикации имели определенную ценность для исследователей истории атомной отрасли.

Следующую группу источников составляют научные исследования ученых, которые опубликовали свои результаты во второй половине 1990-х – начале 2000-х гг. среди тех, кто внес большой вклад в историографию атомной проблематики южно-уральские исследователи – ученые В.Н. Новоселов, В.С. Толстиков, О.Ю. Жарков. Свои исследования они сосредоточили в основном на технических, политико-экономических и экологических аспектах истории реализации советского атомного проекта в Челябинской области [10].

Особое место в историографии занимают труды доктора химических наук Л.П. Сохиной, как непосредственного участника исследований, связанных с последствиями радиационной аварии на ГХЗ [11].

Из анализа основных исследований по проблематике радиационного загрязнения отдельных территорий Урала и их последующей реабилитации необходимо отметить, что во многих из них достаточно подробно освещались вопросы, связанные с событиями 60-летней давности. В каждой из этих публикаций освещались отдельные аспекты техногенной аварии на Урале, и каждая из них внесла свой вклад в поиск причин ее возникновения и позволила ученым и производственникам искать пути предотвращения подобных катастроф в будущем.

Что же произошло в действительности на Южном Урале? 29 сентября 1957 г., в воскресный день, в 16 часов 22 минуты по местному времени на Государственном химическом заводе им. Менделеева (с 4.03.1966 г. химический комбинат «Маяк»)¹ взорвалась одна из емкостей, так называемая банка № 14 комплекса С-3, где хранились высокоактивные отходы. Взрыв полностью разрушил сварную емкость цилиндрической формы из нержавеющей стали, содержащую 70–80 т жидких радиоактивных отходов. Эта емкость находилась в отдельном бетонном каньоне диаметром 9 метров и глубиной 7,4 метра, толщина стен которого составляла около метра. Бетонная плита – перекрытие каньона весом в 160 т была сорвана взрывом и отброшена на 25 м [12].

В результате взрыва банка №14 была полностью разрушена и высокоактивные отходы производства – ацетатный декантат (продукт 204) – были выброшены наружу. Этим взрывом были сорваны также и смещены в стороны бетонные крышки с соседних банок-емкостей. При этом следует отметить, что даже находившиеся поблизости работники химкомбината не пострадали в момент взрыва. В тот день комплекс С-3 обслуживала дежурная бригада, в которую входили техник В.И. Комаров, аппаратчики М.А. Даранов и Д.И. Хорошев, машинист насосной станции по охлаждению комплекса В.М. Осетров и электромонтер Г.В. Кунакбаев. Эта смена началась как обычно в 13 часов 40 минут. Все пятеро хорошо запомнили момент взрыва [13].

¹ Завод № 817 с 24.11.1947 г. стал именоваться – Государственный химический комбинат Первого главного управления при Совете Министров СССР (Постановление СМ СССР № 3909-1327сс/оп от 24.11.1947 г.), с 18.02.1949 г. Государственный химический завод им. Менделеева Министерства химической промышленности СССР, с июля 1953 г. Государственный химический завод им. Менделеева, с 4.03.1966 г. химический комбинат «Маяк» (Приказ Министерства среднего машиностроения № 080 от 4.03.1966 г.).

Так, по воспоминаниям В.М. Осетрова, находясь у щита с приборами и почувствовав сильное содрогание земли, он услышал грохот, и его с дверьми вынесло наружу. М.А. Даранов и Г.В. Кунакбаев, находясь в душевой кабине после окончания смены, также сначала услышали хлопок, а затем звон разбитых стекол и увидели лежащие друг на друге ящики со спецодеждой. По свидетельству В.И. Комарова, после взрыва его подкинуло и бросило на пол. Поднявшись и выйдя улицу, он увидел, что на том месте, где возвышался холм комплекса С-3, стоял высокий столб пыли белого цвета, за которым ничего не было видно. На фоне 150-метровой заводской трубы он заметил летящую многотонную бетонную крышку, сорванную взрывом с емкости [14].

Во взорвавшейся емкости было 20 млн. юри радиоактивности, обусловленной стронцием-90, цезием-137, церием-144, цирконием-95, ниобием-95, рутением-106. Из хранившихся в 14-й емкости 2.0 млн. юри радиоактивности 10% было поднято в воздух на высоту до одного км. Остальная часть отходов, 18 млн. юри, выброшенных из емкости, осталась на промышленной площадке, т.е. на территории ГХЗ. Радиоактивное облако, состоящее из радиоактивной пыли и капель раствора покрыло многие промышленные объекты. В зону поражения попали реакторные заводы, новый строящийся радиохимический завод (объект 35), завод по производству радиоизотопов (объект 45), пожарная часть, военные городки и лагерь заключенных [15].

Очевидец событий, подполковник в отставке И.Ф. Серов, также вспоминал, что примерно около 16 час. 20 мин. раздался сильный взрыв. От взрыва вылетели стекла из всех окон казарм, обращенных к фронту ударной волны, были сорваны металлические ворота. Все военнослужащие в первый момент выбежали на улицу, некоторые, считая, что началась война, побежали в оружейный парк за оружием.

В это время в районе завода 25, там, где находилось хранилище радиоактивных отходов, поднялся огромный бурый столб пыли, который направлялся в сторону расположения полка. Военнослужащие выполняли распоряжения быстро и без паники.

Через несколько минут после того, как солдаты полка ушли в помещение, густое черно-серо-бурое облако нависло над их казармами. Выпадение радиоактивных веществ в первые часы было очень интенсивным. На землю, здания падали довольно крупные частицы в виде хлопьев [16].

При аварии подверглись облучению 1007 военнослужащих внутренних войск, из них 63 солдата получили облучение от 10 до 50 рентген. Они были поставлены на постоянное медицинское наблюдение, а 12 человек госпитализированы [17].

Приказом по МВД СССР от 19 октября 1957 г. всему личному составу полка, попавшему под радиоактивное загрязнение, объявили благодарность, 85 военнослужащих наградили медалью «За отличную службу по охране общественного порядка». Еще 58 чел. получили денежные выплаты от 100 до 400 руб. [18].

Что касается заключенных, то их выводили из лагеря, где радиационная обстановка была также очень сложной. Гамма-поле от буханки хлеба в столовой составляло 50 микрорентген в секунду, а загрязненность территории доходила до нескольких тысяч микрорентген в секунду. Заключенных эвакуировали пешим порядком. На выходе из зоны загрязнения установили две большие палатки. В одной палатке из шланга пожарной машины смывали радиоактивную пыль с заключенных, а в другой выдавали чистую одежду. После санобработки заключенных группами размещали в других исправительно-трудовых лагерях. В ликвидации последствий аварии потом никто из них, не принимал участия. Кроме военнослужащих, заключенных, радиоактивному загрязнению подвергались оружие, боеприпасы, транспортные средства и многое другое.

В момент взрыва в районе ГХЗ дул порывистый юго-западный ветер. Его скорость в приземном слое составляла 5 м/сек., на высоте 500 м – 10 м/сек. С этой

скоростью воздушные массы из района ГХЗ двигались в направлении поселка Багаряк и города Каменск-Уральский, пройдя расстояние до них за 3-4 часа.

Два млн. кюри радиоактивности, подхваченные сильным юго-западным ветром, разнесло по лесам, озерам, полям на площади более 20 тыс. км² Челябинской, Свердловской и Тюменской областей. Радиоактивное облако достигло района г.Тюмени через 6-8 часов после аварии. Полностью процесс формирования радиоактивного следа (без учета последующей миграции) закончился в течение 11 часов после взрыва [19].

По своим масштабам и последствиям радиационная авария 1957 г., приведшая к массированным выбросам радиоактивных веществ в атмосферу, оценивается специалистами как одна из крупнейших в мире. По современной международной классификации радиационных инцидентов и аварий она имеет индекс «шесть» по семибалльной шкале, и относится к тяжелым авариям [20].

В день аварии на ГХЗ по объективным причинам отсутствовали многие его руководители. Одни из них находились в командировках, другие – на отдыхе, будучи в отпуске. В отпуске находились главный инженер химкомбината Г.В. Мищенко, директор радиохимического завода, на котором произошел взрыв емкости А.Ф. Пашенко, главный механик предприятия Д.Д. Артамонов и другие руководители. Не оказалось в городе и директора ГХЗ М.А. Демьяновича. Вместе с начальником Строительного управления № 247² П.Т. Штефаном³ и начальником управления капитального строительства Ф.Н. Смоляром он находился в командировке в Москве.

Министр среднего машиностроения (МСМ) СССР Е.П. Славский первым в столице получил сообщение об аварии. По непроверенным данным, полученным с предприятия, в министерстве решили, что произошел атомный взрыв, о чем было доложено в правительство [21].

Е.П. Славский приказал М.А. Демьяновичу немедленно вылететь специальным самолетом на завод и возглавить работы по ликвидации последствий чрезвычайного происшествия.

В отсутствие директора работу по оценке последствий аварии возглавил заместитель главного инженера ГХЗ Н.А. Семенов, который вскоре был назначен главным инженером. По его указанию практически в течение часа после взрыва на промышленную площадку были вызваны все необходимые специалисты: дозиметристы, технологи, механики, представители охраны объекта.

Примерно к 22-00 вечера была выяснена общая картина. Наибольшие мощности дозы гамма-излучения отмечены в районе взрыва и далее спадающие по направлению образованного следа. С помощью дозиметрических приборов установили, что на расстоянии около 100 м от места взрыва мощность дозы гамма-излучения превышала 100 000 микрорентген в секунду, в то время как принятая норма по облучению равнялась 2,5 микрорентгенов секунду за 6 часов. На расстоянии 2,5-3 км от эпицентра взрыва мощность дозы колебалась от 1000 до 5000 микрорентген в секунду [22]. Загрязненными оказались многие производственные здания, а также паровозы, вагоны, автотранспорт, бетонные и железные дороги и многое другое. Основное «пятно» радиоактивного загрязнения пришлось на территорию ГХЗ, на которой выпало 18 млн. кюри радиоактивности.

Все участвующие в оценке радиационной обстановки имели индивидуальные

² С 20.11.1945 г. по 01.02.1946 г. – Предприятие п/я 40 НКВД СССР. (Постановление СМ СССР от 10.10.1945 г.); с 01.02.1946 г. по 18.02.1949 г. – Строительство 859 МВД СССР. (Приказ №111 от 10.10.46 г.); с. 18.02.1949 г. – Строительство 247 МВД СССР (протокол №73 заседания СК при СМ СССР от 18.02.1949 г.; Южноуральское Управление строительства. (Приказ №3/ОК от 04.01.1967 г.).

³ Штефан Петр Тихонович – начальник строительного управления № 247 с 1954–1958 гг.

дозиметры и были полностью переодеты в спецодежду. Действовали очень грамотно, профессионально. Вскоре были получены сведения о составе аварийного выброса, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Состав аварийного выброса [Composition of emergency emission]*

Радионуклид	Период полураспада	Вид излучения	Вклад в % в загрязнение
Стронций-89	51 сутки	Бета, гамма	следы
Стронций-90+Иттрий-90	28,6 года	Бета	5,4
Цирконий-95+Ниобий-95	65 суток	Бета, гамма	24,9
Рутений-106+Родий-106	1 год	Бета, гамма	3,7
Цезий-137	30 лет	Бета, гамма	0,036
Церий-144+Празеодим-144	285 суток	Бета, гамма	66
Празеодим-147	2,6 года	Бета, гамма	следы
Примечание: *Составлено по: Романов, Г.Н. и др. Радиационная обстановка после аварии [Текст] / Г.Н. Романов, А.С. Воронов // Природа. – 1990. – №5 – С. 50.			

Как видно из таблицы 1, наличие короткоживущих радионуклидов обусловило достаточно быстрое снижение уровней радиоактивного загрязнения территорий. Короткоживущие нуклиды практически распались по истечении первых пяти лет. Однако большой период полураспада стронция-90 (более 28 лет), а также иттрия-90, оказывал существенное влияние на формирование многолетних дозовых нагрузок. Но поскольку эти радионуклиды были представлены в виде азотнокислых соединений, то, как выяснили специалисты, вопросы их дезактивации решались довольно просто.

При проведении радиационной разведки среди производственного персонала ГХЗ случаев переоблучения допущено не было. Однако вскоре выяснилось, что военнослужащие войсковой части, поднятые по тревоге в зону оцепления, получили значительные дозовые нагрузки. Об этом было сообщено военному командованию. Позднее была пересмотрена документация о задачах «тревожных» групп и их действия стали увязываться с дозиметрической характеристикой объектов.

К утру 30 сентября 1957 г. В 5 утра на контрольно-пропускном пункте (КПП) промплощадки был установлен дозиметрический контроль. С целью исключения переноса радиоактивных веществ транспортом перевозка персонала была организована с пересадкой на КПП промышленной площадки.

Таким образом, выполнение заданий первоочередной государственной важности, обогащение оружейного плутония на ГХЗ им. Менделеева, сопровождались радиационными авариями и инцидентами. Созданное в кратчайшие сроки наукоемкое плутониевое производство, в тоже время было особо опасным производством, не прощало непрофессионализма, даже малейшей безответственности и элементарной недисциплинированности. Спешка, чрезмерное администрирование, жесткий режим секретности по обогащению оружейного плутония не способствовали тому, чтобы многие проблемы отрасли решались системно и комплексно [23].

Вместе с тем, в результате ликвидации последствий 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов, Г.Н. Кыштымская авария: секреты и мифы (западный анализ аварии 1957 г.) [Текст] / Г.Н. Романов // Вопросы радиационной безопасности. Научно-технический журнал ПО «Маяк». – 1997. – №3. – С. 65.
2. Medvedev Z.A. Two decades of dissidence. New Scientist, 1976, №1025, pp 264–267.
3. Романов, Г.Н. Кыштымская авария: секреты и мифы (западный анализ аварии 1957 г.) [Текст] / Г.Н. Романов // Вопросы радиационной безопасности. Научно-технический журнал ПО «Маяк». – 1997. – №3. –
4. Trabalka J.R., Eyman L.D., Auezbach S.I. Analysis of the 1957–1958 Soviet Nuclear Accident. Science, 1980, 209, №4454, pp. 345–353.
5. Никипелов, Б.В. и др. Радиационная авария на Южном Урале в 1957 г. [Текст] / Б.В. Никипелов, Г.Н. Романов, Л.А. Булдаков и др. // Атомная энергия. – 1989. – Т. 67. – Выпуск 2. – С. 74–80.
6. Proceedings of IAEA symposium «Recovezy Oprations in the Nukleaz Accident and Radiological Emergehey». Vena IAEA, 1990.
7. Guinness Book of World Records, Bantan Books Ed., 1987.
8. Медведев, Ж.А. До и после трагедии. Размышления о причинах и последствиях Кыштымской аварии хранилища ядерных отходов в сентябре 1957 года [Текст] / Ж.А. Медведев // Энергия. – 1991. – №4. – С. 105.
9. Комсомольская правда, 1997, 8 июня.
10. Новоселов, В.Н. и др. Атомный след на Урале [Текст] / В.Н. Новоселов, В.С. Толстиков. – Челябинск, 1997.
11. Сохина, Л.П. О безопасности не думали [Текст] / Л.П. Сохина // Охрана природы Южного Урала: областной экологический альманах 2008: спец. выпуск, посвященный 60-летию образования ФГУП «ПО «Маяк». – Челябинск, 2008. – С. 66–67.
12. Никипелов, Б.В. и др. Взрыв на Южном Урале [Текст] / Б.В. Никипелов, Е.Г. Дрожко // Природа. – 1990. – №5. – С. 48–49.
13. ГФ НТД ПО «Маяк». Ф. 11. Оп. 13. Д. 11. Л. 11–12.
14. Толстиков, В.С. Социально-экологические последствия развития атомной промышленности на Урале. (1945–1998) [Текст] / В.С. Толстиков. – Челябинск, 1998. – С. 162.
15. ГФ НТД ПО «Маяк». Ф. 1. Оп. 28. Д. 7. Л. 8.
16. Сохина, Л.П. Мои воспоминания о работе на химическом комбинате «Маяк» [Текст] / Л.П. Сохина. – Челябинск-65, 1993. – С. 110–111.
17. ГФ НТД ПО «Маяк». Ф. 1. Оп. 17. Д. 15. Л. 32.
18. Военно-исторический журнал. – 1993. – №12. – С. 42.
19. ГФ НТД ПО «Маяк». Ф. 11. Оп. 13. Д. 11. Л. 9.
20. Романов, Г.Н. Уроки длиною в 40 лет [Текст] / Г.Н. Романов // Озерский вестник. – 1997. – 27 сентября.
21. Брохович, Б.В. О современниках. I часть (воспоминания) [Текст] / Б.В. Брохович. – Озерск, 1998. – С. 61.
22. ГФ НТД ПО «Маяк». Ф. 11. Оп. 13. Д. 11. Л. 17.
23. Толстиков, В.С. и др. Ядерное наследие на Урале: исторические оценки и документы [Текст] / В.С. Толстиков, В.Н. Кузнецов. – Екатеринбург, 2017. – С. 335–336.

REFERENCES

- [1] Romanov G.N. Kyshtymskaja avarija: sekrety i mify (zapadnyj analiz avarii 1957 g.) [Kyshtym Accident: Secrets and Myths (Western Analysis of the Accident in 1957)]. Voprosy radiacionnoj bezopasnosti. Nauchno-tehnicheskij zhurnal PO «Majak» [Radiation Safety Issues. Scientific and Technical Journal "Mayak"], 1997, №3, p. 65. (in Russian)
- [2] Medvedev Z.A. Two decades of dissidence. New Scientist, 1976, №1025, pp 264–267. (in English)
- [3] Romanov G.N. Kyshtymskaja avarija: sekrety i mify (zapadnyj analiz avarii 1957 g.) [Kyshtym Accident: Secrets and Myths (Western Analysis of the Accident in 1957)]. Voprosy radiacionnoj bezopasnosti. Nauchno-tehnicheskij zhurnal PO «Majak» [Radiation Safety Issues. Scientific and Technical Journal "Mayak"], 1997, №3, p. 66. (in Russian)
- [4] Trabalka J.R., Eyman L.D., Auezbach S.I. Analysis of the 1957–1958 Soviet Nuclear Accident. Science, 1980, 209, №4454, pp. 345–353. (in English)
- [5] Nikipelov B.V., Romanov G.N., Buldakov L.A. etc. Radiacionnaja avarija na Juzhnom Urale v 1957 g. [Radiation Accident in the Southern Urals in 1957]. Atomnaja energija [Atomic Energy], 1989, Vol. 67, Issue 2, pp. 74–80. (in Russian)
- [6] Proceedings of IAEA symposium «Recovezy Oprations in the Nukleaz Accident and Radiological

- Emergehey». Vena IAEA, 1990. (in English)
- [7] Guinness Book of World Records, Bantan Books Ed., 1987. (in English)
- [8] Medvedev Zh.A. Do i posle tragedii. Razmyshleniya o prichinah i posledstviyah Kyshtymskoj avarii hranilishha jadernyh othodov v sentjabre 1957 goda [Before and after the Tragedy. Reflections on the Causes and Consequences of the Kyshtym Nuclear Waste Storage Accident in September 1957]. Energia [Energy], 1991, №4, p. 105. (in Russian)
- [9] Komsomolskaya Pravda, 1997, June 8th. (in Russian)
- [10] Novoselov V.N., Tolstikov V.S. Atomnyj sled na Urale [Atomic Trace in the Urals]. Chelyabinsk, 1997. (in Russian)
- [11] Sokhina L.P. O bezopasnosti ne dumali [Do not Think about Safety]. Ohrana prirody Juzhnogo Urala: oblastnoj ekologicheskij almanah 2008: spec. vypusk, posvjashhennyj 60-letiju obrazovaniya FGUP «PO «Majak» [Nature Protection of the Southern Urals: Regional Ecological Almanac 2008: special. issue dedicated to the 60th anniversary of FSUE "PO Mayak"]. Chelyabinsk, 2008, pp. 66–67. (in Russian)
- [12] Nikipelov B.V., Drozhko E.G. Vzryv na Juzhnom Urale [Explosion in the Southern Urals]. Priroda [Nature], 1990, №5, pp. 48–49. (in Russian)
- [13] GF NTD PO "Mayak" [GF STD PO Mayak]. Fond [Fond] 11. Opis [Inventory] 13. Delo [Issue] 11. List [Page] 11–12. (in Russian)
- [14] Tolstikov V.S. Socialno-ekologicheskie posledstviya razvitiya atomnoj promyshlennosti na Urale. (1945–1998) [Social and environmental consequences of the nuclear industry development in the Urals. (1945–1998)]. Chelyabinsk, 1998, pp.162. (in Russian)
- [15] GF NTD PO "Mayak" [GF STD PO Mayak]. Fond [Fond] 1. Opis [Inventory] 28. Delo [Issue] 7. List [Page] 8. (in Russian)
- [16] Sokhina L.P. Moi vospominaniya o rabote na himicheskom kombinatе «Majak» [My memories of working at the chemical plant "Mayak"]. Chelyabinsk-65, 1993. pp. 110–111. (in Russian)
- [17] GF NTD PO "Mayak" [GF STD PO Mayak]. Fond [Fond] 1. Opis [Inventory] 17. Delo [Issue] 15. List [Page] 32. (in Russian)
- [18] Voenno-istoricheskij zhurnal [Military history journal], 1993, №12, p. 42. (in Russian)
- [19] GF NTD PO "Mayak" [GF STD PO Mayak]. Fond [Fond] 11. Opis [Inventory] 13. Delo [Issue] 11. List [Page] 9. (in Russian)
- [20] Romanov G.N. Uroki dlinoju v 40 let [Lessons of 40 Years]. Ozerskiy Vestnik [Ozersk Messenger], 1997, September 27th. (in Russian)
- [21] Brokhovich B.V. O sovremennikah. I chast (vospominaniya) [About Contemporaries. I Part (Memories)]. Ozersk, 1998, p. 61. (in Russian)
- [22] GF NTD PO "Mayak" [GF STD PO Mayak]. Fond [Fond] 11. Opis [Inventory] 13. Delo [Issue] 11. List [Page] 17. (in Russian)
- [23] Tolstikov V.S., Kuznetsov V.N. Jadernoe nasledie na Urale: istoricheskie ocenki i dokumenty [Nuclear Heritage in the Urals: Historical Estimates and Documents]. Ekaterinburg, 2017, pp. 335–336. (in Russian)

Kyshtym Radiation Accident of 1957: the First Assessment of the Radiation Situation after the Explosion

V.S. Tolstikov*, V.N. Kuznetsov**

** Chelyabinsk state Institute of culture,
Ordzhonikidze St., 36-a, Chelyabinsk, Russia, 454091
e-mail: info@chgaki.ru*

***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, Russia 620990
e-mail: iia-history@mail.ru*

Abstract – The article analyzes the first estimates of the radiation accident in 1957 which occurred in the process of production activities of the state chemical plant named after D.I. Mendeleev, as a result of which there was a radioactive contamination of the territory of Chelyabinsk, Sverdlovsk and Tyumen regions which was called "East Ural Radiation Trace".

Keywords: D.I. Mendeleev state chemical plant, Mayak chemical plant, radiation accident, radioactive contamination, East Ural radiation trace.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Агъекум Эфраим Бонах (Гана)	66
Алалем Исса	7
Алюшин М.В.	91
Аникеев А.В.	74
Баран С.А.	56
Баранов М.Е.	26
Беляев К.И.	74
Бурдаков С.М.	47
Гарибов Р.Б.	36
Гунина Л.А.	98
Данейкин Ю.	66
Елохин А.П.	7
Зарочинцева И.В.	98
Захарова Л.В.	98
Идакво Ако Пол	18
Колобашкина Л.В.	91
Краснокутский В.В.	56
Ксенофонтов А.И.	7
Кузнецов В.Н.	107
Лапкис А.А.	82
Лупиногина Ю.А.	98
Наугольников В.А.	47
Нечитайлов В.В.	56
Никифоров В.Н.	82
Овчинников И.Г.	36
Первушин Л.А.	82
Пимшин И.Ю.	47
Пимшин Ю.И.	47
Писарева Д.А.	74
Проскуряков К.Н.	74
Толстиков В.С.	107
Федорченко С.Н.	7

AUTHOR INDEX OF VOL. 2, 2018

Agyekum Ephraim Bonah (Ghana)	66
Alalem E.A.	7
Alyushin M.V.	91
Anikeev A.V.	74
Baran S.A.	56
Baranov M.E.	26
Belyaev K.I.	74
Burdakov S.M.	47
Daneykin Yu.	66
Elokhin A.P.	7
Fedorchenko S.N.	7
Garibov R.B.	36
Gunina L.A.	98
Idakwo Ako Paul	18
Kolobashkina L.V.	91
Krasnokutskij V.V.	56
Ksenofontov A.I.	7
Kuznetsov V.N.	107
Lapkis A.A.	82
Lupinogina Yu.A.	98
Naugolnov V.A.	47
Nechitajlov V.V.	56
Nikiforov V.N.	82
Ovchinnikov I.G.	36
Pervushin L.A.	82
Pimshin I.Yu.	47
Pimshin Yu.I.	47
Pisareva D.A.	74
Proskuryakov K.N.	74
Tolstikov V.S.	107
Zakharova L.V.	98
Zarochintseva I.V.	98

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 (10–25 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

Editors who make final decisions about manuscripts must have no personal, professional, or financial interest/involvement in any of the issues they might judge. Other members of the editorial staff, if they participate in editorial decisions, must provide editors with a current description of their financial interests (as they might relate to editorial judgment) and recuse themselves from any decisions in which a conflict of interest exists.

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

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

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

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

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

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

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

THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH:

For journals:

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

Indicate article DOI if it in the presence.

For books:

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

For web-resources:

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

For foreign references:

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

For materials of conferences:

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

For materials of conferences (foreign references):

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

All documents should be sent to the journal postal address:

347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94

Editorial office of "Global Nuclear Safety" journal

E-mail: oni-viti@mephi.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

2) Комплект должен содержать экспертное заключение о возможности опубликования.

3) К статье прилагаются:

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

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

– название статьи и инициалы авторов на русском и английском языке;

– аннотация на русском и английском языках;

– индекс УДК;

– ключевые слова на русском и английском языках.

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

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

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

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

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

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

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

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

6) Литература приводится в порядке упоминания в конце статьи. В тексте должны быть ссылки в квадратных скобках только на опубликованные материалы. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала и сопровождаются, в случае перевода на русский язык, с указанием на перевод.

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

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

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

7) Этика публикаций.

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

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

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

- б) подготовке текста статьи или внесении принципиальных изменений;
- в) окончательном утверждении версии, которая сдается в печать.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

E-mail: oni-viti@mephi.ru

Тел.: 8(8639)222717.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2018, 2(27)

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

Сдано в набор 15.06.2018 г.

Компьютерная верстка Вишнева М.М.

Подписано к печати 22.06.2018 г.

Бумага «SvetoCory» 80 г/м². Объем 14,88 усл.печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ(ф) НИЯУ МИФИ