

ISSN 2305-414X

2017, 2

**GLOBAL
NUCLEAR
SAFETY**



**ГЛОБАЛЬНАЯ
ЯДЕРНАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

<http://gns.mephi.ru>

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2017, 2(23)

Founded in November, 2011

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

Quarterly

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial Staff:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Y.I. Pimshin (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),

Y.P. Mukha (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),

V.V. Krivin (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),

V.I. Ratushny (Doctor of Physics and Mathematics, Professor (*Russia*)),

Y.S. Sysoev (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),

A.V. Palamarchuk (PhD (Technical sciences), *Russia*),

V.E. Shukshunov (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),

V.P. Povarov (PhD (Physics and Mathematics), *Russia*),

S.M. Burdakov (PhD (Technical sciences), associate professor (*Russia*)),

I.A. Bublikova (PhD (Technical sciences), associate professor (*Russia*)),

A.V. Zhuk (PhD (History), associate professor (*Russia*))

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address:

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia

Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia

telephone: (8639)222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru

Press address:

Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia.

Moscow

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2017, 2(23)

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

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

Главный редактор:

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

Редакционная коллегия:

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

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

Москва

CONTENTS

2017, 2(23)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

Results of Long-Term Biological Monitoring in the Tsimlyansk Reservoir in the Cooling Pond Purge of Rostov NPP <i>O.I. Gorskaya, S.V. Yakovlev, L.A. Cheresheva, V.M. Sapelnikov</i>	7
Peculiarities of Underlying Surface Pollution by Radioactive Gas-aerosol Impurity after its Passage over Extensional Water Areas <i>A.P. Elokhin, M.V. Zhilina</i>	21

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

The Static Parameters of the Comparators and the Charge-Sensitive Amplifiers of the MH2XA010 Structured Array at Gamma Emission Influence <i>O.V. Dvornikov, V.L. Dyatlov, N.N. Prokopenko, V.A. Chekhovskii, I.V. Pakhomov, A.V. Bugakova</i>	38
Monitoring of the Nuclear Engineering Large Size Products <i>Yu.I. Pimshin, G.A. Naumenko, L.V. Postoy, S.M. Burdakov</i>	47
Study of Mass Transfer in Welding Tub <i>V.F. Cubarew</i>	56
Metrological Estimates For Structural and Analytical Design of Complex Measurement Systems <i>Y.P. Mucha, O.A. Avdeuk, I.Y. Koroleva, A.D. Korolev</i>	62

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Organization of Automatic Load Gripping Device Designing for Fallen Cartridge Lifting in the PWR 1000 Reactor <i>P.D. Kravchenko, D.N. Fedorenko, V.Yu. Ryabenko</i>	71
Prospects of Nanoliquid Use in Heat Withdrawal Systems in the Beyond Design Basis Accidents Accompanied with Fissile Area Melting <i>A.L. Sirotkina, E.D. Fedorovich, V.V. Sergeev</i>	81
Causes of Vibroacoustic Resonances in Severe Accidents at Nuclear Power Plants <i>K.N. Proskuryakov, A.I. Fedorov, M.V. Zaporozhets</i>	89

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

Stress Resistance Increase Due to the Skills of Self-control and Self-regulation Development on the Basis of Remote Non-contact Recording Person Bioparameters Technology <i>M.V. Alyushin, L.V. Kolobashkina, A.M. Alyushin, I.A. Morozov</i>	96
Safety Culture as an Integrated Element in Forming Professional Competencies of NPP Workers <i>V.A. Rudenko, Y.A. Evdoshkina, A.V. Zheleznyakova, A.V. Zhuk</i>	104

Author Index of vol. 2, 2017.....	111
-----------------------------------	-----

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2017

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Результаты многолетнего биологического мониторинга в Цимлянском водохранилище в районе продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС
О.И. Горская, С.В. Яковлев, Л.А. Черешнева, В.М. Сапельников.....7
- Особенности загрязнения подстилающей поверхности радиоактивной газоаэрозольной примесью после её прохождения над обширными акваториями
А.П. Елохин, М.В. Жилина.....21

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

- Статические параметры компараторов и зарядочувствительных усилителей базового структурного кристалла МН2ХА010 при воздействии гамма-излучения
О.В. Дворников, В.Л. Дятлов, Н.Н. Прокопенко, В.А. Чеховский, И.В. Пахомов, А.В. Бугакова.....38
- Контроль больших размеров изделий атомного машиностроения
Ю.И. Пимишин, Г.А. Науменко, Л.В. Постой, С.М. Бурдаков.....47
- Исследование массопереноса в сварочной ванне
В.Ф. Кубарев.....56
- Метрологические оценки при структурно-аналитическом проектировании сложных систем измерений
Ю.П. Муха, О.А. Авдеюк, И.Ю. Королева, А.Д. Королев.....62

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Организация процесса проектирования автоматических грузозахватных устройств для подъёма упавших кассет в реакторе типа ВВЭР 1000
П.Д. Кравченко, Д.Н. Федоренко, В.Ю. Рябенко.....71
- Перспективы использования наножидкостей в системах отвода тепла в запроектных авариях, сопровождаемых плавлением активной зоны
А.Л. Сироткина, Е.Д. Федорович, В.В. Сергеев.....81

Причины возникновения виброакустических резонансов при тяжелых авариях на АЭС

К.Н. Проскуряков, А.И. Фёдоров, М.В. Запорожец 89

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

Повышение стрессоустойчивости за счет развития навыков самоконтроля и саморегуляции на основе дистанционных неконтактных технологий регистрации биопараметров человека

М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина, А.М. Алюшин, И.А. Морозов 96

Культура безопасности как интегральный элемент в формировании профессиональных компетенций работников АЭС

В.А. Руденко, Ю.А. Евдошкина, А.В. Железнякова, А.В. Жук 104

Авторский указатель номера 2, 2017 111

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 574.52; 631.9; 639.2

**РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНЕГО БИОЛОГИЧЕСКОГО
МОНИТОРИНГА В ЦИМЛЯНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ
В РАЙОНЕ ПРОДУВКИ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ
РОСТОВСКОЙ АЭС**

© 2017 О.И. Горская*, С.В. Яковлев**, Л.А. Черешнева**, В.М. Сапельников***

* Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция», Волгодонск,
Ростовская обл., Россия

** Волгоградское отделение Государственного научно-исследовательского института
озерного и речного рыбного хозяйства им. Л.С. Берга, Волгоград, Россия

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

Ежегодные работы по биологическому мониторингу в Цимлянском водохранилище в районе продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС проводятся уже восьмой год в период продувки (апрель, май), а также до начала и после окончания (март, июнь). Объект исследования – основные биоценозы (фитопланктон, зоопланктон, зообентос) и состав воды Цимлянского водохранилища на акватории, прилегающей к Ростовской АЭС.

Ключевые слова: Цимлянское водохранилище, Ростовская АЭС, продувка водоема-охладителя, биоценозы, состав воды.

Поступила в редакцию: 06.05.2017

Для уменьшения солесодержания в воде водоема-охладителя предусмотрена его дополнительная продувка, которая заключается в частичной замене объема водоема путем сброса воды в Приплотинный плес и закачке свежей воды из того же плеса насосной станцией. Кроме того, продувка позволяет сократить время подтопления прилегающей территории, когда уровень воды в водоеме-охладителе, в результате приема паводка из Цимлянского водохранилища, поднимается выше нормального подпорного уровня. Актуальность этого обострилась из-за фактического изменения проекта режима вводов энергоблоков.

Данные, полученные в результате проведения работ по биологическому мониторингу в Цимлянском водохранилище в районе продувки водоема-охладителя и по оценке эффективности рыбозащитных устройств при проведении продувки водоема-охладителя, позволяют оценить степень влияния данных работ на состояние биоты и качества воды прилегающей акватории Приплотинного плеса.

На акватории Цимлянского водохранилища работа проводилась на трех профилях по направлению открытой зоны водохранилища, на каждом из которых расположены точки на расстоянии 300 м, 1,5...2,0 км и 3,0 км (рис. 1.). Вдоль линии левого берега Цимлянского водохранилища ниже дамбы на расстоянии 150...200 м от берега через указанные промежутки также были выбраны точки отбора гидрохимических и гидробиологических проб. У восточной оконечности охладителя в 200 м от берега была определена точка отбора проб.

Общее количество точек отбора проб поверхностных вод – 10. Отбор проб проводился ежемесячно в период продувки водоема-охладителя (2 отбора проб на всех

станциях), а также однократно до и после завершения продувки по разреженной сети станций (всего 10 проб).

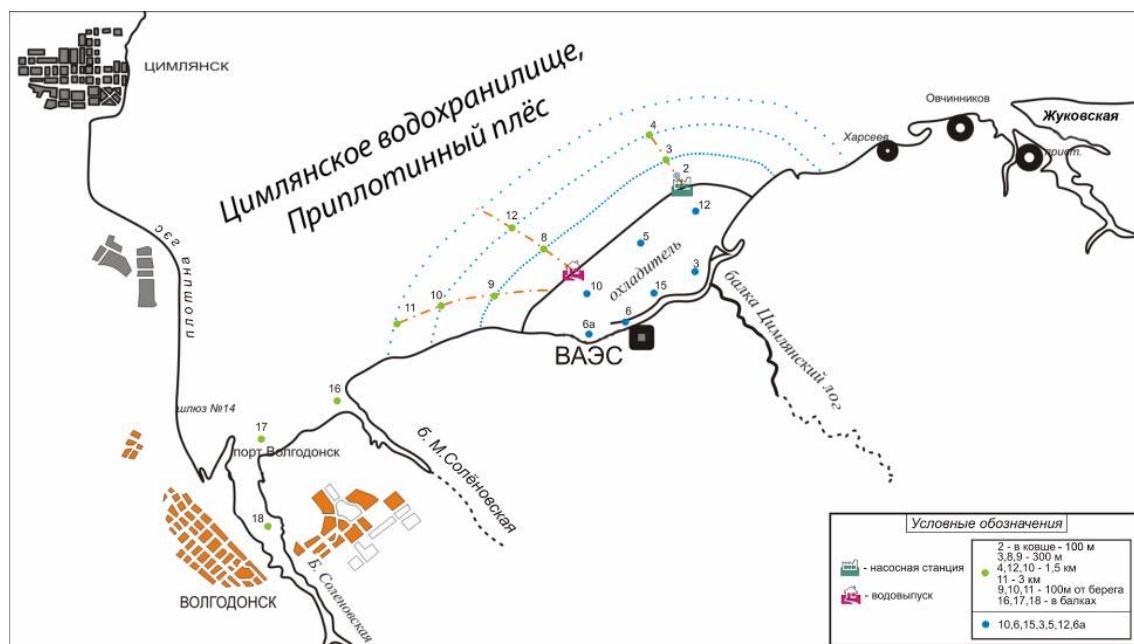


Рис. 1. – Схема отбора гидрохимических и гидробиологических проб по мониторингу Приплотинного плеса в районе дамбы Ростовской АЭС

Перечень контролируемых параметров и показателей качества поверхностных вод был составлен с учетом гидрохимических особенностей исследуемой акватории. В число контролируемых гидрохимических показателей входят:

– азот аммонийный;	– медь;
– азот нитратный;	– натрий;
– азот нитритный;	– нефтепродукты;
– БПК ₅ ;	– перманганатная окисляемость;
– водородный показатель (рН);	– растворенный кислород;
– гидрокарбонат ион;	– сульфат-ион;
– железо общее;	– сухой остаток;
– жесткость;	– фосфаты;
– кальций;	– фториды;
– магний;	– хлорид-ион;
– марганец;	– ХПК.

Отбор проб фитопланктона, зоопланктона и зообентоса производился с той же периодичностью и в тех же точках, что и отбор проб поверхностной воды. В качестве основных характеристик для перечисленных выше групп гидробионтов являлись структурные показатели: количество видов, численность, биомасса и другие биоценоотические характеристики.

Цимлянское водохранилище отличается низким уровнем водообмена (0,9 в год) и на многие его гидрохимические и гидробиологические параметры влияет уровенный режим, особенно в весенний период (рис. 2).

Продувочные воды, поступающие из водоема-охладителя в Приплотинный плес Цимлянского водохранилища, могут оказывать локальное и ограниченное во времени незначительное негативное воздействие за счет минеральных взвешенных частиц и эвтрофирующее влияние за счет увеличения количества органических веществ и биогенов.

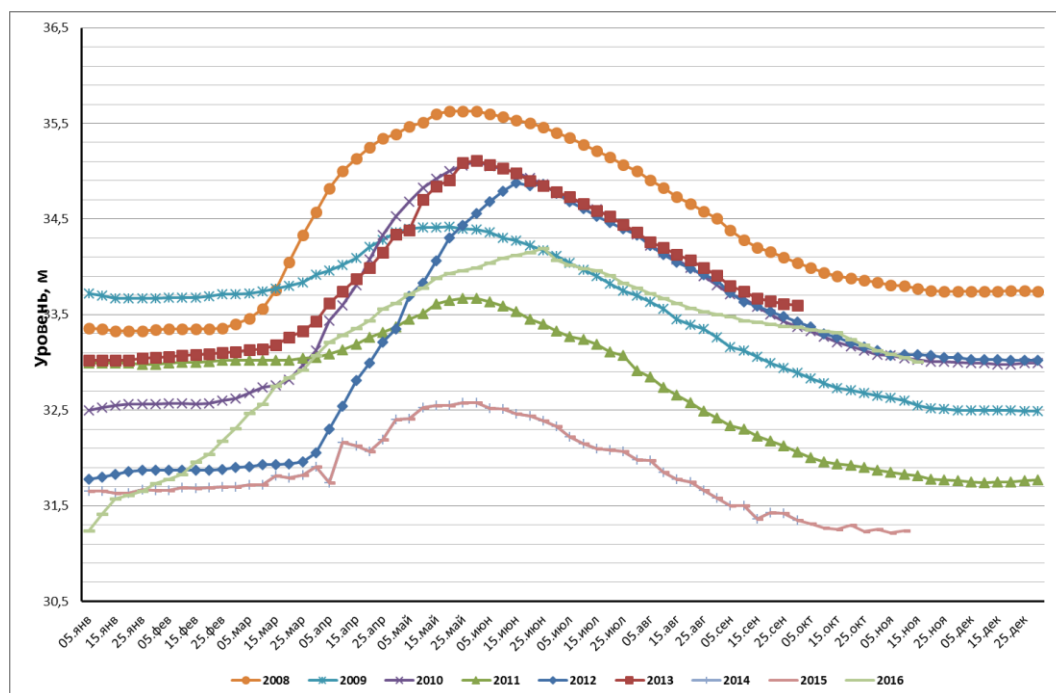


Рис. 2. – Уровенный режим Цимлянского водохранилища в 2008–2016 гг.

Для определения такого влияния по различным ингредиентам химического состава воды и определения других гидрологических факторов был проведен корреляционный анализ зависимостей концентрации отдельных химических показателей от трех факторов:

- удаленности контрольной точки отбора проб от места сброса продувочных вод из водоема-охладителя, м;
- удаленности контрольной точки отбора проб от береговой линии, м;
- глубины водоема в точке отбора проб, м.

Результаты анализа представлены в таблице 1.

В таблице максимальные значения коэффициентов парной корреляции выделены жирным шрифтом, а значения, превышающие величину 0,5 – подчеркиванием.

Анализ полученных результатов показывает, что максимальное количество связей гидрохимических параметров с удаленностью от места сброса наблюдается в марте и июле, т.е. в то время, когда сброса воды из водоема-охладителя не происходило. В тоже время, высокие значения коэффициентов корреляции по другим гидрологическим факторам – глубине, удаленности от берега, особенно в периоды без сброса воды из пруда-охладителя, показывают всю сложность процессов формирования химического состава воды на данном участке и значительное влияние естественных причин в виде волновых и ветровых течений, а также других факторов.

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа химических показателей воды в Приплотинном плесе Цимлянского водохранилища

№ п/п	Наименование ингредиента	ед. изм.	Ср. знач.	Станд. Откл.	Корр. с 1	Корр. с 2	Корр. с 3	Ср. знач.	Станд. Откл.	Корр. с 1	Корр. с 2	Корр. с 3
		Месяц	Март					Апрель				
1	Водородный показатель (pH)	ед.pH	8,165	0,024	0,254	-0,185	<u>-0,472</u>	8,368	0,095	-0,616	0,196	0,135
2	Растворенный кислород	мгО ₂ /дм ³	11,1325	0,067	-0,182	0,007	0,334	9,809	0,155	-0,073	0,497	0,742
3	ХПК	мг/дм ³	24,85	2,437	-0,879	0,110	-0,552	36,2667	2,676	-0,588	-0,512	-0,244
4	БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	1,4175	0,101	<u>-0,434</u>	0,058	0,014	1,423	0,164	-0,183	<u>0,387</u>	0,250
5	Взвешенные вещества	мг/дм ³	5,5	0,529	<u>0,470</u>	0,372	0,213	6,64	2,557	-0,545	<u>0,424</u>	<u>0,371</u>
6	Сухой остаток	мг/дм ³	543,5	1,291	-0,226	-0,238	0,039	541,444	3,745	-0,080	<u>-0,391</u>	-0,132
7	Сульфат-ион	мг/дм ³	103,625	3,540	-0,316	-0,083	0,230	103,867	3,310	-0,284	-0,324	0,305
8	Хлорид-ион	мг/дм ³	81,45	2,517	0,641	-0,078	0,232	80,1111	4,358	0,010	-0,045	-0,177
9	Железо (общее)	мг/дм ³	0,11	0,008	0,574	-0,418	0,200	0,092	0,008	0,188	0,134	0,065
10	Аммоний-ион (N)	мг/дм ³	0,2035	0,030	-0,133	-0,111	0,347	0,15844	0,031	<u>-0,438</u>	0,166	0,213
11	Нитрат-ион (N)	мг/дм ³	0,2575	0,119	-0,617	-0,117	0,168	0,37889	0,112	0,109	0,048	<u>0,338</u>
12	Нитрит-ион (N)	мг/дм ³	<0,02					<0,02				
13	Фосфат-ион	мг/дм ³	0,04425	0,024	-0,220	<u>-0,434</u>	<u>0,408</u>	0,03744	0,015	-0,556	0,202	0,207
14	Сульфиды	мг/дм ³	<0,002					<0,002				
15	Медь	мг/дм ³	0,00265	0,001	-0,302	-0,371	-0,117	0,00248	0,000	-0,071	-0,587	<u>-0,343</u>
16	Цинк	мг/дм ³	<0,0025					<0,0025				
17	Нефтепродукты	мг/дм ³	<0,03					<0,03				

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Наименование ингредиента	ед. изм.	Ср. знач.	Станд. Откл.	Корр. с 1	Корр. с 2	Корр. с 3	Ср. знач.	Станд. Откл.	Корр. с 1	Корр. с 2	Корр. с 3
		Месяц	Май					Июнь				
1	Водородный показатель (рН)	ед.рН	8,306	0,070	-0,501	0,750	0,498	8,03625	0,156	-0,779	<u>0,303</u>	0,080
2	Растворенный кислород	мгО ₂ /дм ³	10,5729	0,190	-0,819	0,039	-0,159	7,092	0,098	-0,873	0,679	0,088
3	ХПК	мг/дм ³	28,3	4,502	-0,181	0,740	<u>0,408</u>	27,525	2,529	<u>0,389</u>	-0,710	-0,136
4	БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	1,34444	0,086	-0,263	0,201	0,271	1,3725	0,120	-0,839	-0,168	-0,067
5	Взвешенные вещества	мг/дм ³	6,5	2,242	-0,251	0,508	0,504	4,125	1,372	-0,157	<u>0,295</u>	<u>0,498</u>
6	Сухой остаток	мг/дм ³	461,333	5,315	-0,214	<u>0,481</u>	-0,184	465,143	7,904	<u>0,280</u>	-0,162	-0,036
7	Сульфат-ион	мг/дм ³	91,1889	4,935	-0,140	<u>0,441</u>	-0,106	100,243	2,980	0,078	-0,194	0,561
8	Хлорид-ион	мг/дм ³	57,6667	2,993	-0,033	<u>0,315</u>	0,184	62	3,202	-0,201	-0,663	-0,646
9	Железо (общее)	мг/дм ³	0,093	0,007	<u>0,384</u>	0,004	0,123	0,09375	0,005	-0,147	<u>-0,421</u>	-0,637
10	Аммоний-ион (N)	мг/дм ³	0,15289	0,036	<u>-0,447</u>	-0,068	-0,260	0,16757	0,063	<u>-0,395</u>	-0,107	<u>0,446</u>
11	Нитрат-ион (N)	мг/дм ³	0,44522	0,145	<u>-0,365</u>	<u>0,488</u>	<u>0,455</u>	0,47443	0,183	<u>-0,299</u>	-0,035	0,221
12	Нитрит-ион (N)	мг/дм ³	< 0,020					<0,02				
13	Фосфат-ион	мг/дм ³	<0,016					<0,002				
14	Сульфиды	мг/дм ³	<0,002					<0,002				
15	Медь	мг/дм ³	0,00216	0,000	-0,532	<u>0,434</u>	<u>0,407</u>	0,00233	0,000	<u>-0,434</u>	-0,107	<u>0,435</u>
16	Цинк	мг/дм ³	<0,0025					<0,0025				
17	Нефтепродукты	мг/дм ³	<0,03					<0,03				

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Наименование ингредиента	ед. изм.	Ср. знач.	Станд. Откл.	Корр. с 1	Корр. с 2	Корр. с 3	Ср. знач.	Станд. Откл.	Корр. с 1	Корр. с 2	Корр. с 3
		Месяц	Июль					Август				
1	Водородный показатель (рН)	ед.рН	8,314	0,132	0,640	-0,394	<u>0,012</u>	8,206	0,028	0,753	-0,235	<u>0,406</u>
2	Растворенный кислород	мгО ₂ /дм ³	7,45	0,151	-0,432	-0,289	0,173	7,53	0,098	<u>-0,427</u>	0,517	0,653
3	ХПК	мг/дм ³	29,2	2,794	<u>-0,062</u>	0,677	-0,026	27,94	3,139	-0,179	-0,552	-0,785
4	БПК ₅	мгО ₂ /дм ³	1,53375	0,068	<u>0,461</u>	-0,338	<u>0,314</u>	1,49875	0,061	<u>-0,393</u>	<u>-0,301</u>	<u>0,335</u>
5	Взвешенные вещества	мг/дм ³	5,1875	1,551	<u>0,041</u>	-0,021	0,447	5,6	1,955	<u>-0,311</u>	0,112	0,284
6	Сухой остаток	мг/дм ³	413,25	9,468	0,038	-0,253	-0,073	458,375	11,904	0,015	-0,193	-0,221
7	Сульфат-ион	мг/дм ³	97,55	4,514	-0,559	0,083	-0,307	95,4	6,253	0,213	-0,153	-0,292
8	Хлорид-ион	мг/дм ³	65,7	1,991	-0,574	-0,414	<u>-0,517</u>	62,8875	2,194	-0,177	-0,734	<u>-0,399</u>
9	Железо (общее)	мг/дм ³	0,10375	0,005	-0,368	<u>-0,544</u>	<u>0,137</u>	0,10125	0,006	-0,613	<u>0,411</u>	<u>-0,420</u>
10	Аммоний-ион (N)	мг/дм ³	0,3005	0,208	<u>-0,613</u>	0,267	<u>0,064</u>	0,20888	0,092	<u>-0,417</u>	-0,147	<u>0,473</u>
11	Нитрат-ион (N)	мг/дм ³	0,14463	0,018	-0,445	-0,424	0,011	0,28813	0,106	-0,298	0,254	<u>0,365</u>
12	Нитрит-ион (N)	мг/дм ³	0,031	0,015	0,527	0,090	<u>0,981</u>	0,02588	0,005	-0,228	-0,018	0,534
13	Фосфат-ион	мг/дм ³	0,057	0,042	1,000	-1,000	-1,000	0,0508	0,021	<u>0,501</u>	-0,055	<u>-0,460</u>
14	Сульфиды	мг/дм ³	<0,002					<0,002				
15	Медь	мг/дм ³	0,00184	0,000	-0,484	<u>0,406</u>	-0,098	0,00201	0,000	0,056	-0,292	-0,267
16	Цинк	мг/дм ³	<0,0025					<0,0025				
17	Нефтепродукты	мг/дм ³	<0,03					<0,03				

Планктонная флора, в отличие от других компонентов биоты, как известно, является наиболее тонким индикатором, реагирующим на изменение среды. В годы исследований (2010-2016 гг.) было отмечено слабое эвтрофицирующее воздействие продувочных вод, поступающих из водоема-охладителя АЭС. Это влияние проявлялось в незначительном изменении видового спектра фитопланктона с наличием сапробионтов на локальных участках плеса только в период продувки, ближе к водовыпуску и береговой зоне приплотинного участка. Оно же оказывало воздействие на зоны, удаленные в открытую часть плеса и ниже водовыпуска на 1,5...2,0 км.

В зоне проведения гидробиологического мониторинга было зарегистрировано 65 видов планктонной флоры. В ее составе более разнообразно представлены: диатомовые 19, зеленые 18 и синезеленые 17 видов. Гораздо меньшее число видов насчитывалось в других группах: эвгленовых – 5, динофитовых – 4, криптофитовых – 2. По периодам наблюдений видовой спектр фитопланктоценоза изменялся. Во время продувки, в апреле и мае, в фитопланктоне присутствовали почти идентичные виды с примерно одинаковым числом видов – 20-25 (табл. 2).

Таблица 2 – Видовой спектр фитопланктона в районе дамбы Ростовской АЭС

Группы водорослей	Апрель	Май	Июль
Синезеленые	-	2	17
Диатомовые	14	12	19
Зеленые	7	6	18
Криптофитовые	2	2	2
Эвгленовые	3	2	5
Динофитовые	-	1	4
Всего:	26	25	65

Анализ качественного разнообразия планктонной флоры в зоне непосредственного предполагаемого воздействия (в зоне водовыпуска, станции В4, В5, в прибрежном потоке станции В7, В8) и на удаленных участках в открытой части исследуемого района показал значительную его общность (табл. 3).

Таблица 3 – Виды планктонной флоры, постоянно встречающиеся в пробах по станциям наблюдений в районе дамбы Ростовской АЭС

Станции наблюдений	Апрель	Май	Июль
1	2	3	4
Профиль против водовыпуска			
В4, 300 м	Cryptomonas erosa, Aulacoseira granulata, Navicula cryptocephala	Scenedesmus quadricauda, Aulacoseira granulata, Trachelomonas volvocina	Aulacoseira granulata, Microcystis aeruginosa
В5, 1,5 км	Navicula cryptocephala, Trachelomonas volvocina, Scenedesmus quadricauda	Единичные экземпляры водорослей	Aulacoseira granulata, Aphanizomenon flos-aquae, Oscillatoria agardii
Профиль левобережья у западной оконечности дамбы			
В7, 300 м	Cryptomonas erosa, Navicula cryptocephala, Trachelomonas volvocina	Aulacoseira granulata, Navicula cryptocephala, Cryptomonas erosa	Aphanizomenon flos-aquae, Aulacoseira granulata, Oscillatoria agardii
В8, 1,5 км	Navicula cryptocephala, Trachelomonas volvocina, Scenedesmus quadricauda	Trachelomonas volvocina, Cryptomonas erosa	Aulacoseira granulata, Oscillatoria agardii, Microcystis aeruginosa

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
Профиль против насосной станции (удаленный участок)			
B1, 300 м	<i>Navicula cryptocephala</i> , <i>Trachelomonas volvocina</i>	<i>Scenedesmus quadricauda</i> , <i>Trachelomonas volvocina</i>	<i>Aulacoseira granulata</i> , <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>
B2, 1,5 км	<i>Navicula cryptocephala</i> , <i>Scenedesmus quadricauda</i> , <i>Cryptomonas erosa</i>	<i>Navicula cryptocephala</i> , <i>Cryptomonas erosa</i>	<i>Aulacoseira granulata</i> , <i>Oscillatoria agardii</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i>

Результаты анализа качественного состава фитопланктона в зоне водовыпуска и на удаленных участках исследуемой зоны свидетельствуют о том, что продувочные воды не влияют на формирование видового состава фитоплактоценоза и подчиняются закономерным сезонным изменениям, характерным для высокоэвтрофных водоемов.

Данные количественных изменений состава фитопланктона по месяцам отображены на рисунке 3.

Проведенный корреляционный анализ биомассы и численности фитопланктона в различных контрольных точках отбора проб от гидрологических факторов: близости к месту сброса воды из водоема-охладителя, близости к береговой зоне, глубине в точке отбора пробы, показал отсутствие непосредственного влияния сбрасываемых вод на структурно-функциональные показатели фитопланктона (таблица 4).

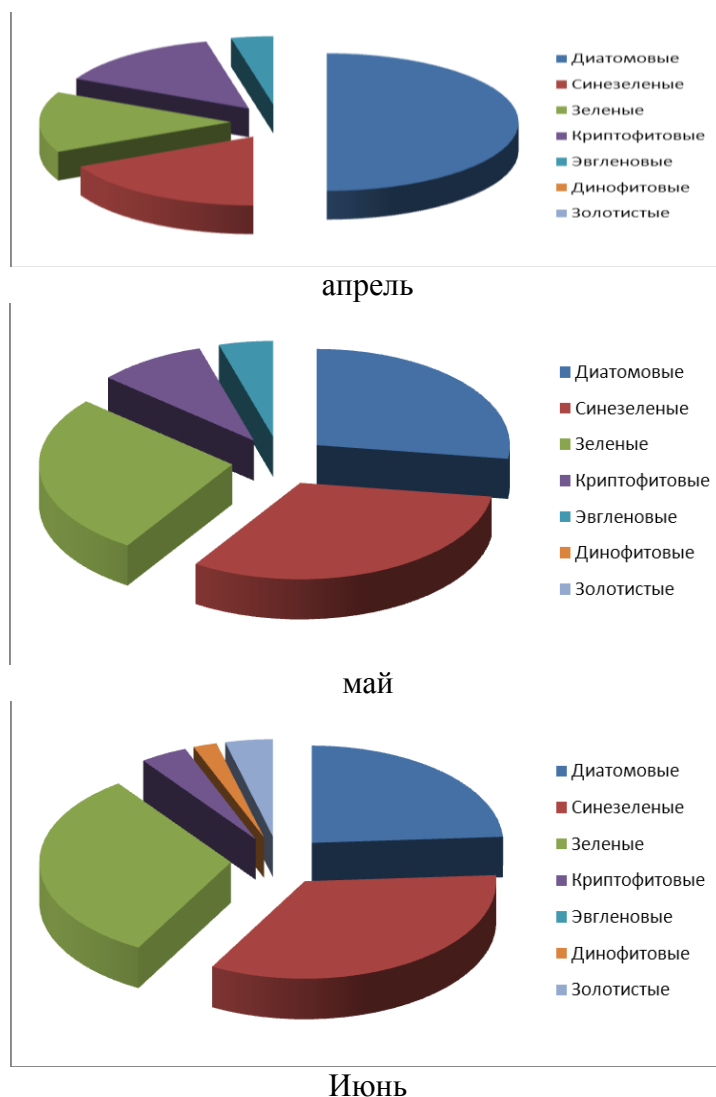


Рис. 3. – Сезонное изменение видового состава фитопланктона

Таблица 4 – Корреляционная зависимость структурно-функциональных показателей фитопланктона в Приплотинном плесе в зоне влияния продувочных вод от близости к месту водосброса и гидрологических факторов

Станции наблюдений	Апрель		Май		Июль	
	N*	B**	N*	B**	N*	B**
Ср. знач.	11,900	1,175	10,300	0,334	6,900	10,472
Станд. откл.	2,514	0,697	2,406	0,151	2,283	12,544
Корр. с 1	0,237	-0,442	0,069	0,290	-0,095	-0,146
Корр. с 2	-0,045	0,229	<u>-0,602</u>	0,135	<u>0,046</u>	<u>0,714</u>
Корр. с 3	-0,045	0,229	<u>-0,602</u>	0,135	<u>0,046</u>	<u>0,714</u>

Примечание: N* – численность, тыс. экз./м³, B** – биомасса, мг/м³

Исследование зоопланктона на акватории, прилегающей к дамбе АЭС, осуществляли с марта по июнь. В видовом составе сообщества встречено 21 форма зоопланктона. Из них коловраток - 9, ветвистоусых - 5, веслоногих ракообразных - 7.

В марте зоопланктонные организмы отсутствовали.

В апреле зоопланктоценоз представлен коловраточно-копеподным комплексом. По численности преобладали коловратки – до 30 тыс.экз./м³, по биомассе веслоногие ракообразные – до 187 мг/м³ (табл. 5).

Ветвистоусые были представлены гораздо меньшими количествами. В марте-апреле велигеры моллюсков не встречались.

Таблица 5 – Динамика численности и биомассы отдельных групп зоопланктона на акватории Приплотинного плеса, сопряженной с дамбой Ростовской АЭС

Месяц	Коловратки		Кладоцеры		Копеподы		Велигеры моллюсков		Весь зоопланктон	
	N*	B**	N	B	N	B	N	B	N	B
Март	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Апрель	30,70	12,05	0,00	0,05	26,51	187,83	0	0	57,22	199,94
Май	5,48	24,16	8,56	788,71	3,81	72,05	1,70	22,16	19,56	1027,08
Июнь	11,21	58,53	0,52	193,20	2,05	37,66	1,30	16,89	15,08	306,27
В среднем за период наблюдений	11,84	23,685	2,27	245,49	8,09	74,39	0,75	9,76	22,97	383,32

Примечание. N* - численность, тыс.экз./м³; B** - биомасса, мг/м³.

Доминирующими видами в апреле являлись: из коловраток – *Keratella quadrata*, из веслоногих – науплиальные и копеподитные стадии развития ракообразных, а также *Cyclops* sp.

В июне, по численности и биомассе ведущее положение занимали ветвистоусые ракообразные, до 9 тыс.экз/м³ и 788 мг/м³, соответственно. Веслоногие и коловратки развивались в меньших количествах. В составе сообщества присутствовали велигеры моллюсков, до 2 тыс.экз/м³ по численности и до 22 мг/м³ по биомассе. В пробах чаще всего встречались: из коловраток – *Euchlanis deflexa*, *Brachyonus diversicornis*, *Keratella quadrata*, из ветвистоусых - *Podonevadne trigona*, *Bosmina longirostris*, из веслоногих –

науплиальные и копеподитные стадии развития ракообразных, а также *Heteroscore caspia*.

Анализ материала по интенсивности развития зоопланктона в период продувки и после нее свидетельствует о том, что во время продувки на всех исследуемых профилях биомасса была невысокой. После продувки на отдельных участках профилей биомасса увеличилась в несколько раз, по сравнению с продувочным периодом.

Видовой состав зоопланктона во все исследуемые периоды оставался идентичным для этих же периодов в предшествующие годы.

Проведенный корреляционный анализ биомассы и численности зоопланктона в различных контрольных точках отбора проб от гидрологических факторов: 1) близости к месту сброса воды из водоема-охладителя, м; 2) близости к береговой зоне, м; 3) глубине в точке отбора пробы, м; показал присутствие небольшого непосредственного влияния сбрасываемых вод на структурно-функциональные показатели фитопланктона в период осуществления продувки (табл. 6). В июне, после окончания сброса такая зависимость полностью отсутствует, и показатели зоопланктона зависят в основном от глубины в точке отбора проб.

Таблица 6 – Корреляционная зависимость структурно-функциональных показателей зоопланктона в Приплотинном плесе в зоне влияния продувочных вод от близости к месту водосброса и гидрологических факторов

Станции наблюдений	Апрель		Май		Июнь		В среднем за сезон	
	N	B	N	B	N	B	N	B
Ср. знач.	18,419	0,099	20,353	107,255	86,967	1865,37	41,231	657,57
Станд. Откл.	11,178	0,092	13,472	76,448	44,810	1123,49	20,262	390,57
Корр. с 1	-0,383	-0,531	-0,574	-0,619	-0,414	-0,535	-0,491	-0,553
Корр. с 2	-0,362	-0,428	0,014	-0,078	-0,630	-0,673	-0,580	-0,650
Корр. с 3	-0,582	-0,396	-0,106	-0,183	-0,794	-0,717	-0,747	-0,699

Таким образом, продувочные воды не оказали существенного влияния на структурно-функциональные характеристики зоопланктоценоза, и сроки ее проведения не нарушали общих закономерностей развития сообщества в исследуемой экосистеме.

В период исследований в наблюдаемых бентоценозах было встречено 32 таксономические единицы донных беспозвоночных, в т.ч. олигохет – 6 видов, личинок хирономид – 6, высших ракообразных – 8, полихет – 2, моллюсков – 6, прочие – 4 (ручейники и пиявки). С наибольшим представительством в группе ракообразных. Более 60% всех бентонтов относилось к типичным пелофильным животным, т.к. доминирующие илистые грунты определяли фаунистический состав бентоценоза района мониторинга.

Исследования зообентоса показали, что число регистрируемых видов на отдельных станциях колебалось от 4 до 17 форм (в среднем 9). Наибольшее разнообразие донных животных закономерно было встречено на илисто-песчаном грунте (17 видов на станции 300 м ниже водовыпуска дамбы АЭС в 100 м от берега на

глубине 4 м). Наименьшее число бентонтов закономерно регистрировалось на глинисто-илистом грунте от 4 (на станции в 1,5 км от водовыпуска на глубине 3,8м) до 10 (на входе в Мокросолоновскую балку на глубине 2 м) – в среднем 7. На илистых грунтах на глубине 4-5 м фиксировалось от 6 до 14 таксонов (в среднем 9,5).

Ядро массовых видов (с встречаемостью 33-78%) составили 12 бентонтов: *Pterocuma pectinata*, *Pterocuma sowinskyi* – из высших ракообразных, *Potamothenix moldaviensis*, *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Potamothenix hammoniensis*, *Limnodrilus claparedeanus*, *Hypaniola kowalewskii* – из червей, *Cryptochironomus defectus*, *Chironomus plumosus* – из личинок хирономид, *Dreissena polymorpha*, *Viviparus viviparus* – из моллюсков, *Herpobdella octoculata* – из группы прочие, которые являются массовыми формами и для всего Цимлянского водохранилища. За счёт них в Цимлянском водохранилище на протяжении многих лет донные кормовые ресурсы находятся на достаточно высоком уровне.

В исследуемой акватории наиболее существенный вклад в количественные показатели суммарного бентоса на большинстве станций наблюдений вносили *Potamothenix moldaviensis*, *Limnodrilus claparedeanus*, *Hypaniola kowalewskii*, *Chironomus plumosus*, *Pterocuma pectinata*, *Pterocuma sowinskyi*, *Dreissena polymorpha* и *Viviparus viviparus*. На отдельных мониторинговых участках высокие показатели определялись интенсивным развитием видов с встречаемостью 11...22 % – *Dikerogammarus haemobaphes*, *Gammarus* (*Chaetogammarus*) *behningi*, *Hypania invalida* и *Hypanis* (*Monodacna*) *colorata*. Вышеуказанное свидетельствует об идентичности доминирующих видов, и о том, что влияние сброса вод из водоема-охладителя АЭС на качественные характеристики наблюдаемых бентоценозов не проявилось.

В весенний период интенсивность развития макрозообентоса в районе исследований характеризовалась средними показателями суммарной численности 6255,11 экз./м² и биомассы 854,79 г/м², в том числе, «мягкого» бентоса 5245,57 экз./м² и 19,837 г/м² (табл. 7).

Колебания показателей по станциям были в интервале величин для общего бентоса 480...21200 экз./м² и 1,544...1827,56 г/м², для «мягкого» – 400...14480 экз./м² и 0,444...17,24 г/м². Основу бентоса формировали моллюски (24,9 % численности и 98,0 % биомассы), мягкотелые вносили существенный вклад только в суммарные показатели численности – черви (45,85 %), личинки хирономид (17,2 %) и ракообразные (11,3 %). Их доля в суммарной биомассе была незначительна – не более 2 %, в том числе, 1,3 % за счет червей и личинок хирономид и 0,5 % – ракообразных. Лидирование в «мягком» бентосе весной червей и личинок хирономид в бентосе характерно для Цимлянского водохранилища. По многолетним наблюдениям данные группы животных могут составлять 90 % общей численности (до 17468 экз./м²) и 30 % биомассы (до 34,597 г/м²) бентоса.

В многолетнем аспекте анализ полученных при расчете данных за период 2010-2016 гг. показал, что функциональное состояние донного сообщества в исследуемом районе Цимлянского водохранилища характеризовалось средними показателями общего бентоса 7911,8 экз./м² и 485,6 г/м², в том числе, «мягкого» бентоса 6033,3 экз./м² и 10,329 г/м², которые формировали моллюски (23,5 % численности и 97,5 % биомассы) и олигохеты (58 % и 1,5 %, соответственно). Развитие макрозообентоса в текущем году по своим количественным показателям входило в пределы их годовых колебаний – для общего бентоса 4917...11422 экз./м², 216,96...707,31 г/м², в том числе, для «мягкого» 4255...8346 экз./м² и 6,13...13,71 г/м², что свидетельствует о достаточной стабильности бентоценозов на исследуемом участке.

Таблица 7 – Средние значения численности и биомассы зообентоса в апреле, мае и июне

Группы организмов	Апрель		Май		Июнь	
	экз./м ²	г/м ²	экз./м ²	г/м ²	экз./м ²	г/м ²
Олигохеты	1467,9	6,932	604,3	3,991	1625,5	8,666
Полихеты	3633,1	12,784	3184,9	3,326	5492,3	12,473
Хирономиды	36,0	0,275	10,2	0,018	35,8	0,222
Ракообразные	585,2	1,270	45,3	0,148	478,0	1,080
Моллюски	1117,6	924,291	594,1	433,683	1354,1	1069,807
Прочие	84,7	0,698	73,9	2,097	127,7	2,347
Всего	6924,4	946,251	4512,6	443,265	9113,4	1094,596
всего "мягкий"	5806,8	21,960	3918,5	9,581	7759,2	24,789

Развитие донного сообщества в точке непосредственного предполагаемого воздействия продувочных вод в 300 м от водовыпуска в летний период текущего года характеризовалось суммарными показателями 1840 экз./м² и 16,56 г/м², которые входили в пределы межгодовых колебаний численности (6893...19960 экз./м²) и биомассы (6,460...1174,440 г/м²), регистрируемых на исследуемой акватории, и укладывались в таковые многолетних показателей по всему плесу (643...34670 экз./м² и 2,34...4560,55 г/м²).

Таким образом, по результатам качественно-количественного анализа материалов фаунистический состав макрозообентоса исследуемой акватории идентичен таковому Цимлянскому водохранилища. Определяющим фактором структуры донного сообщества является глубина и тип грунта. Доминирующие на участке в зоне глубин 2...5 м биотопы с илистыми, с песчано- и глинисто-илистыми грунтами с примесью ракушки формируют бентоценозы с лидированием моллюсков и олигохет - типичных пелофильных животных. Полученные количественные показатели не выходят за пределы годовых флуктуаций. На основании этого можно заключить, что влияние сброса подогретых вод на структурно-функциональные показатели зообентоса плеса, в целом, не проявлялось. Развитие макрозообентоса на исследуемой акватории определяется общими закономерностями, характерными для Цимлянского водохранилища.

Результаты комплексных гидрохимических и гидробиологических исследований на акватории Приплотинного плеса Цимлянского водохранилища, выполненные в весенний и летний меженный периоды 2010-2016 гг. в связи осуществлением продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС позволяют сделать выводы, что изъятие 1/5 части водного объема водоема-охладителя и наполнение его водой из Цимлянского водохранилища в период продувочных работ существенно не изменили условий среды обитания водных сообществ на прилегающей акватории Приплотинного плеса в районе прохождения продувочных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакаева, Е.Н. и др. Экотоксичность вод приплотинного участка цимлянского водохранилища [Текст] / Е.Н. Бакаева, Н.А. Игнатова, Г.Г. Черникова // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – Спецвыпуск(3). – С. 5–11.
2. Горелов, В.П. Состояние донных кормовых ресурсов Цимлянского водохранилища (по данным 1998-1999 гг.). // Рыбохозяйственные исследования в бассейне Волго-Донского междуречья на современном этапе. – СПб, 2002. – С. 53–61.
3. Горелов В.П. и др. Эколого-гидробиологическая и ихтиологическая характеристика водоема-охладителя Ростовской АЭС и перспектива его рыбохозяйственного использования [Текст] / В.П. Горелов, В.В. Бедро, В.С. Болдырев, М.Р. Ибрагимов, Н.В. Кучишкина, Т.Б. Лысак, Т.П. Шевлякова // Мат-лы научн.-практ. конф. «Проблемы развития атомной энергетики на Дону», Ростов-на-Дону, 29 февраля-1 марта 2000 г. – Ростов н/Д, 2000. – Т. 1. – С. 170–173.
4. Горская, О.И. Организация и проведение периодической продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС [Текст] / О.И. Горская // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – Спецвыпуск(3). – С. 44–50.
5. Калинина, С.Г. Структурные и продукционные характеристики фитопланктона Цимлянского водохранилища [Текст] / С.Г. Калинина // Сб. науч. тр. ГосНИОРХ. – 1987. – Вып. 265. – С. 54–62.
6. Калинина, С.Г. и др. Улучшение экологического состояния приплотинного плеса Цимлянского водохранилища методом альголизации [Текст] / С.Г. Калинина, Е.А. Ходяков, С.В. Яковлев // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – Спецвыпуск(3). – С. 72–82.
7. Проведение работ по биологическому мониторингу в Цимлянском водохранилище в районе продувки водоема-охладителя и по оценке эффективности РЗУ при проведении продувки водоема-охладителя Ростовской АЭС. – Фонды Ростовской АЭС, 2010–2016.
8. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. 1983. / Под ред. к.б.н. В.А. Абакумова. – Л.: Гидрометеиздат, 1983.
9. Хоружая, В.В. и др. Многолетняя динамика эффективности размножения рыб в Приплотинном плесе Цимлянского водохранилища [Текст] / В.В. Хоружая, С.В. Яковлев // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – Спецвыпуск(3). – С. 21–27.
10. Черешнева Л.А. Структурно-функциональные характеристики зоопланктона на мелководных биотопах Цимлянского водохранилища. Материалы XIV школы-конференции молодых ученых «Биология внутренних вод» [Текст] / Л.А. Черешнева. – Борок: ИБВВ РАН, 2010.

REFERENCES

- [1] Bakaeva E.N., Ignatova N.A., Chernikova G.G. E'kotoksichnost' vod priplotinnogo uchastka cimlyanskogo vodohranilishha [Ecotoxicity of Waters of the Tsimlyansk Reservoir Dam Site]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, Specvypusk(3), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 5–11. (in Russian)
- [2] Gorelov V.P. Sostoyanie donnyh kormovyh resursov Cimlyanskogo vodohranilishha (po dannym 1998–1999 gg.) [Condition of Ground Fodder Resources of the Tsimlyansk Reservoir (according to 1998–1999)]. Ryboxozajstvennye issledovaniya v bassejne Volgo-Donskogo mezhdurech'ya na sovremennom etape [Fishery Researches in the Basin of Volga-Don at the Present Stage], Sankt-Peterburg, 2002, pp. 53–61. (in Russian)
- [3] Gorelov V.P., Bedro V.V., Boldyrev V.S., Ibragimov M.R., Kuchishkina N.V., Lysak T.B., Shevlyakova T.P. E'kologo-gidrobiologicheskaya i ihtologicheskaya xarakteristika vodoema-ohladitelya Rostovskoj AE'S i perspektiva ego ryboxozajstvennogo ispol'zovaniya [Ecological and Hydrobiological, Ichthyological Characteristic of Cooling Pond of the Rostov NPP and Prospect of its Fishery Use]. Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii «Problemy razvitiya atomnoj e'nergetiki na Donu», Rostov-na-Donu, 29 fevralya-1 marta 2000 goda. Rostov-na-Donu [Materials of the scientific practical conference "Problems of Development of Nuclear Power in Don Region", Rostov-on-Don, on February-1 29 March, 2000 – Rostov-on-Don], 2000, T. 1, pp. 170–173. (in Russian)
- [4] Gorskaya O.I. Organizaciya i provedenie periodicheskoy produvki vodoema-ohladitelya Rostovskoj AE'S [Organization and Carrying Out a Periodic Purge of the Rostov NPP Cooling Pond] Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, Specvypusk(3), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 44–50. (in Russian)
- [5] Kalinina S.G. Strukturnye i produkcionnye harakteristiki fitoplanktona Cimlyanskogo vodohranilishha [Structural and Productional Characteristics of Tsimlyansk Reservoir

- Phytoplankton]. Sbornik nauchnyh trudov GosNIORH [Collection of scientific works of State Research Institute of Lake and River Fishery], 1987, Issue 265, pp. 54–62. (in Russian)
- [6] Kalinina S.G., Xodyakov E.A., Yakovlev S.V. Uluchshenie e'kologicheskogo sostoyaniya priplotinnogo plesa Cimlyanskogo vodoxranilishha metodom al'golizatsii [Improvement of Ecological Condition of the Tsimlyansk Reservoir Dam Reach by an Algolization Method]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, Specvypusk(3), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 72–82. (in Russian)
- [7] Provedenie rabot po biologicheskomu monitoringu v Cimlyanskom vodoxranilishhe v rajone produvki vodoema-oxladitelya i po ocenke e'ffektivnosti RZU pri provedenii produvki vodoema-oxladitelya Rostovskoj AE'S [Work on Biological Monitoring in the Tsimlyansk Reservoir around Cooling Pond Purge and According to Effectiveness when Carrying Out Cooling Pond Purge of the Rostov NPP.]. Fondy Rostovskoj AE'S [Funds of the Rostov NPP], 2010–2016. (in Russian)
- [8] Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverxnostnyx vod i donnyh otlozhenij [Guide to Methods of the Hydrobiological Analysis of the Surface Water and Ground Deposits]. 1983. Pod red. k.b.n. V.A. Abakumova [Edited by]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 1983. (in Russian)
- [9] Xoruzhaya V.V., Yakovlev S.V. Mnogoletnyaya dinamika e'ffektivnosti razmnozheniya ryb v Priplotinnom plese Cimlyanskogo vodoxranilishha [Long-term Dynamics of Effectiveness of Fish Manifold in the Tsimlyansk Reservoir Dam Reach]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, Specvypusk(3), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 21–27. (in Russian)
- [10] Cheresheva L.A. Strukturno-funkcional'nye harakteristiki zooplanktona na melkovodnyh biotopah Cimlyanskogo vodoxranilishha [Structurally Functional Characteristics of Zooplankton on Shallow Biotopes of the Tsimlyansk Reservoir]. Materialy XIV shkoly-konferencii molodyx uchenykh «Biologiya vnutrennih vod» [Materials XIV of school conference of young scientists "Biology of Internal Waters"]. Borok: IBVV RAN [Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences], 2010. (in Russian)

Results of Long-Term Biological Monitoring in the Tsimlyansk Reservoir in the Cooling Pond Purge of Rostov NPP

O.I. Gorskaya*, S.V. Yakovlev**, L.A. Cheresheva**, V.M. Sapelnikov ***

* «Rostov Nuclear Power Plant» the Branch of «Rosenergoatom Concern» OJSC,
Volgodonsk-28, Rostov region, Russia 347388
e-mail: gorskayavdonsk@rambler.ru
ORCID: 0000-0003-3377-4654

** Volgograd Branch of Berg State Research Institute of Lake and River Fishery
Pugachevstaya St., 1, Volgograd, Volgogradsaya region, Russia, 400001

*** Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 34736
e-mail: viti@mail.ru
ORCID: 0000-0001-5792-5344
WoS ResearcherID: J-7364-2017

Abstract – Annual work on biological monitoring in the Tsimlyansk reservoir in the area of cooling pond purge of Rostov NPP is carried out the eighth year during the purging period (April, May), and also before and after the end of purging (March, June). The object of the study is the main biocenoses (phytoplankton, zooplankton, zoobenthos) and water composition of the Tsimlyansk reservoir in the water area near the Rostov NPP.

Keywords: Tsimlyansk reservoir, Rostov NPP, cooling pond purge, biocenoses, water composition.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 504.5:628.4.047+621.039.584+536.25

**ОСОБЕННОСТИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ РАДИОАКТИВНОЙ ГАЗОАЭРОЗОЛЬНОЙ
ПРИМЕСЬЮ ПОСЛЕ ЕЁ ПРОХОЖДЕНИЯ НАД ОБШИРНЫМИ
АКВАТОРИЯМИ**

© 2017 А.П. Елохин, М.В. Жилина

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Рассматривается вопрос радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности газоаэрозольной радиоактивной примесью после её прохождения над обширными акваториями в рамках гипотетической радиационной аварии. Особенность прохождения примеси над акваторией состоит в увеличении эффективной высоты факела выбросов в результате взаимодействия струи с конвективным воздушным потоком, возникающим над акваторией в летний сезон. Показано, что осаждение радиоактивной примеси в этом случае над акваторией существенно уменьшается, а над подстилающей поверхностью, которую достигает воздушный поток при своём прохождении – увеличивается. Приводится метод оценки и обоснование этого эффекта, которое требует измерения разности температур конвективного воздушного потока, или непосредственно вертикальной составляющей его скорости, или иных метеорологических характеристик, определяющих указанный параметр.

Ключевые слова: подстилающая поверхность, акватория, радиоактивное загрязнение, конвективный воздушный поток; состояние устойчивости атмосферы; приземная концентрация примеси.

Поступила в редакцию: 03.05.2017

Как известно, распространение примесей в атмосфере существенно зависит от гидрометеорологических условий, орографии подстилающей поверхности, трансформации веществ за счет химических и фотохимических превращений, взаимодействия с подстилающей поверхностью или изменения её шероховатости. Несомненный интерес представляет собой распространение примесей над значительным водным пространством – акваторией, характеризующейся особыми метеорологическими условиями особенно в летние месяцы.

Вследствие разницы потока явного тепла между сушей и водной поверхностью в береговой зоне развиваются бризы [1], которые в значительной степени определяют климат прибрежных районов, в частности, уменьшая дневные максимумы температуры над сушей [2]. Кроме того, давно отмечено, что бризовая циркуляция существенно влияет на перенос атмосферных аэрозолей и газовых примесей [1]. Результаты мезомасштабного численного моделирования [3] показали, что наблюдаемые превышения ПДК некоторых загрязняющих веществ в воздухе в городах, стоящих на берегу водоемов, могут быть в значительной мере обусловлены переносом примеси к источнику возвратным течением бризовой ячейки. В свою очередь, уравнение турбулентной диффузии [4], описывающее распространение примеси в атмосфере, учитывает только лишь гравитационную составляющую скорости примеси w , в то время как конвективная скорость движения частицы в атмосфере, возникающая под действием силы плавучести при сверхадиабатическом вертикальном градиенте температуры, когда отдельные элементарные объемы (воздушные частицы) оказываются теплее и, следовательно, легче окружающего воздуха, считается

пренебрежительно малой по сравнению с гравитационной [5]. Для решения задачи распространения радиоактивной примеси над большими акваториями рассмотрим принцип возникновения атмосферной конвекции и получим выражение для конвективной составляющей вертикальной скорости частицы радиоактивной примеси. Получившееся выражение учтем при оценке радиоактивного загрязнения окружающей среды (подстилающей поверхности).

На развитие конвекции в атмосфере существенно влияют процессы фазовых переходов влаги, мелкомасштабной турбулентности и радиационных потоков тепла (особенно к подстилающей поверхности). Выходной продукцией наиболее полных существующих численных моделей конвекции являются три компонента скорости (u , v , w), температура (T), массовая доля влаги (q_v), водность облаков (q_c), водность осадков (q_r) и их интенсивность у поверхности Земли.

В своей основе все математические модели процесса распространения той или иной примеси опираются на полуэмпирическое дифференциальное уравнение турбулентной диффузии [4]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u(z) \frac{\partial q}{\partial x} + v(z) \frac{\partial q}{\partial y} - w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(z) \frac{\partial q}{\partial z} \right) - \sigma q + f \quad (1)$$

с начальными условиями:

$$q(x, y, z, t)|_{t=0} = 0 \quad (2)$$

и граничными условиями [6]:

$$\left. \begin{aligned} q(x, y, z, t)|_{x=0} &= 0; & q(x, y, z, t)|_{y=0} &= 0; \\ q(x, y, z, t)|_{x=\infty} &= 0; & q(x, y, z, t)|_{y=\infty} &= 0; \\ q(x, y, z, t)|_{z \rightarrow \infty} &= 0; & k \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=z_0} &= (\beta - w)q|_{z=z_0}. \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где q – искомая концентрация примеси;

t – время;

$u(z)$, $v(z)$, w – компоненты скорости ветра по осям x , y , z декартовой системы координат соответственно;

$k(z)$ – коэффициент турбулентной диффузии в z -направлении (z – высота);

f – функция источника, зависящая в общем случае от координат и времени, то есть $f = f(x, y, z, t)$;

σ – величина, связанная с трансформацией (поглощением) субстанции (в общем случае) $\sigma = \sigma(x, y, z, t)$;

β – скорость сухого осаждения;

w – гравитационная скорость примеси;

z_0 – параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Функциональные зависимости величин продольной – $u(z)$, поперечной – $v(z)$ скоростей ветра, а также коэффициента турбулентной диффузии – $k(z)$ от высоты z от подстилающей поверхности имеют различный вид в рамках различных метеорологических моделей, например модели пограничного или приземного слоя атмосферы.

При заданных зависимостях $u(z)$, $v(z)$ и $k(z)$ в уравнении турбулентной диффузии

(1) и (3) предполагают, что размывание примеси по оси Y осуществляется по закону Гаусса, определяя, таким образом, объёмную активность радиоактивной примеси выражением [7]:

$$q(x, y, z, t) = \frac{S(x, z, t)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp\left(-y^2/2\sigma_y^2\right), \quad (4)$$

где $\sigma_y(x)$ – среднеквадратичное отклонение.

Представление объёмной активности радиоактивной примеси в виде выражения (4) позволяет найти функцию двух пространственных переменных и времени $S(x, z, t)$, что в дальнейшем может существенно упростить решение задачи. Эту функцию находят, проводя интегрирование (4), согласно выражению:

$$S(x, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} q(x, y, z, t) dy = 2 \int_0^{\infty} q(x, y, z, t) dy \quad (5)$$

Интегрируя уравнение турбулентной диффузии (1) в соответствии с (5), получают:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u(z) \frac{\partial S}{\partial x} + v(z) \frac{\partial S}{\partial y} - w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(z) \frac{\partial S}{\partial z} \right] - \sigma S + \varphi, \quad (6)$$

где $S = S(x, z, t)$; $\varphi(x, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z, t) dy = P_B \delta(x) \delta(z - h_{\text{эф}})$;

$h_{\text{эф}}$ – эффективная высота выброса;

P_B – мощность выброса, [Бк/с];

$f = P_B \delta(x) \delta(y) \delta(z - h_{\text{эф}})$ – источник радиоактивной примеси.

В рамках модели пограничного слоя атмосферы [7], $\sigma_y^2(x) = \bar{b} x^2 / \bar{u}^2 (1 + \alpha x \bar{b} / \bar{k} \bar{u})$, где $\bar{b}, \bar{k}, \bar{u}$ – усредненные по пограничному слою значения: энергии турбулентных пульсаций $b(z)$, коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$, продольной скорости ветра $u(z)$. Обработывая граничные и начальные условия аналогично уравнению (3), получают:

$$\left. \begin{aligned} S(x, z, t)|_{t=0} &= 0, \\ S(x, z, t)|_{x=0} &= 0; \quad S(x, z, t)|_{x \rightarrow \infty} = 0; \\ S(x, z, t)|_{z \rightarrow \infty} &= 0; \quad k \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = (\beta - w) S|_{z=z_0} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где β – скорость сухого осаждения примеси;

z_0 – параметр шероховатости.

Рассматривая ИРГ как основную составляющую газоаэрозольной радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, в результате радиационной аварии на ОИАЭ отметим, что для ИРГ гравитационная скорость осаждения может быть весьма значительной, поскольку их плотность существенно больше плотности воздуха, в результате чего эти газы тонут в воздухе со скоростью, верхняя оценка которой

составляет величину $w = \sqrt[3]{2g v_k \frac{(\rho_r - \rho_b)}{\rho_r}}$ [8],

где v_k [см²/с] – кинематическая вязкость воздуха;
 ρ_b – плотность воздуха;
 ρ_r – плотность ИРГ;
 g – ускорение свободного падения.

Аналитическое решение стационарного уравнения турбулентной диффузии (6), описывающее перенос радиоактивной примеси в атмосфере и её гравитационное осаждение с высоты $h_{\text{эф},g} = H_T + \Delta h$ (H_T – геометрическая высота венттрубы; Δh приращение высоты, обусловленное начальной скоростью воздушного потока, выходящего из устья, его температурой, давлением, а также скоростью ветра в атмосфере $u(z)$) [7, 9], при постоянных: продольной скорости ветра $\bar{u}$, коэффициенте турбулентной диффузии $\bar{k}$, энергии турбулентных пульсаций $\bar{b}$, определяемых, например, в рамках модели приземного слоя атмосферы [10], усредненных по его высоте $H_{\text{пр}}$, и равной нулю ($v=0$) поперечной скорости ветра [9, 11-12], выглядит следующим образом:

$$S(x, z) = \frac{M_0}{2} \exp \left(- \left[\frac{\sigma x}{\bar{u}} + \frac{w^2 x}{4\bar{k}\bar{u}} + \frac{w(z - h_{\text{эф}})}{2\bar{k}} \right] \right) \left\{ \frac{\exp(-[z - h_{\text{эф}}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x) + \exp(-[z - h_{\text{эф}}]^2 \bar{u}/4\bar{k}x)}{\sqrt{\bar{k}\bar{u}x}} - \right. \\ \left. - \frac{(2b - w)}{\bar{k}\bar{u}} \exp \left[- \frac{(2b - w)(z + h_{\text{эф}})}{2\bar{k}} + (2b - w)^2 \frac{x}{4\bar{k}\bar{u}} \right] \operatorname{erfc} \left[\left(\frac{2b - w}{2\bar{k}} \right)^2 \sqrt{\bar{k}x/\bar{u}} + \frac{(z + h_{\text{эф}})}{2} \sqrt{\bar{k}x/\bar{u}} \right] \right\} \quad (8)$$

При этом оценка объемной активности ИРГ с учётом аналитического решения стационарного уравнения турбулентной диффузии для приземного слоя атмосферы (8) будет иметь аналогичный выражению (4) вид [7]

$$A_v(x, y, z) = \frac{S(x, z)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(x)} \exp \left(- y^2 / 2\sigma_y^2(x) \right), \quad (9)$$

Исходная система уравнений атмосферной конвекции определяется системой уравнений, определяющих изменение трёхмерной скорости конвективного потока [5]:

$$\frac{du}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} + F_x,$$

где p' , ρ – давление и плотность конвективного воздушного потока.

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial y} + F_y,$$

$$\frac{dw}{dt} = g \left(\frac{\theta'}{\theta} + 0,605 q_v - q_c - q_r \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial z} + F_z,$$

где θ , θ' – потенциальная температура $\theta = T[p_0/p]^{R/C_p}$;
 $R/C_p = [(\chi-1)/\chi]$, $\chi = C_p/C_v$ – постоянная адиабаты.

Уравнения Пуассона: $\frac{\partial(\bar{\rho}u)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{\rho}v)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{\rho}w)}{\partial z} = 0,$

где $\bar{\rho}$ – усреднённое значение плотности.

$$\begin{aligned}\text{Уравнений тепла и влаги: } \frac{d\theta'}{dt} &= -\frac{d\theta}{dz} w + F_T + \varepsilon_{ph} + \varepsilon_r; \\ \frac{dq'}{dt} &= -\frac{d\bar{q}_v}{dz} w + F_q - \left(\frac{dq_r}{dt}\right)_{ph},\end{aligned}$$

где $\bar{q}_v$, q' – усреднённое значение массовой доли влаги в атмосфере и конвективном потоке соответственно.

Уравнения, описывающего перенос водности осадков:

$$\frac{\partial q_r}{\partial t} = \frac{1}{p_0} \frac{\partial(\bar{\rho} q_r u)}{\partial x} + \frac{1}{p_0} \frac{\partial(\bar{\rho} q_r v)}{\partial y} + \frac{1}{p_0} \frac{\partial(\bar{\rho} q_r (w + V_T))}{\partial z} + \left(\frac{dq_r}{dt}\right)_{ph},$$

где p_0 – давление атмосферы;

x, y, z – текущие координаты;

F_x, F_y, F_z, F_T и F_q – члены, описывающие мелкомасштабную турбулентность в соответствующих уравнениях [5];

ε_{ph} – притоки тепла за счет фазовых переходов влаги в атмосфере;

ε_r – радиационные притоки тепла;

$(dq_r/dt)_{ph}$ – фазовые переходы влаги из облачности в осадки или из осадков в водяной пар.

Большая часть физических процессов, описываемых слагаемыми в правых частях уравнений, является микрофизическими по своей сущности. Их точное описание представляет собой самостоятельные задачи как с точки зрения построения самих физических моделей, так и численной их реализации. Поэтому в настоящее время используются приближенные методы представления мелкомасштабной турбулентности, процессов конденсации, коагуляции, испарения осадков, поглощения радиации в различных участках спектра и т.д. Эти приближенные представления называют параметризацией. В последнее время были развиты методы параметризации указанных выше мелкомасштабных процессов, которые хотя и требуют значительного количества вычислений, но могут быть реализованы на современных ЭВМ.

В силу того, что подстилающая поверхность обладает горизонтальной неоднородностью (трава, деревья, здания, водоемы и т.д.) для прогноза следовало бы рассчитывать поля конвективных течений с очень большим числом индивидуальных термиков, представляющих собой массу поднимающегося воздуха, которая при этом может перемешиваться с окружающим воздухом, но данный факт увеличивает время расчета в разы. Но поскольку существует необходимость хотя бы приближенной оценки интенсивности конвективных течений, можно воспользоваться упрощенными способами их расчета.

Предельно простой и вместе тем физически обоснованный подход к расчету конвективных движений состоит в том, чтобы с помощью имеющихся данных вертикального зондирования атмосферы оценить основную движущую силу конвекции – силу плавучести и из упрощенных уравнений динамики атмосферы рассчитать вертикальную скорость конвективных движений [13].

Пренебрегая конвективными пульсациями давления и турбулентным обменом, уравнение движения для вертикальной компоненты скорости w можно представить в

виде:

$$\frac{dw}{dt} = g \frac{(T' - T)}{T}, \quad (10)$$

где T' – температура поднимающейся воздушной частицы,
 T – температура окружающего воздуха,
 t – время,
 g – ускорение свободного падения.

В одномерном стационарном случае $\partial w / \partial t = w \partial w / \partial z$ и тогда уравнение (46) приобретает вид:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = g \frac{T' - T}{T}.$$

Интегрируют его по высоте от уровня z_0 до уровня z , получают:

$$w_{kz}^2 = w_{kz_0}^2 + 2g \int_{z_0}^z \frac{T' - T}{T} dz, \quad (11)$$

Где индекс k означает, что рассчитывается вертикальная скорость конвективного потока. Проведя преобразование уравнения (11) с использованием уравнения статики ($dp = \rho g dz$) и уравнения состояния ($p = \rho RT$, где R – газовая постоянная), получим следующую формулу для определения вертикальной скорости частицы на уровне p :

$$w_{kp}^2 = w_{kp_0}^2 + 2gp \int_{z_0}^z R(T' - T) d \ln p,$$

или приближенно:

$$w_{kp} = \sqrt{w_{kp_0}^2 + 2R(T' - T) \ln(p/p_0)},$$

где p и p_0 – давление на нижней и верхней границах рассматриваемого слоя атмосферы,

w_{kp_0} – скорость конвекции на нижнем уровне (p_0) слоя.

Средняя скорость конвекции для частицы, поднимающейся с уровня p_0 до уровня p , на котором $(T' - T) = 0$, в предположении, что на уровне Земли (p_0) благодаря трению $w_{kp_0} = 0$ определяется из следующего уравнения [5]:

$$\bar{w}_{kp} = \sqrt{R(T' - T) \ln(p/p_0)}. \quad (12)$$

На рисунке 1 представлен график для определения средней вертикальной скорости конвекции при подъеме частицы с уровней атмосферы 1000 ГПа в соответствии с формулой (12). Значения $\bar{w}_{kp}$ по графику можно рассчитать по известным значениям $(T' - T)$ в слое от начального уровня подъема частицы (p_0) до конечного уровня (p). Как видно из рисунка 1, при одном и том же значении $(T' - T)$ величина $\bar{w}_{kp}$ меняется в довольно широких пределах в зависимости от высоты уровне p_0 и p и разности $p_0 - p$. [5]. Изобарическая поверхность 1000 гПа проходит вблизи уровня моря. Изобарическая поверхность 700 гПа располагается около высоты 3 км. Но поскольку высота пограничного слоя составляет от 100 м до 2 км в зависимости от состояния устойчивости атмосферы [7], то для решения поставленной задачи следует

определить среднюю скорость конвекции для частицы, поднимающейся с уровня Земли ($p_0=1000$ гПа) до изобарической поверхности 800 гПа. Значения средней скорости конвекции $\overline{w_{kp}}$ для различных значений $(T' - T)$ приведены в табл.1. Однако, поскольку для исследования эффекта используется модель приземного слоя атмосферы, то здесь достаточно показать его наличие при значительно меньших значениях скорости конвективного потока.

Определение вертикальной конвективной скорости воздушного потока в атмосфере при распространении в ней радиоактивной газоаэрозольной примеси над большими акваториями (озера, водохранилища и т.д.) позволяет произвести более точную оценку радиоактивного загрязнения окружающей среды.

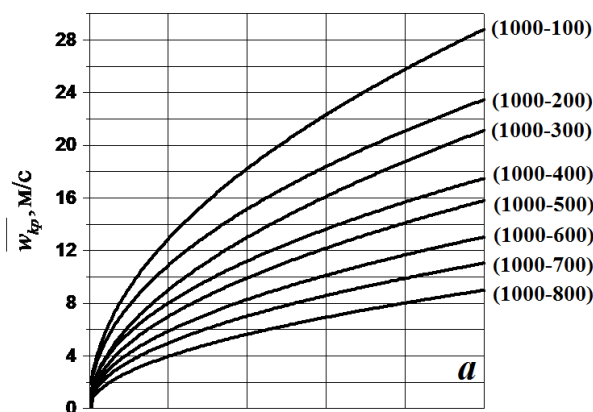


Рис. 1. – Графики для определения средней вертикальной скорости конвекции при подъёме частицы с уровней атмосферы 1000 (а), 900(б), 850(в) ГПа

Таблица 1.				
Значения средней скорости конвекции $\overline{w_k}$ для различных значений разности $(T' - T)$				
№	p_0 , гПа	p , гПа	$(T' - T)$, °C	$\overline{w_{kp}}$, м/с
1	1000	900	1	13
			2	18
			3	22
			4	26
			5	29
2	1000	800	1	11
			2	15
			3	18
			4	21
			5	24
3	900	800	1	12
			2	16,5
			3	20,5
			4	24
			5	28

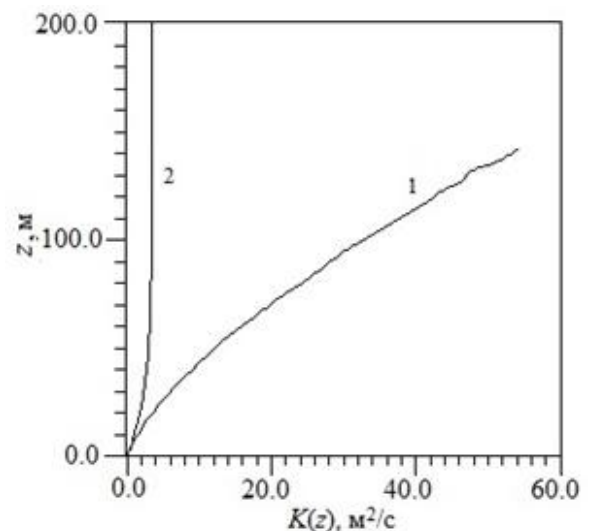
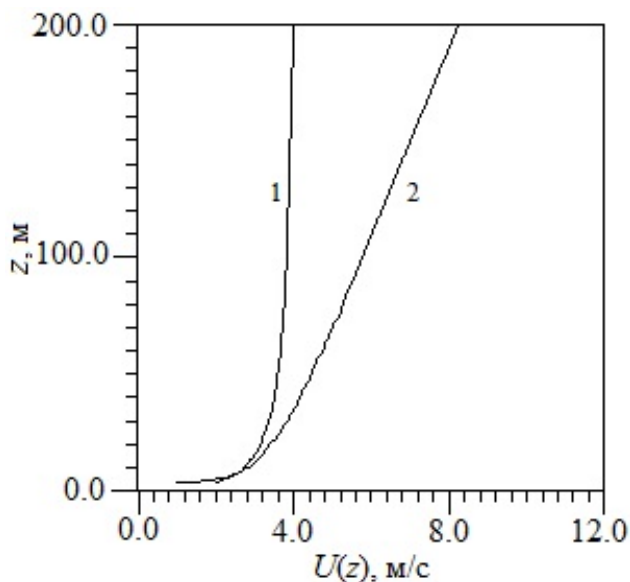


Рис. 2. – Зависимость скорости приземного ветра $U(z)$ от высоты от подстилающей поверхности (модель приземного слоя атмосферы): 1 – неустойчивое состояние

($L_0 = -18$, $v_* = 0,32$ м/с, $\bar{u} = 3,8$ м/с, $\bar{b} = 1,424$;
2 – устойчивое состояние ($L_0 = 30$, $v_* = 0,26$ м/с,
 $\bar{u} = 5,66$ м/с, $\bar{b} = 0,097$), [12]

Рис. 3. – Зависимость коэффициента турбулентной диффузии $K(z)$ от высоты от подстилающей поверхности при различных состояниях устойчивости атмосферы (в рамках модели приземного слоя атмосферы): 1 – неустойчивое состояние $L_0 = -18$, $\bar{k} = 17,0$ м²/с ; 2 – устойчивое состояние $L_0 = 30$, $\bar{k} = 3,5$ м²/с , [12]

Для решения этой задачи воспользуемся выражением (9), которое описывает перенос радиоактивной примеси в атмосфере, ограничиваясь двумя случаями устойчивости её приземного слоя (см. рис.2 и 3) [12]. Для этого в формуле (8), представляющей собой решение краевой задачи уравнения турбулентной диффузии в рамках приземного слоя атмосферы, сделаем поправку, т.е. вместо гравитационной скорости осаждения частиц w подставим выражение $w = w - \overline{w_{kp}}$ и проведем расчёт объемной активности радиоактивной примеси (9) для неустойчивого ($L_0 = -18$, $v_* = 0,32$ м/с) и устойчивого состояний ($L_0 = 30$, $v_* = 0,26$ м/с) приземного слоя атмосферы [12], каждый из которых характеризуется своими зависимостями скорости воздушного потока $u(z)$ и коэффициента турбулентной диффузии $k(z)$, где L_0 – масштаб Монина-Обухова; v_* – динамическая скорость (см. рис.2, 3).

Согласно [11, 14] основными радионуклидами в выбросах АЭС и других ОИАЭ в атмосферу являются ИРГ и аэрозоли ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{60}Co . При этом, как отмечалось выше, основной дозообразующий вклад внешнего облучения создают ИРГ, радиационные характеристики которых приведены в [8].

В расчетах объемной активности радиоактивной примеси, распространяющейся вблизи и над большими акваториями, полагаем, что в атмосферу поступают радионуклиды ^{85}Kr с общей активностью $2 \cdot 10^5$ Ки. Это позволяет пренебречь постоянной распада λ в уравнении (8), в силу того, что этот радионуклид относится к долгоживущим с $T_{1/2} = 10,7$ лет. Результаты расчетов должны:

- 1) Уточнить различие характера радиоактивного загрязнения подстилающей или водной поверхности для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы.
- 2) Определить особенности пространственных распределений радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере, в зависимости от величины скорости конвективного подъема воздушного потока, возникающего над акваторией.
- 3) Подготовить методическую базу для разработки методики оценки повышения объемной активности при «забросе» радиоактивной примеси, проходящей над обширными акваториями.

Результаты расчетов приведены на рисунке 4 (а, б, в) на высоте $z = 1,5$ м при эффективной высоте выброса $H_{эф} = 100$ м.

Из представленных рисунков следует, что пространственное распределение объемной активности имеет один и тот же характер. При этом максимум распределения в зависимости от состояния устойчивости атмосферы располагается на различных расстояниях от источника, т.е. при устойчивом состоянии сдвигается в сторону больших x . Распределение объемной активности вдоль оси x при устойчивом состоянии атмосферы является более пологим по сравнению с аналогичным распределением при неустойчивом состоянии атмосферы, которое резко падает, после того как достигает максимума. Эффект значительного сдвига максимума в пространственном распределении объемной активности и пологость её распределения при устойчивом состоянии атмосферы обусловлены значительно большей скоростью воздушного потока, чем при неустойчивом состоянии. Эти эффекты хорошо известны [7, 9, 12] и приводятся здесь с целью подтверждения корректности расчётов. С ростом скорости гравитационного осаждения с 0,005 м/с до 0,05 м/с сравнимой со скоростью сухого осаждения (рис. 4 а, б) величина объемной активности вблизи подстилающей поверхности увеличивается, что также не вызывает сомнений, поскольку свидетельствует о том, что величина поверхностного загрязнения радиоактивной примесью также будет расти.

На рисунке 4 в также представлены распределения объемной активности для устойчивого и неустойчивого состояний атмосферы при скорости конвективного

потока равной скорости гравитационного осаждения, но взятой с обратным знаком, т.е. при наличии воздушного потока, поднимающего шлейф радиоактивных выбросов. Несмотря на то, что характер этих распределений подобен распределениям, приведенным на рисунке 4 *а, б*, особенность распределений состоит в том, что значение объемной активности при устойчивом состоянии атмосферы в отличие от неустойчивого значительно уменьшается, чем в распределениях рисунка 4 *б*. Из последнего следует, что плотность поверхностного загрязнения подстилающей поверхности в этом случае также будет падать.

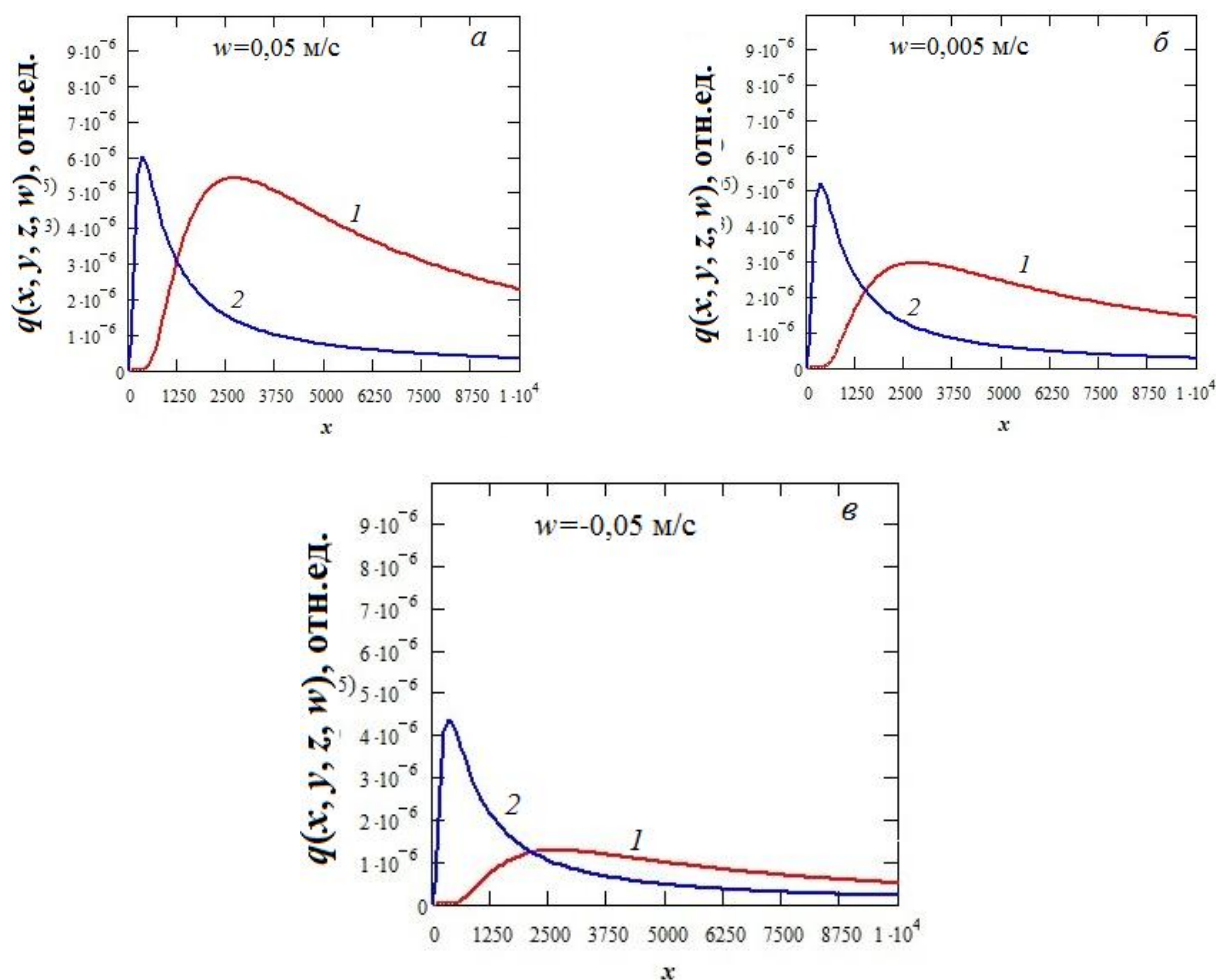


Рис. 4. – Осовое распределение радиоактивной примеси для устойчивого (1) и неустойчивого (2) состояний атмосферы при гравитационной скорости осаждения w радиоактивной примеси равной: 0,05 м/с (*а*); 0,005 м/с (*б*) и при наличии скорости конвективного подъёма $w = -0,05$ м/с (*в*) на высоте $z = 1.5$ м

Поперечные распределения объемной активности, полученные на различных расстояниях (см. рис. 5, *а – г*), не противоречат результатам, полученным выше. На небольших расстояниях от источника выбросов ($x = 1000$ м) объемная активность в распределении 2 (неустойчивое состояние атмосферы) оказывается больше, чем в распределении 1 (устойчивое состояние атмосферы). Напротив, при больших x ($x \geq 3000$ м) объемная активность в распределении 1 оказывается выше, чем в распределении 2. Последнее обусловлено также тем, что при большой скорости ветра радиоактивная примесь подхватывается ветром (сдувается от источника) и переносится на большие расстояния, а при малой скорости ветра основная масса оседает вблизи источника. Следует также отметить, что при скорости конвективного потока сравнимой

с гравитационной скоростью (по абсолютной величине), значение объемной активности в приземном слое ($z = 1,5$ м) при устойчивом состоянии атмосферы оказывается меньше, чем при гравитационной, что не противоречит ранее полученным результатам. Наиболее заметно это на больших расстояниях от источника.

С ростом скорости конвективного потока осаждение радиоактивной примеси заметно уменьшается. Эти результаты приведены на рис.6 а, б. Сравнение результатов расчётов, приведенных на рис. 5 (в, г) и 6 (а, б) подтверждают этот вывод. Следует также обратить внимание на слабую зависимость величины объемной активности от скорости гравитационного осаждения и скорости конвективного потока, особенно, на больших расстояниях от источника при неустойчивом состоянии атмосферы, в отличие от устойчивого состояния.

Этот вывод следует из результатов расчётов как осевого, так и поперечного распределений радиоактивной примеси, представленных на рис. 5 (а – г) и 6 (а, б).

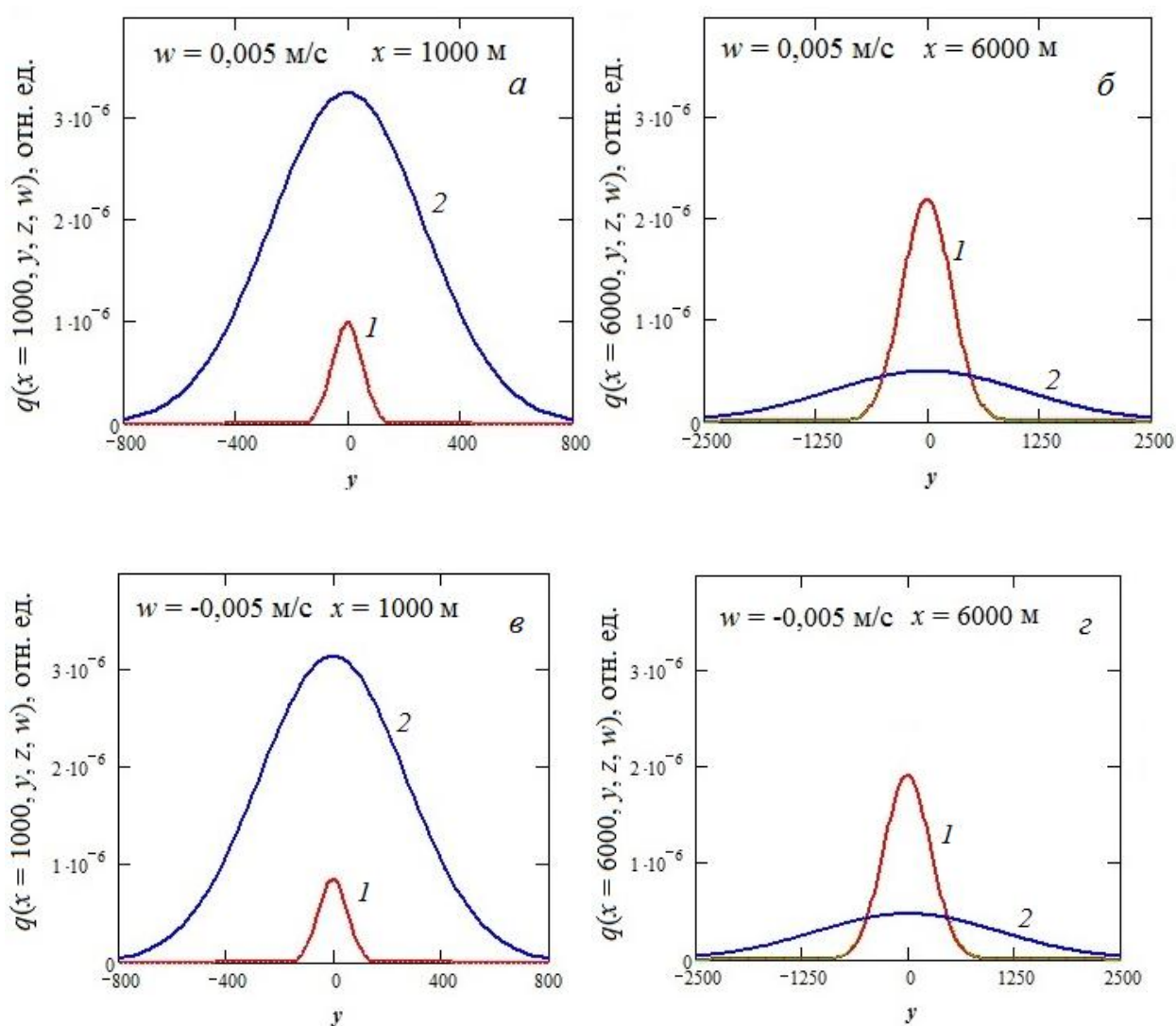


Рис. 5. – Поперечное распределение объемной активности приземного слоя ($z = 1,5$ м) для различных состояний устойчивости атмосферы на различных расстояниях от источника выбросов ($x = 1000, 6000$ м) при гравитационной скорости осаждения радиоактивной примеси $w = 0,005 \text{ м/с}$ (а, б) и скорости конвективного потока $w = -0,005 \text{ м/с}$ (в, г)

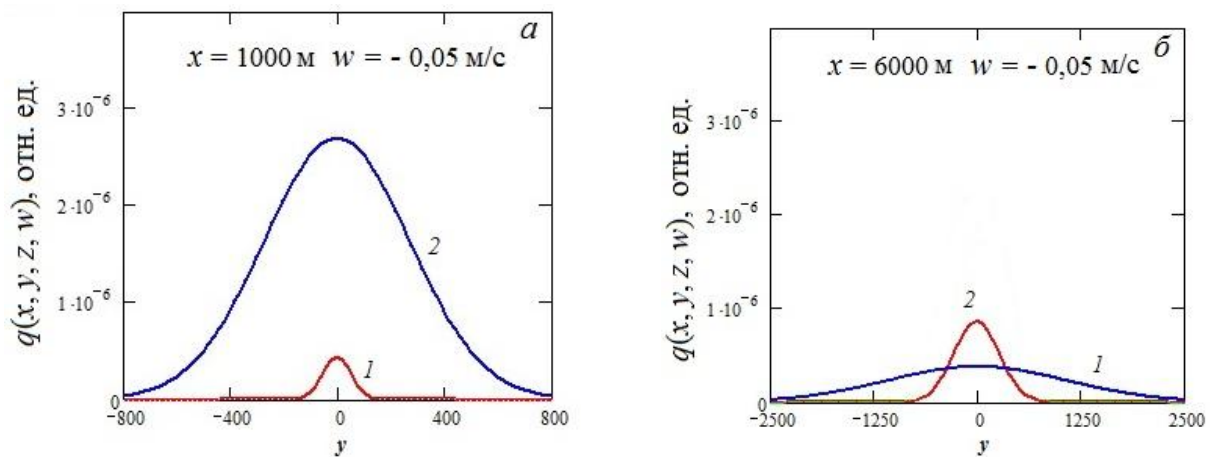


Рис. 6. – Поперечное распределение объемной активности приземного слоя ($z = 1,5$ м) устойчивого (1) и неустойчивого (2) состояний атмосферы на различных расстояниях от источника выбросов ($x = 1000, 6000$ м) при скорости конвективного потока $w = -0,05$ м/с (а, б)

На рисунке 7 (а – е) приведены результаты расчётов высотного распределения объемной активности $q(x = \text{const}, y = 0, z, w)$ для устойчивого (1, 2) и неустойчивого (3) состояний атмосферы при различной скорости конвективного потока w .

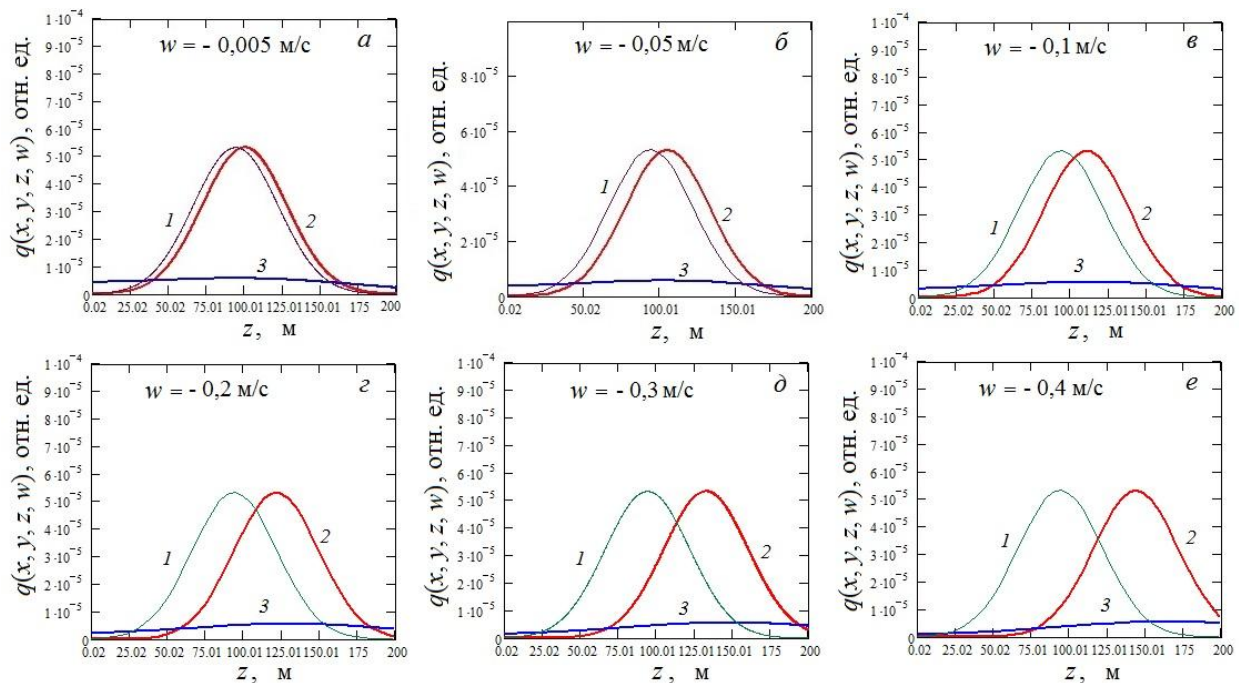


Рис. 7. – Высотное распределение объемной активности радиоактивной примеси $q(x, y, z, w)$, распространяющейся над обширной акваторией при различной скорости конвективного потока w_k , представленной как параметр, для устойчивого (1, 2) и неустойчивого (3) состояний атмосферы при $y = 0$ и фиксированном x . Распределение 1 на рис. а–е получено при скорости конвективного потока равной нулю

Распределение (1), приведенное на графиках, представляет собой высотное распределение радиоактивной примеси при гравитационной скорости оседания примеси равной $w = 0,05$ м/с на фиксированном расстоянии от источника выбросов. Из рисунков следует, что распределение характеризуется максимумом, расположенным на эффективной высоте источника выбросов, что не противоречит известным из

литературы результатам [14]. С ростом расстояния от источника выбросов высотное распределение начинает размываться, но положение максимума изменяется слабо. Кроме того, результаты расчётов показали, что с ростом скорости конвективного потока максимум распределения сдвигается в сторону бóльших высот (см. распределения (2) на рисунке 7 ($a - e$)), а значение крайне низкой объемной активности ($q(x, y, z, w) \sim 0$) оказывается на более высоких уровнях по z , в чем нетрудно убедиться, сравнивая характер распределений объемной активности примеси в области небольших z . При неустойчивом состоянии атмосферы характер распределений также изменяется, но значительно менее заметно (см. распределения 3 на рисунке 7 ($a - e$)), чем при устойчивом.

Приведенные результаты расчёта приводят к мысли, что перенос радиоактивной примеси над поверхностью акваторий, над которой может возникать конвективный воздушный поток со значительной вертикальной скоростью, подобен *эффекту каналирования*, соответствующего переносу радиоактивной примеси в направлении распространения воздушного потока (по ветру) и незначительному осаждению на подстилающую поверхность, которое прекращается (каналирование) по мере того, как воздушный поток, в котором переносится радиоактивная примесь, достигает побережья, где скорость конвективного потока значительно уменьшается или вообще становится равной нулю, в результате чего выпадение примеси на подстилающую поверхность осуществляется обычным образом, но при эффективной высоте $h_{\text{эф},k}$ (см. рис. 8):

$$h_{\text{эф},k} = h_{\text{эф},g} + \Delta h_k, \quad (13)$$

где Δh_k – приращение высоты подъёма струи, обусловленной её «подбросом» конвективным воздушным потоком, возникающей над акваторией, см. рис. 7 ($a - e$).

Но поскольку общая масса радиоактивных выбросов должна сохраняться, то при достижении побережья общая активность радиоактивной примеси, осаждающейся на побережье (и далее), должна быть выше, чем в случае её осаждения на подстилающую поверхность, располагающуюся на таком же расстоянии от источника выбросов, при отсутствии акватории. Кроме того необходимо учитывать, что эффективная высота факела выброса ($h_{\text{эф}}$) после прохождения его над акваторией также увеличится, в чем нас убеждают результаты расчёта, приведенные на рисунке 7 (a, e), в результате чего радиоактивная примесь может осаждаться на значительно больших расстояниях от источника выброса, определяя эффект её «заброса». Такая ситуация приводит к необходимости определения вертикальной скорости конвективного воздушного потока по разности температуры, поднимающегося воздушного потока и окружающего воздуха, (по меньшей мере, в летние месяцы) над акваторией, согласно выражения (12), наряду со стандартными метеорологическими измерениями скорости, температуры и влажности атмосферного воздушного потока, измеряемого на метеоплощадке, относящейся к АЭС и находящейся в ведении лаборатории внешней дозиметрии.

Таким образом, анализ результаты расчётов, приведённых на рисунках 4–7, приводит к следующим выводам:

1) Характер радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности существенно зависит от состояния устойчивости атмосферы, температурного режима подстилающей поверхности и температурного режима акватории, располагающихся вблизи АЭС.

2) Особенности пространственных распределений радиоактивной примеси, распространяющейся в атмосфере через акваторию на побережье, наиболее характерны

для устойчивого состояния атмосферы и, в зависимости от величины вертикальной скорости конвективного подъема воздушного потока, возникающего над акваторией, существенно уменьшают скорость осаждения и величину объемной активности в приземном слое атмосферы, но на подстилающей поверхности побережья, куда распространяется выброс конвективный эффект будет падать, а осаждение примеси – осуществляться традиционно, но эффективная высота распространения факела выбросов после его прохождения над акваторией увеличится на величину Δh_k (см. рис. 8), определяемой формулой (13).

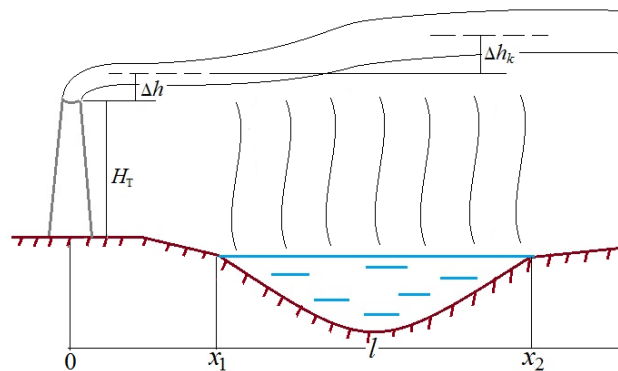


Рис. 8. – Иллюстрация к задаче оценки особенностей загрязнения газоаэрозольной примесью подстилающей поверхности после её прохождения над обширной акваторией

Полученные выводы дают основания получить оценку повышенных значений радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, радиоактивной примесью распространяющейся в атмосфере, при её переносе через обширные акватории.

Для оценки величины повышенного значения радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности в указанной выше ситуации воспользуемся следующей моделью. Будем рассматривать, что стационарный источник радиоактивных выбросов располагается на левом берегу акватории, находящемся на расстоянии x_1 от побережья. Ширина акватории составляет l м. и, соответственно, правый берег расположен на расстоянии x_2 от источника, т.е. $x_2 = x_1 + l$. Наша задача состоит в оценке повышенного значения радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, располагающейся на правом берегу, радиоактивной примесью распространяющейся в атмосфере, при её переносе через рассматриваемую акваторию, т.е. в результате её «заброса». Далее воспользуемся осевыми распределениями, приведенными на рисунке 4 (б и в) и положим $x_1 = 2500$ м, $l = 5000$ м и $x_2 = 7500$ м. При этом положим, что в отсутствии акватории, т.е. на левом ($0 \leq x \leq x_1$) и правом ($x_2 \leq x \leq \infty$) берегах загрязнение радиоактивной примесью, перенос которой происходит слева направо от источника выбросов, осуществляется обычным образом при её гравитационном осаждении со скоростью $w_g = 0,005$ м/с, а над акваторией ($x_1 \leq x \leq x_2$) возникает вертикальная составляющая скорости конвективного воздушного потока $w_k = -0,05$ м/с, препятствующего осаждению радиоактивной примеси (см. рис. 9 б, в).

Осевые распределения радиоактивной примеси для каждого из состояний устойчивости атмосферы приведены на рисунке 9.

Для указанной оценки ограничимся лишь устойчивым состоянием атмосферы, поскольку отличия в распределениях 2 и 2' для неустойчивого состояния слабо выражены (см. распределения 2' на рис. 9 б). Над акваторией вместо распределения 1 на интервале $x_1 \leq x \leq x_2$ будет иметь место распределение 1' (см. рис. 9 б). Но поскольку масса примеси должна сохраняться, она должна быть выброшена на правобережье.

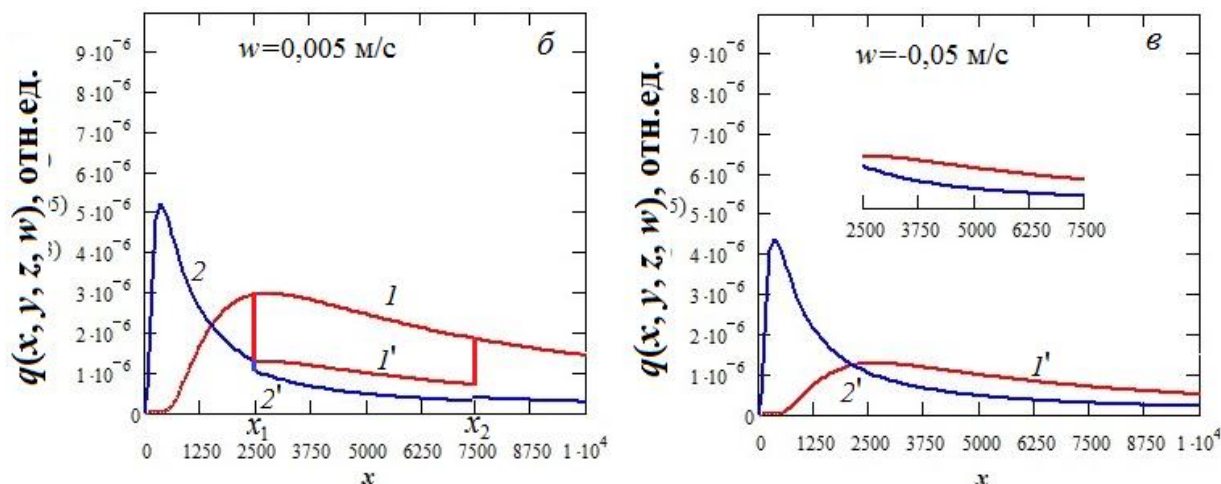


Рис. 9. – Иллюстрация к оценке повышенного значения радиоактивного загрязнения подстилающей поверхности, располагающейся на правом берегу, радиоактивной примесью распространяющейся в атмосфере, при её переносе через рассматриваемую акваторию. Распределения 1, 1' характеризуют объемную активность в приземном слое атмосферы ($z = 1,5$ м) при устойчивом, а 2, 2' – неустойчивом состояниях атмосферы при $y = 0$

Общую массу радиоактивной примеси, заброшенной на правый берег, найдем как разность между как бы осаждающейся (см. распределение 1 на рис. 9 б) на подстилающую поверхность при отсутствии акватории (распределение этой объемной активности описывается функцией $q(x, y, z, h_{эф,г})$) и осаждающейся на воду, когда она проходит над акваторией $q(x, y, z, h_{эф,к})$.

$$\Delta q = \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy \int_0^{\infty} [q(x, y, z, h_{эф,г}) - q(x, y, z, h_{эф,к})] dz. \quad (14)$$

Относительную величину этой разности найдем как отношение:

$$\delta = \frac{\Delta q}{\int_{x_2}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_0^{\infty} q_g(x, y, z, h_{эф,к}) dz}, \quad (15)$$

где $\int_{x_2}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_0^{\infty} q_g(x, y, z, h_{эф,к}) dz$ – общая величина радиоактивной примеси, которая осаждается на интервале $x_2 \leq x \leq \infty$, причём функция $q_g(x, y, z, h_{эф,к})$ на этом интервале рассчитывается при скорости конвективного потока $w_k = 0$, т.е. при его отсутствии над правобережьем, но при $h_{эф,к}$, определяемой формулой (13). Тогда значение объемной активности в области $x_2 \leq x \leq \infty$ с учётом эффекта «заброса» радиоактивной примеси найдем в виде произведения:

$$q_g(x, y, z, h_{эф,к})(1 + \delta). \quad (16)$$

Очевидно, что подобный метод оценки является весьма упрощенным, но, тем не менее, дает реальную возможность получить представление об избыточной величине загрязнения подстилающей поверхности и воздушного бассейна радиоактивной примесью в случае выполнения указанных условий. Несомненно, что для более корректной оценки расчёты следует проводить, используя, по меньшей мере, модель пограничного слоя атмосферы, учитывать топографию подстилающей поверхности, особенности формирования конвективного потока, эффективную высоту его подъема, глубину проникновения на побережье, взаимодействие с воздушным потоком,

формирующим перенос примеси в атмосфере и другие метеорологические характеристики. Как отмечалось выше, для оценки скорости воздушного потока могут быть использованы измерения разности температуры над акваторией. Для этой цели можно использовать современное, но далеко не дешевое оборудование (содары, лидары)*, позволяющее измерять температуру [15] и трёхмерную скорость воздушного потока в 800 метровом слое атмосферы [16], начиная где-то с 20 м, или просто измерять температуру воздушной среды, используя шаропилотное зондирование атмосферы [17, 18].

Необходимо отметить, что подобные проблемы «заброса» примеси, распространяющейся через обширную акваторию, характерны не только для радиационных аварий, но, скорее всего, для штатной работы предприятий химической, черной и цветной металлургической промышленности [19]. Своевременное принятие мер, позволяющих учесть этот эффект на указанных производствах, даст возможность улучшить экологию окружающей среды, производственные условия для сотрудников указанных производств, что, в конечном итоге, приведет к повышению качества общих жизненных условий и увеличению продолжительности жизни населения РФ, проживающего в регионах, где располагаются подобные производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурман, А. Местные ветры [Текст] / А. Бурман. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 341 с.
2. Вальтищев, Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование [Текст] / Н.Ф. Вальтищев. Сб. лекций. – Женева, 1988. – 136 с.
3. Eastman J.L., Pielke R.A., Lyons W.A. Comparison of lake-breeze model simulations with tracer data. J. Appl. Meteor., 1995, Vol. 34, pp. 1398–1418.
4. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей [Текст] /Под. ред. Ньистадта Ф.Т.М., Ван-Допа Х. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 350 с.
5. Руководство по краткосрочным прогнозам [Текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – Ч.1. – С. 91.
6. Бызова, Н.Л. и др. О граничном условии в задачах рассеяния примеси в атмосфере [Текст] / Н.Л. Бызова, М.А. Кротова, Г.А. Натанзон // Метеорология и гидрология. – 1980. – №2. – С. 14–20.
7. Лайхтман, Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы [Текст] / Д.Л. Лайхтман. – Л.: Гидромет. изд-во, 1970. – 340 с.
8. Елохин, А.П. и др. К вопросу об использовании криогенных технологий для утилизации ИРГ и радиоактивных аэрозолей при выбросах ОИАЭ [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Г.Ю. Цфасман, В.Б. Воротынцев, А.Л. Шуяков, С.В. Семенов // Nuclear Mesurement & Information Technologies. Ядерные измерительно-информационные Технологии. – 2012. – №3(43). – С. 4–20.
9. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : Монография [Текст] / А.П. Елохин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
10. Бобылева, М.М. Расчет характеристик турбулентности в планетарном пограничном слое атмосферы // Труды Ленинградского Гидрометеорологического института. – Вып. 40 (Некоторые вопросы физики пограничного слоя в атмосфере и море). – Л., 1970. – С. 64–73.
11. Елохин, А.П. и др. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население [Текст] / А.П. Елохин, М.В. Жилина, Д.Ф. Рау, Е.А. Иванов. РБ–053–10. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, М., 2010. – 79 с.

*Содар – метеорологический акустический доплеровский локатор предназначен для оперативной дистанционной диагностики высотно-временной структуры области интенсивного турбулентного теплообмена в нижнем слое атмосферы над точкой наблюдения, а также измерения профилей скорости и направления ветра.

Лидары – лазерные локаторы, работающие в видимом или ближнем ИК-диапазонах длин волн. В 1960–1970 гг. лидары использовались в основном в военной технике. В настоящее время они с успехом применяются для решения многих атмосферных задач: мониторинга состояния атмосферы, измерения скорости ветра и т.п. Основой аппаратуры лидара служит импульсный СО₂-лазер с поперечной накачкой, одномодовым излучением и длиной волны 10,6 мкм.

12. Елохин, А.П. Автоматизированные системы контроля радиационной обстановки окружающей среды : Учебное пособие [Текст] / А.П. Елохин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 316 с.
13. Матвеев, Л.Т. Физика атмосферы [Текст] / Л.Т. Матвеев. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 701 с.
14. Гусев, Н.Г. и др. Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник [Текст] / Н.Г. Гусев, В.А. Беляев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.
15. Комплексные измерения климатических параметров атмосферы [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: URL: <http://researchpark.spbu.ru/equipment-geomodel-rus/1274-geomodel-izmereniye-klimaticheskikh-parametrov-atmosferi> – 03.05.2017.
16. Стерлядкин, В.В. и др. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы [Электронный ресурс] / В.В. Стерлядкин, А.Г. Горелик, Г.Г. Щукин. – Режим доступа: URL: www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lection-2013/pdf/lec_2.pdf.12 – 03.05.2017.
17. Иванов, В.Э. и др. Радиозондирование атмосферы [Текст] / В.Э. Иванов, М.Б. Фридзон, С.П. Ессяк. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. – С. 596.
18. Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. *Journal of Geophysical Research*, 2010, Vol.115, pp. 1–16.
19. Стародубцев, И.А. и др. К вопросу об использовании автоматизированных систем контроля экологической обстановки на территориях, прилегающих к предприятиям черной, цветной металлургической и атомной промышленности [Текст] / И.А. Стародубцев, А.П. Елохин // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №4(17). – С. 15–34.

REFERENCES

- [1] Burman A. Mestnye vetry [Local Winds]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 1969. 341 p. (in Russian)
- [2] Valtishhev N.F. Mezometeorologiya i kratkosrochnoe prognozirovanie. Sbornik lekcij [Mesometeorology and Short-Term Forecasting]. Zheneva, 1988, 136 p. (in Russian)
- [3] Eastman J.L., Pielke R.A., Lyons W.A. Comparison of lake-breeze model simulations with tracer data. *J. Appl. Meteor.*, 1995, Vol. 34, pp. 1398–1418. (in English)
- [4] Atmosfernaya turbulentnost i modelirovanie rasprostraneniya primesej [Atmospheric Turbulence and Modeling of Impurity Distribution]. Pod redakciej [Edited by] Nistadt F.T.M., Van-Dop KH. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 1985, 350 p. (in Russian)
- [5] Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam [Guide to Short-Term Forecasts]. Leningrad. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 1986, Part 1, p. 91. (in Russian)
- [6] Byzova N.L., Krotova M.A., Natanzon G.A. O granichnom uslovii v zadachakh rasseyaniya primesi v atmosphere [On the Boundary Condition in Problems of Impurity Scattering in the Atmosphere]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 1980, №2, pp. 14–20. (in Russian)
- [7] Lajkhtman D.L. Fizika pogrannichnogo sloya atmosfery [Physics of Atmosphere Boundary Layer]. Leningrad. Pub. Gidrometeorologicheskoe izdatelstvo [Hydrometeorological Publishing House], 1970, 340 p. (in Russian)
- [8] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Cfasman G.Yu., Vorotyncev V.B., Shuyakov A.L., Semenov S.V. K voprosu ob ispol'zovanii kriogennykh tekhnologij dlya utilizacii IRG i radioaktivnykh ae'rozolej pri vybrosakh OIAE [The Issue of the Use of Cryogenic Technologies for the IRH Disposal and Radioactive Aerosols during OIAE Emissions] *Nuclear Mesurement & Information Tecnologies. Yadernye izmeritel'no-informacionnye Tekhnologii*, 2012, №3(43), pp. 4–20. (in Russian)
- [9] Elokhin A.P. Metody i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushhej sredy : Monografiya [Methods and Means of Radiation Monitoring Systems of the Environment: Monograph]. M. Pub. NIYaU MIFI [NRNU MEPhI], 2014, 520 p. (in Russian)
- [10] Bobyleva M.M. Raschet kharakteristik turbulentnosti v planetarnom pogrannichnom sloe atmosfery [Calculation of Turbulence Characteristics in a Planetary Boundary Layer of the Atmosphere]. *Trudy Leningradskogo Gidrometeorologicheskogo institute* [Works of the Leningrad Hydrometeorological institute]. Issue 40. Leningrad. 1970, pp. 64–73. (in Russian)
- [11] Elokhin A.P., Zhilina M.V., Rau D.F., Ivanov E.A. Polozhenie o povyshenii tochnosti prognosticheskikh ocenok radiacionnykh kharakteristik radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushhej sredy i dozovykh nagruzok na personal i naselenie. RB-053-10. Federal'naya sluzhba po e'kologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Regulation on Improving the Accuracy of Predictive Estimates of Radiation Characteristics of Environment Radioactive Contamination and Dose Loads on Personnel and Population. RB-053-10. Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision]. M. 2010, 79 p. (in Russian)
- [12] Elokhin A.P. Avtomatizirovannye sistemy kontrolya radiacionnoj obstanovki okruzhayushhej

- sredy : Uchebnoe posobie [Automated Systems for Monitoring the Radiation Environment: Textbook]. M. Pub. NIYaU MIFI [NRNU MEPhI], 2012, 316 p. (in Russian)
- [13] Matveev L.T. Fizika atmosfery [Atmosphere Physics]. SPb. Pub. Gidrometeoizdat [Gidrometeoizdat], 2000, 701 p. (in Russian)
- [14] Gusev N.G., Belyaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosfere. Spravochnik [Radioactive Emissions in the Biosphere. Reference book]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1986, 224 p. (in Russian)
- [15] Kompleksnye izmereniya klimaticheskikh parametrov atmosfery [Complex Measurements of Climatic Parameters of the Atmosphere]. 2017. Available at: <http://researchpark.spbu.ru/equipment-geomodel-rus/1274-geomodel-izmereniye-klimaticheskikh-parametrov-atmosferi> (in Russian)
- [16] Sterlyadkin V.V., Gorelik A.G., Shhukin G.G. Obzor metodov i sredstv vetrovogo zondirovaniya atmosfery [Review of Methods and Means of Atmosphere Wind Intubation]. Available at: www.mivlgu.ru/conf/armand2013/lection-2013/pdf/lec_2.pdf (in Russian)
- [17] Ivanov V.E., Fridzon M.B., Essyak S.P. Radiozondirovanie atmosfery [Radio Intubation of the Atmosphere]. Ekaterinburg: Pub. UrO RAN [Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2004, pp. 596. (in Russian)
- [18] Sun B., Reale A., Seidel D.J., Hunt D.C. Comparing radiosonde and COSMIC atmospheric profile data to quantify differences among radiosonde types and the effects of imperfect collocation on comparison statistics. *Journal of Geophysical Research*, 2010, Vol.115, pp. 1–16. (in English)
- [19] Starodubcev I.A., Elokhin A.P. K voprosu ob ispol'zovanii avtomatizirovannykh sistem kontrolya e'kologicheskoy obstanovki na territoriyakh, prilgayushhikh k predpriyatiyam chernoj, cvetnoj metallurgicheskoy i atomnoj promyshlennosti [The issue of the Use of Automated Environmental Monitoring Systems in the Territories Adjacent to the Enterprises of the Black, Non-Ferrous Metallurgical and Nuclear Industries]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global nuclear safety]. 2015, №4(17), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 15–34. (in Russian)

Peculiarities of Underlying Surface Pollution by Radioactive Gasoerosol Impurity after its Passage over Extensional Water Areas

A.P. Elokhin*, M.V. Zhilina**

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

** e-mail: elokhin@yandex.ru*

ORCID: 0000-0002-7682-8504

WoS ResearcherID: G-9573-2017

*** e-mail: mashazhilina@mail.ru*

ORCID:0000-0002-7752-6727

WoS ResearcherID : K-5685-2017

Abstract – The issue of radioactive contamination of the underlying surface with a gas-aerosol radioactive admixture after its passage over vast water areas within the framework of a hypothetical radiation accident is considered. The peculiarity of passing the admixture over the water area consists in increasing the effective altitude of the emission flare due to the interaction of the jet with the convective airflow emerging over the water area in the summer season. It is shown that the deposition of a radioactive impurity in this case decreases significantly over the water area and it increases over the underlying surface which reaches the air flow during its passage. The article gives a method of estimating and substantiating this effect, which requires measuring the temperature difference of the convective airflow, or directly the vertical component of its velocity, or other meteorological characteristics determining this parameter.

Keywords: underlying surface, water area, radioactive contamination, convective airflow, atmosphere stability state, surface impurity concentration.

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

УДК 621.382:539.12.04

**СТАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПАРАТОРОВ И
ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ БАЗОВОГО
СТРУКТУРНОГО КРИСТАЛЛА МН2ХА010 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ¹**

© 2017 О.В. Дворников*, В.Л. Дятлов*, Н.Н. Прокопенко^{***}, В.А. Чеховский^{****},
И.В. Пахомов^{**}, А.В. Бугакова^{**}

** ОАО “Минский научно-исследовательский приборостроительный институт”,
Минск, Республика Беларусь*

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

**** Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,
Зеленоград, Московская обл., Россия*

***** Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
Минск, Республика Беларусь*

Исследовано влияние гамма-излучения ⁶⁰Со со средней энергией 1,25 МэВ на статические параметры двух аналоговых компонентов (АК) нового базового структурного кристалла (БСК) МН2ХА010 – компаратора напряжений (КН) и зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ). Установлено, что примененные при разработке БСК конструктивно-схемотехнические решения, учитывающие особенности радиационного изменения параметров комплементарных биполярных и полевых транзисторов, обеспечивают незначительное изменение статических параметров АК при поглощенной дозе гамма-излучения $D_G = 2,04$ Мрад.

Ключевые слова: компаратор напряжений, зарядочувствительный усилитель, базовый структурный кристалл, аналоговый интерфейс датчика, аналоговая интегральная схема, радиационная стойкость, гамма-излучение.

Поступила в редакцию: 20.04.2017

ВВЕДЕНИЕ

Для ускоренной разработки радиационно-стойких аналоговых интерфейсов датчиков в 2016г. разработан базовый структурный кристалл БСК МН2ХА010 [1-3], использующий в качестве элементной базы комплементарные биполярные транзисторы (КБТ), полевые транзисторы с р-каналом (р-ПТП) и ряд новых конструктивно-схемотехнических решений [1-3], учитывающих особенности радиационного изменения параметров активных элементов.

Схемотехническое моделирование аналоговых компонентов БСК с применением моделей КБТ и р-ПТП [4], описывающих влияние гамма-излучения и потока нейтронов, а также экспериментальное изучение радиационного изменения параметров операционного усилителя (ОУ), идентичного ОУ применяемому в БСК по

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122).

схемотехнике и технологии изготовления [5], позволило предположить, что другие АК микросхемы МН2ХА010 также характеризуются высокой радиационной стойкостью.

Целью статьи является рассмотрение результатов экспериментального исследования влияния гамма-излучения на основные статические параметры [6-8] двух функциональных ячеек БСК – компаратора напряжений (КН) и зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) БСК.

ОСОБЕННОСТИ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ БСК МН2ХА010

При разработке аналоговых компонентов БСК были учтены особенности радиационного изменения параметров транзисторов, а также основные правила проектирования радиационно-стойких микросхем [9].

В аналоговых компонентах БСК для обеспечения радиационной стойкости применены n - p - n - транзисторы с граничной частотой (f_T) более 2,2 ГГц, p - n - p - f_T более 1,5 ГГц [10]. Резисторы, выполнены на низкоомных полупроводниковых слоях p и p^+ базы n - p - n - транзистора. Все транзисторы работают с большой плотностью эмиттерного тока, обеспечивающей минимальное радиационное изменение β .

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ГАММА КВАНТАМИ

Облучение образцов БСК гамма-квантами ^{60}Co выполнялось с мощностью дозы гамма-излучения 12,4 рад/с. Суммарная поглощенная доза D_G после сеансов облучения составила: 0,1; 0,201; 0,502; 1,04; 2,04 Мрад. Облучение образцов с закороченными выводами проводилось при температуре около 300 К.

Измерения параметров КН и ЗЧУ выполнялись сразу после облучения на 5 образцах БСК. Продолжительность измерения параметров КН и ЗЧУ составляла около 2 часов. Применялся комплект оборудования, включающий: цифровой осциллограф «Infiniium» HP 54830B; выносной пробник 10073C; генератор сигналов произвольной формы Agilent 33250A; аттенюатор Agilent 8494G; двухканальный источник питания Agilent E3646; интерфейсный модуль USB – GPIB Agilent 82357B; систему сбора данных Agilent 34970A с набором управляющих модулей; персональный компьютер.

Измерительное оборудование было объединено в единую систему на основе шины GPIB. Управление выполнялось с помощью разработанного в среде «Agilent VEE» специализированного программного обеспечения для автоматизированного определения характеристик микросхем.

Амплитудные параметры сигналов определялись с точностью не хуже 0,5 мВ, что обеспечивалось автоматизированной калибровкой тракта вертикального отклонения осциллографа, статистической обработкой и цифровой фильтрацией результатов измерений. Большинство измерений проводилось в автоматическом режиме. Их результаты записывались в *.txt файл, дальнейшая обработка которого производилась в среде MS EXCEL с помощью стандартных средств.

ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Каждая функциональная ячейка ФЯ5 БСК [11] включает ЗЧУ (рис. 1).

Кроме этого, ФЯ5 содержит 4 конденсатора с емкостью 1 пФ, 2 резистора типа 2R8u (последовательное соединение резисторов с сопротивлением 0,65 кОм и 1,4 кОм), 2 резистора типа 2R4u (последовательное соединение резисторов с сопротивлением 1,4 кОм и 2,7 кОм), 3 защитных диода.

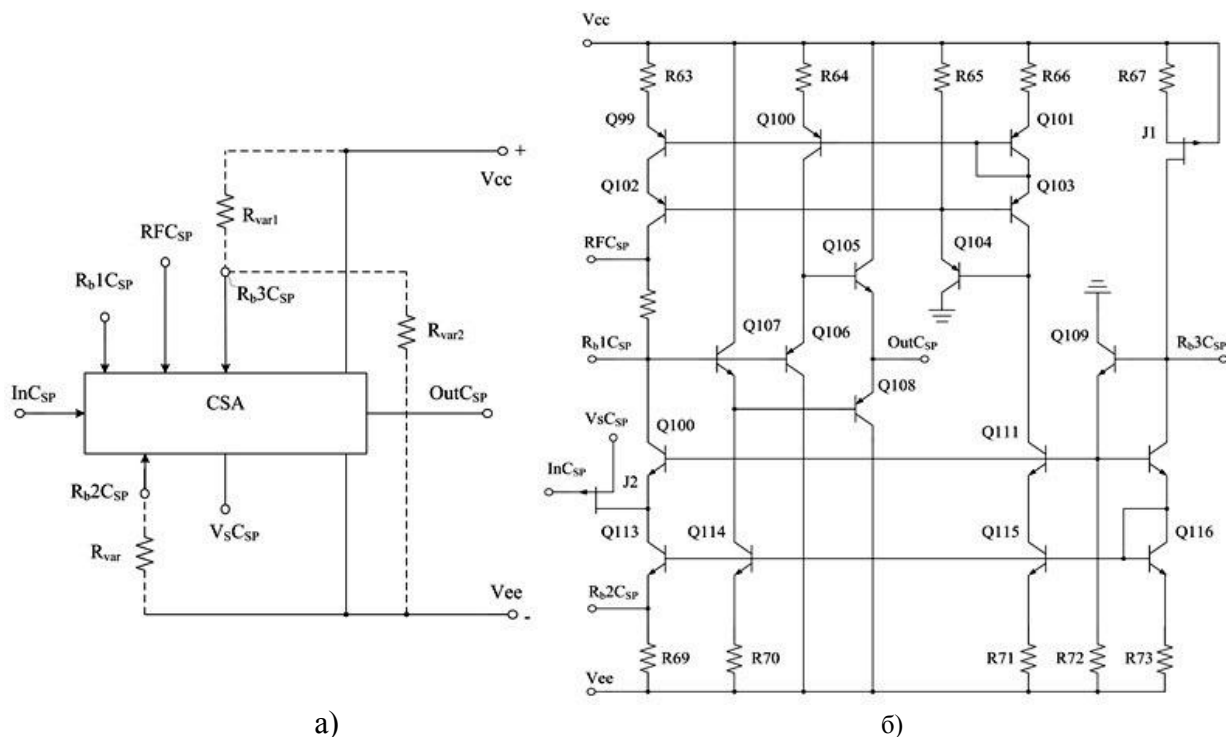


Рис. 1. – Зарядочувствительный усилитель (ФЯ5) (а) и его электрическая схема (б).

ЗЧУ содержит «перегнутый» каскод с входным полевым транзистором J2, *n-p-n*-транзистором с общей базой (Q100) и активной нагрузкой на каскодном составном *p-n-p*- транзисторе (Q99, Q102), а также эмиттерным повторителем на КБТ [3]. Цепь для емкостной обратной связи в ЗЧУ отделена от цепи резистивной обратной связи, устанавливающей нулевое выходное напряжение покоя при отсутствии входного сигнала. Основные параметры ЗЧУ (коэффициент преобразования, длительность фронта нарастания и спада) определяются, в основном, элементами обратной связи. В то же время, в нормальных условиях выходное напряжение покоя при сопротивлении резистора обратной связи $R_F=10$ МОм не превышает 100 мВ, а максимальный выходной импульс напряжения ЗЧУ (от минимального до максимального значения) – более 7 В.

Общую обратную емкостную связь в ЗЧУ образует конденсатор, включаемый между выводами InCsp и OutCsp, а обратную резистивную связь – резистор между InCsp и RFCsp. Это сделано для того, чтобы при типовых параметрах входного полевого транзистора выходное напряжение на выводе OutCsp было около нуля при отсутствии входного сигнала. На вывод VsCsp подают нулевой потенциал, но изменяя потенциал на этом выводе можно регулировать выходное напряжение при отсутствии входного сигнала. Резистором Rvar можно изменить ток стока и крутизну головного полевого транзистора ЗЧУ.

Зависимость тока потребления I_{CC} и выходного напряжения U_{OO} для покоя 5 экземпляров ЗЧУ от поглощённой дозы гамма-излучения приведены на рисунке 2. Измерения проводились при двух значениях напряжения питания ($\pm 4,5$ В и $\pm 5,5$ В), но на рисунке 2 использовались данные для наихудшего случая.

Так как ЗЧУ (рис. 1) функционирует по схеме с обратной связью, которая вводится через резистор с сопротивлением 10 МОм, то падение напряжения на этом резисторе, вызванное током затвора входного полевого транзистора, вносит значительный вклад в радиационную зависимость выходного напряжения покоя ЗЧУ. При этом, среднее увеличение U_{OO} составляет 78,9 мВ при $D_G = 2,04$ Мрад.

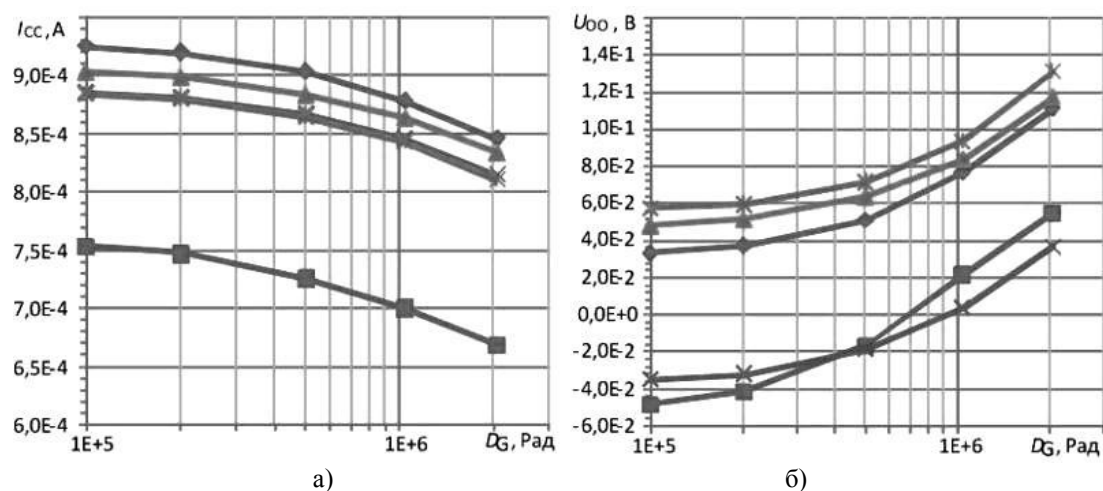


Рис. 2. – Зависимость тока потребления ЗЧУ (а) и выходного напряжения покоя ЗЧУ (б) от поглощенной дозы гамма-излучения D_G

КОМПАРАТОР НАПРЯЖЕНИЙ

Каждая функциональная ячейка ФЯ 6 БСК содержит компаратор (рис. 3), 3 резистора 2R8u и 6 резисторов 2R4u [11].

Схема компаратора напряжений (рис. 3) [11] включает три дифференциальных каскада (ДК), два из которых имеют резистивную нагрузку, а третий (выходной) выполнен по схеме с «открытым» коллектором. Для уменьшения эффекта Миллера в ДК используют каскодное включение *n-p-n*- транзисторов. Согласование входного и промежуточного ДК выполнено на основе эмиттерных повторителей, которые одновременно выполняют функции цепи смещения потенциалов. Статический режим транзисторов КН устанавливается многокаскадным «токовым зеркалом». В компараторе применены только *n-p-n*- транзисторы.

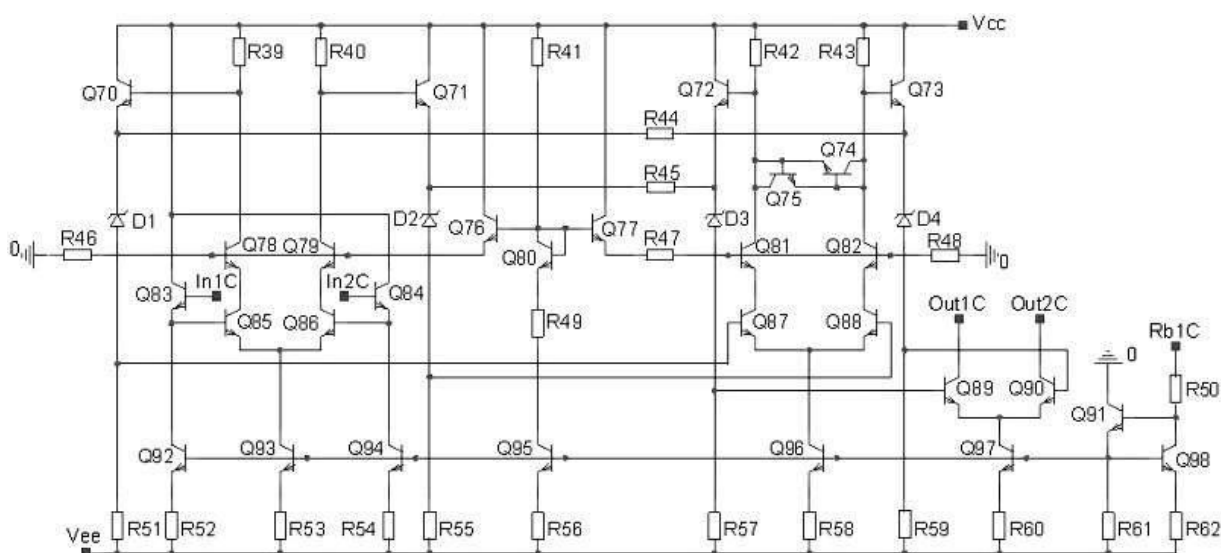


Рис. 3. – Электрическая схема компаратора

Результаты измерений зависимостей некоторых параметров для 5 экземпляров КН от поглощённой дозы гамма-излучения представлены на рисунке 4.

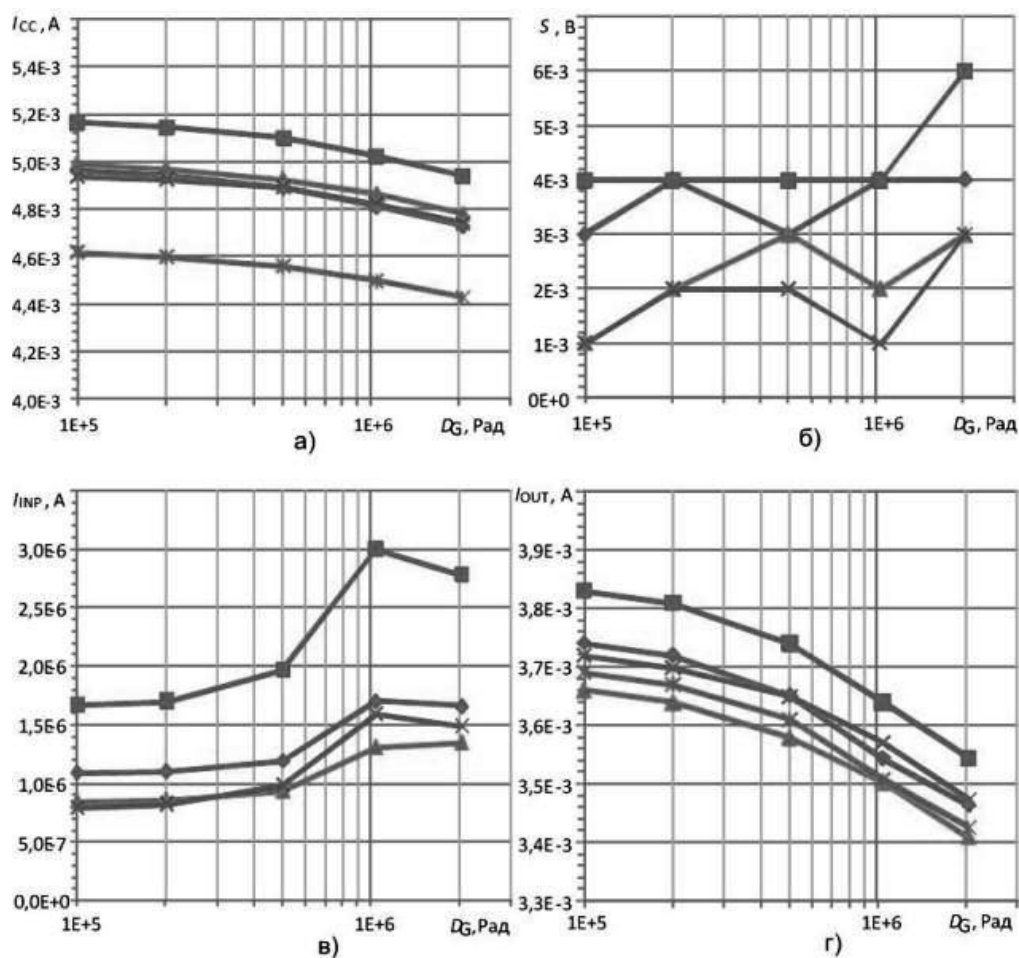


Рис. 4. – Зависимость тока потребления КН (а), чувствительности S компаратора (б), входного тока КН (в) и выходного тока КН (г) от поглощенной дозы гамма-излучения D_G

Зависимость выходного тока компаратора от поглощенной дозы гамма-излучения в большей степени обусловлена уменьшением рабочих токов. Так, I_{OUT} уменьшился в среднем на 7,2 %, в то время как ток потребления компаратора уменьшился на 4,3 %.

Входной ток компаратора при $D_G = 2,04$ Мрад возрастает в среднем на 65 %, что, главным образом, объясняется падением β входных $n-p-n$ -транзисторов. При $D_G \geq 1$ Мрад наблюдается некоторая стабилизация входного тока, что качественно соответствует зависимости $\beta = f(D_G)$ $n-p-n$ -транзисторов.

ВЫВОДЫ

Новые конструктивно-схемотехнические решения [10-13] аналоговых компонентов микросхемы МН2ХА010, учитывающие особенности радиационного изменения параметров транзисторов и основные правила проектирования радиационно-стойких BiJFet микросхем [14-20], обеспечили сравнительно малое изменение основных статических параметров компараторов и зарядочувствительных усилителей БСК при воздействии гамма-излучения ^{60}Co со средней энергией 1,25 МэВ и поглощенной дозой до 2,04 Мрад.

При этом обнаружено незначительное уменьшение выходного тока компаратора (на 7,2 %), а также увеличение входного тока КН на 65 %.

Ток потребления зарядочувствительно усилителя уменьшается на 12 %, а среднее увеличение выходного напряжения покоя ЗЧУ составляет 78,9 мВ при поглощенной дозе $D_G = 2,04$ Мрад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дворников О.В.* Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах / Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова // Труды СПИИРАН–2016. Вып. 2 (45). С. 157–171. DOI: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.45.10>
2. *Дворников О.В.* Разработка многоканальных систем считывания сигналов фотоприемников на базовом структурном кристалле МН2ХА010 / В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Н.Н. Прокопенко // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XIII научно-технической конференции (г. Сочи, 12-18 сентября 2016 г.). Калуга: Манускрипт, 2016. С. 273 – 278.
3. *Dvornikov O.V.* The Design of the Circuits of Radiation-Hardened Charge-Sensitive Amplifiers Based on the Structured Array (МН2ХА010) and Array Chip (AC-2.1) / V.A. Tchekhovski, N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). In 12 Volumes. Vol. 1. Part 1. Novosibirsk, 2016. Pp. 253- 258. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802268
4. *Дворников О.В.* Комплексный подход к проектированию радиационностойких аналоговых микросхем. Часть 1. Учет влияния проникающей радиации в “Spice-подобных” программах / В.Н. Гришков // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2010. Сборник трудов IV Всероссийской научно-технической конференции / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 301-306.
5. *Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Prokopenko N.N.* Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. Russian Microelectronics. 2016. V. 45, No. 1. pp. 54-62. DOI: 10.1134/S10 63739716010030
6. *Дворников О.В.* Изменение параметров комплементарных биполярных транзисторов при воздействии ионизирующих излучений / В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский // Вопросы атомной науки и техники “ВАНТ”, 2015. С. 17-22/
7. *Дворников О.* Применение структурных кристаллов для создания интерфейсов датчиков / В. Чеховский, В. Дятлов, Н. Прокопенко // Современная электроника. 2014. № 1. С. 32–37.
8. *Дворников О.* Интерфейсы датчиков для систем на кристалле / В. Чеховский, В. Дятлов, Н. Прокопенко // Современная электроника, 2013. № 8. С. 40–47.
9. *Дворников О.В.* Радиационно-стойкие аналоговые интегральные схемы / В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (2012). Сб. трудов; под общ.ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2012. С. 280-283.
10. *Dvornikov O.V.* Operation-routing sequence of production of the radiation-hardened microcircuits of the structured array МН2ХА010 for multichannel sensor systems / О.А.Bozhatkin, N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova, N.V. Butyrlagin // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2016), September 22-23, 2016, Saratov, Russia.
11. *Дворников О.В.* Проектирование радиационно-стойких аналоговых процессоров и преобразователей сигналов датчиков на основе базового структурного кристалла МН2ХА010 / Н.Н. Прокопенко, И.В. Пахомов, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова // М.: Радиотехника, №2, 2016, с. 108-115.
12. *Dvornikov O.V.* The Drivers of the Differential Communication Lines based on Radiation-Hardened Structured Array МН2ХА010 / N. N. Prokopenko, I.V. Pakhomov, A.V. Bugakova // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14 – 17, 2016. Pp. 290-293. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807728
13. *Dvornikov O.V.* The Radiation-Hardened Microcircuits of the Multichannel Op Amps with Current Feedback and the Analog Interfaces Based on the Structured Array МН2ХА010 / N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova, A.A. Ignashin // Proceedings of 2016 International Siberian Conference On Control And Communications (SIBCON'2016), Russia Moscow MAY 12–14, 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491790
14. *Дворников О.В.* Новая микросхема базового матричного кристалла АБМК-2.1 для проектирования радиационно-стойких аналоговых и аналого-цифровых интерфейсов датчиковых систем / В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Н.Н. Прокопенко // Радиотехника, 2016, № 6, с.163-168.
15. *Titov A.E.* The Radiation-Hardened Instrumentation Amplifier Based on the Differential Difference Operational Amplifier for BiJFET Technological Process / N.N. Prokopenko, E.A. Zhebrun, N.V. Butyrlagin. // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), 26 – 29 Sep. 2015.

- Batumi, Georgia. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493132
16. *Prokopenko N.N.* The Radiation-Hardened BiJFet Differential Amplifiers with Negative Current Feedback on the Common-Mode Signal / O.V. Dvornikov, N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova // 2016 13th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2016). Novosibirsk, October 3-6, 2016. In 12 Vol. Vol. 1. Part 1. Pp. 104-108 DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802224
 17. *Starchenko E.I.* The Radiation-Hardened Voltage References On Bipolar and JFET Transistors / N.N. Prokopenko, P.S. Budyakov // Proceedings of the 8th IEEE GCC Conference and Exhibition, Muscat, Oman, 1-4 February, 2015. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/IEEEGCC.2015.7060065
 18. *Prokopenko N.N.* The Radiation-Hardened Differential Stages and Op Amps without Classical Reference Current Source / O.V. Dvornikov, I.V. Pakhomov, N.V. Butyrlagin // 2015 Conference on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS), September 14th– 18th, 2015, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365681
 19. *Prokopenko N.N.* The Differential Difference Amplifiers of Sensor Systems with Input Transistors of Various Physical Nature / N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova, I.V. Pakhomov // ICSES 2016 International Conference on Signals and Electronic Systems, Krakow, Poland, 5-7 September, 2016, pp.135-138.
 20. *Prokopenko N.N.* The Reconfigurable Radiation-Hardened Differential Difference Operational Amplifier and its Main Connection Circuits in Sensor Systems / O.V. Dvornikov, N.V. Butyrlagin, I.V. Pakhomov // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), 26 – 29 Sep. 2015. - Batumi, Georgia. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493108

REFERENCES

1. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. Perspektivy primeneniya novykh mikroskhem bazovogo matrichnogo i bazovogo strukturnogo kristallov v datchikovykh sistemakh [Perspectives of application of new chips of analog master slice array (AGAMC-2.1) and configurable structured array (MH2XA010) of crystals (JSC MNIPI, Minsk) in the radiation-hardened sensor systems of robots and analog processors]. SPIIRAS Proceedings. 2016. Issue 2(45). pp. 157–171. DOI: <http://dx.doi.org/10.15622/sp.45.10> (in Russian).
2. Dvornikov O.V. Chekhovsky V.A., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N. Razrabotka mnogokanal'nykh sistem schityvaniya signalov fotopriemnikov na bazovom strukturnom kristalle MH2XA010 [Development of Multichannel Systems for Reading Signals from Photodetectors on a the Structured Array MH2XA010]. Earth observation, monitoring and remote sensing systems. Materials of the XIIIth Science and Technology Conference (Sochi, September 12-18, 2016). Kaluga: The Manuscript, 2016. pp. 273–278. (in Russian).
3. Dvornikov O.V. The Design of the Circuits of Radiation-Hardened Charge-Sensitive Amplifiers Based on the Structured Array (MH2XA010) and Array Chip (AC-2.1) / V.A. Tchekhovskij, N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). In 12 Volumes. Vol. 1. Part 1. Novosibirsk, 2016. Pp. 253- 258. DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802268 (in English).
4. Dvornikov O.V. Radiation hardened analog IC design. Part 1. Radiation effects simulation in the "Spice-like" programs / V.N. Grishkov // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2010. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2010. P. 301-306. (in Russian).
5. Dvornikov O.V., Tchekhovskij V.A., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. Russian Microelectronics. 2016. V. 45, No. 1. pp. 54-62. DOI: 10.1134/S10 63739716010030 (in Russian).
6. Dvornikov O.V. Izmenenie parametrov komplementarnykh bipolyarnykh tranzistorov pri vozdeystvii ioniziruyushchikh izluchenyi [Changing the complementary bipolar transistors when exposed to ionizing radiation] / V.A. Chehovskij, V.L. Dyatlov, Ju.V. Bogatyrev, S.B. Lastovskij // Voprosy atomnoj nauki i tehniki "VANT" – Problems of Atomic Science and Technology "PAST". 2015. pp. 17-22. (in Russian).
7. Dvornikov O. Primenenie strukturnykh kristallov dlya sozdaniya interfeysov datchikov [The use of structural crystals to create a sensor interface] / V. Chehovskij, V. Dyatlov, N. Prokopenko // Sovremennaja jelektronika – Modern electronics. 2014. Vol. 1. pp. 32–37.
8. Dvornikov O., Interfejsy datchikov dlya sistem na kristalle [Sensor interface for systems-on-chip] / V. Tchekhovskij, V.Dziatlau, N. Prokopenko // Sovremennaja jelektronika [Modern electronics], 2013, № 8, pp. 40–47 (in Russian).

9. Dvornikov O.V. Radiatsionno-stoykie analogovye integral'nye skhemy [Radiation hardened analog IC] / V.A. Tchekhovskii, V.L. Diatlov, Yu.V. Bogatyrev, S.B. Lastovski // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2012. Proceedings / edited by A. Stempkovsky, Moscow, IPPM RAS, 2012. P. 280-283. (in Russian).
10. Dvornikov O.V. Operation-routing sequence of production of the radiation-hardened microcircuits of the structured array MH2XA010 for multichannel sensor systems / O.A.Bozhatkin, N.N. Prokopenko, A.B. Bugakova, N.V. Butyrlagin // 2016 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE-2016), September 22-23, 2016, Saratov, Russia. (in English).
11. Dvornikov O.V. Design of the radiation-hardened analog processors and signal converters of the sensors systems based on basic structural crystal MH2XA010 / N.N. Prokopenko, I.V. Pakhomov, N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova // Radiotekhnika № 2, 2016. Pp. 107-113 (in Russian).
12. Dvornikov O.V. The Drivers of the Differential Communication Lines based on Radiation-Hardened Structured Array MH2XA010 / N. N. Prokopenko, I.V. Pakhomov, A.V. Bugakova // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), Yerevan, Armenia, October 14 – 17, 2016. Pp. 290-293. DOI: 10.1109/EWDTS.2016.7807728 (in English).
13. Dvornikov O.V. The Radiation-Hardened Microcircuits of the Multichannel Op Amps with Current Feedback and the Analog Interfaces Based on the Structured Array MH2XA010 / N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova, A.A. Ignashin // Proceedings of 2016 International Siberian Conference On Control And Communications (SIBCON'2016), Russia Moscow MAY 12–14, 2016. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491790 (in English).
14. Dvornikov O.V. New microcircuit of the master slice array MSA-2.1 for the design of the radiation-hardened analog and analog-digital interfaces of the sensor systems / V.A. Chekhovskiy, V.L. Dyatlov, N.N. Prokopenko// Radiotekhnika № 6, 2016. Pp. 163-168. (in Russian).
15. Titov A.E. The Radiation-Hardened Instrumentation Amplifier Based on the Differential Difference Operational Amplifier for BiJFET Technological Process / N.N. Prokopenko, E.A. Zhebrun, N.V. Butyrlagin. // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), 26 – 29 Sep. 2015. Batumi, Georgia. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493132 (in English).
16. Prokopenko N.N. The Radiation-Hardened BiJFet Differential Amplifiers with Negative Current Feedback on the Common-Mode Signal / O.V. Dvornikov, N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova // 2016 13th International conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE – 2016). Novosibirsk, October 3-6, 2016. In 12 Vol. Vol. 1. Part 1. Pp. 104-108 DOI: 10.1109/APEIE.2016.7802224 (in English).
17. Starchenko E.I. The Radiation-Hardened Voltage References On Bipolar and JFET Transistors / N.N. Prokopenko, P.S. Budyakov // Proceedings of the 8th IEEE GCC Conference and Exhibition, Muscat, Oman, 1-4 February, 2015. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/IEEEGCC.2015.7060065 (in English)
18. Prokopenko N.N. The Radiation-Hardened Differential Stages and Op Amps without Classical Reference Current Source / O.V. Dvornikov, I.V. Pakhomov, N.V. Butyrlagin // 2015 Conference on Radiation Effects on Components and Systems (RADECS), September 14th– 18th, 2015, Moscow, Russia. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365681 (in English).
19. Prokopenko N.N. The Differential Difference Amplifiers of Sensor Systems with Input Transistors of Various Physical Nature / N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova, I.V. Pakhomov // ICSES 2016 International Conference on Signals and Electronic Systems, Krakow, Poland, 5-7 September, 2016, pp.135-138. (in English).
20. Prokopenko N.N. The Reconfigurable Radiation-Hardened Differential Difference Operational Amplifier and its Main Connection Circuits in Sensor Systems / O.V. Dvornikov, N.V. Butyrlagin, I.V. Pakhomov // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2015), 26 – 29 Sep. 2015. - Batumi, Georgia. DOI: 10.1109/EWDTS.2015.7493108 (in English).

The Static Parameters of the Comparators and the Charge-Sensitive Amplifiers of the MH2XA010 Structured Array at Gamma Emission Influence²

O.V. Dvornikov^{*1}, V.L. Dyatlov^{*2}, N.N. Prokopenko^{,***3}, V.A. Chekhovskii^{****4},
I.V. Pakhomov^{***5}, A.V. Bugakova^{***6}**

² The research was prepared within the framework of the 16-19-00122 project of the Russian Science Foundation for 2016-2018.

* *Plc., "Minsk Research Instrument-Making Institute"*

Kolasa st., 73, Minsk, Belarus, 220113

¹ *e-mail: Oleg_dvornikov@tut.by*

ORCID: 0000-0001-6450-9090

Scopus Author ID: 6602465259

WoS Researcher ID: I-7207-2013

² *e-mail: nitnelaff@gmail.com*

ORCID: 0000-0002-0325-3121

Scopus Author ID: 56047420100

** *Don State Technical University*

Gagarina sq. 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

³ *e-mail: prokopenko@sssu.ru*

ORCID: 0000-0001-8291-1753

Scopus Author ID: 25227786700

WoS Researcher ID: I-6599-2013

⁵ *e-mail: ilyavpakhomov@sssu.ru*

ORCID: 0000-0001-9861-7153

Scopus Author ID: 56535229400

WoS Researcher ID: E-4208-2017

⁶ *e-mail: annabugakova.1992@mail.ru*

ORCID: 0000-0001-9255-0015

Scopus Author ID: 56543776600

WoS Researcher ID: E-6820-2014

*** *Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences (IPPM RAS)*

Sovetskaya st. 3, Zelenograd, Russia, 124681

**** *Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University*

Bobruiskaya str. 11, Minsk, Belarus, 220030

⁴ *e-mail: vtchek@hep.by*

ORCID: 0000-0002-8653-9482

Scopus Author ID: 57190394579

Abstract – The effect of the ^{60}Co gamma emission with the average energy 1.25 MeV on the static parameters of two analog components (AC) of the MH2XA010 new structured array (SA) – the voltage comparator (VC) and the charge-sensitive amplifier (CSA) is investigated. It is found that the structural design solutions, applied at the development of the SA, which take into consideration the features of the parameter radiation-induced alteration of the complementary BiFETs and p-FET, provide minor changes of the AC static parameters at the absorbed dose of the gamma emission $DG = 2,04$ Mrad.

Keywords: voltage comparator, charge sensitive amplifier, configurable structured array, analog sensor interface, analog integrated circuits, radiation hardness, gamma emission.

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

УДК 528.048

**КОНТРОЛЬ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ АТОМНОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ**

© 2017 Ю.И. Пимшин*, Г.А. Науменко**, Л.В. Постой*, С.М. Бурдаков*

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

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

В статье приведены результаты выполненных работ при выходном контроле изделий атомного машиностроения на примере конструктивной детали порталного крана. Рассмотрена технология выполнения контроля. Сделано заключение, в котором констатируется, что лазерные трекеры, в том числе и измерительная машина марки Vintag, изготавливаемая фирмой Faag, обладают высокой оперативностью решения задач контроля изделий машиностроения. Их программное обеспечение имеет возможность выполнять обработку результатов измерений и подготовку отчетов непосредственно на площадке выполнения работ и выдавать результаты на месте. Обеспечивать точность измерений пространственных координат 0,005–0,01 мм на расстояниях до 10000–15000 мм. Все эти характеристики позволяют рекомендовать машиностроительным предприятиям использование таких и аналогичных измерительных машин для решения задач по контролю геометрических параметров изделий.

Ключевые слова: лазерный трекер, измерения, геометрические параметры, прямолинейность, перпендикулярность, соосность, метрология, метрологические характеристики, точность измерений, допуски.

Поступила в редакцию: 10.03.2017

В первых параграфах практически любого учебника по прикладной геодезии излагается тема связи данной геодезической науки с другими близкими науками их взаимовлияние и взаимодополнение. К родственным наукам относят, как правило, топографию, высшую геодезию, фотограмметрию, аэрофототопографию, астрономическую геодезию, космическую геодезию, картографию, маркшейдерскую, кадастр, землеустройство, дистанционное зондирование и мониторинг земель, геоинформационные технологии, иногда – метрологию. В тоже время в этом перечне, как правило, нигде не упоминается наука о технических измерениях. При этом на наш взгляд при решении задач обеспечения монтажа и наладки оборудования, и, изготовления и сборки крупногабаритной машиностроительной продукции, как никакая другая, наука о технических измерениях, дополняет и взаимно развивает методы прикладной геодезии [1].

Принципиально обе науки базируются на общих началах теории измерений. В их основах заложены общие принципы выполнения измерительного процесса, они имеют единое отношение с наукой метрологией, и они сами выступают как методология оценки единства проектных решений и фактически выполненных изделий. Особенным для рассматриваемых наук, по нашему мнению, является теоретические начала

технических измерений, основанные на допусках и посадках, на их назначении, их представлении вплоть до графических отображений требований к виду и количественным допустимым предельным величинам измерений [2], [3], [4]. Не рассматривая теоретические основы назначения допусков, остановимся лишь на их графических представлениях в проектной документации. Так виды контролируемых параметров в машиностроении отображаются графическими схемами, представленными в табл. 1 [4]. При этом вид контролируемого параметра, величина значения допуска, база относительно которой определяется контролируемый параметр, отображаются на чертежах в виде, представленном на рис. 1.

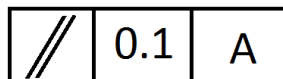


Рис. 1. – Обозначение допусков:

первая часть – вид параметра; вторая часть – значение допуска в мм.;
третья часть – буквенное обозначение базы.

Далее отметим общий подход в прикладной геодезии и науке о технических измерениях к определению необходимой точности выполнения измерений.

Таблица 1. – Знаки видов допусков форм и расположения поверхностей

Группа допуска	Вид допуска	Знак
Допуск формы	Допуск прямолинейности	—
	Допуск плоскостности	▭
	Допуск круглости	○
	Допуск цилиндричности	⌀
	Допуск профиля продольного сечения	=
Допуск расположения	Допуск параллельности	//
	Допуск перпендикулярности	⊥
	Допуск наклона	∠
	Допуск соосности	◎
	Допуск симметричности	≡
	Позиционный допуск	⊕
	Допуск пересечения осей	×
Суммарный допуск формы и расположения	Допуск радиального биения, торцевого биения, биения в заданном направлении	↗
	Допуск полного радиального биения, полного торцевого биения	↗↖
	Допуск формы заданного профиля	⌒
	Допуск формы заданной поверхности	⌒

Здесь подчеркнем, что прикладная геодезия позаимствовала подход, связанный с определением точности измерений m_z путем использования коэффициента обеспечения точности C

$$m_z = C \cdot (\pm \delta), \quad (1)$$

где $\pm \delta$ – технологическое отклонение.

Кроме этого отметим то, что исследуя составные части измерительного процесса, такие как: объект исследования, параметры объекта исследования, единицы физических величин, допуск параметра, проектирование измерений, точность измерений, средство измерений, способ измерений, метод измерений, методика измерений, условия измерений, измерения, тактика измерений, результат измерений, оценка точности результата измерений, совместная обработка результатов измерений, получение искомой полезной информации об объекте и оценка ее уровня достоверности. Особенным разделом является лишь тактика измерений. В прикладной геодезии составные части измерительного процесса аналогичны выше перечисленным, а составная часть измерительного процесса – тактика измерений, по сути назначения и содержания соответствует процессу – рекогносцировки, реализуемому в прикладной геодезии. При проектировании решения измерительной задачи все определяемые разделы такие как: точность измерений, средство измерений, способ измерений, следовательно, и их диалектическое единство - метод измерений, методика измерений, с учетом условий измерений и в соответствии с этим назначаемых превентивных мероприятий, предлагаются однозначно. Причем, для рекогносцировки (или тактики измерений) предлагаются лишь рекомендации, при которых измерения выполняются с соблюдением наивыгоднейших (необходимых, допустимых) условий. При выполнении измерений первым этапом реализуют описываемый раздел измерительного процесса, от его успешного динамического решения исполнителем во многом зависит правильное решение всей задачи с обеспечением требований по оперативности решения и экономии трудовых затрат при максимально возможной производительности труда. Следовательно, в обеих науках прикладной геодезии и технических измерениях, от грамотности и опыта исполнителей во многом зависит качественное решение измерительной задачи.

Рассмотрим пример контроля машиностроительного изделия, являющегося деталью portalного крана, изготавливаемого для одного из предприятий Российской федерации. При проектировании решения измерительной задачи точность измерений вычислялась согласно (1) при этом допуски на выполняемые размеры принимали согласно чертежей, приведенных на рис.2 а, б, в, рис.3 а, б. Коэффициенты обеспечения точности принимались согласно квалитетов регламентируемых государственными стандартами, (см. табл. 2).

В соответствии с полученными точностными требованиями в качестве средства измерений приняли лазерный трекер Vintag фирмы Faro. Данное средство измерений широко используется для решения аналогичных измерительных задач [5-10]. Способ измерений в соответствии с этим принят – пространственная тахеометрия. Как известно, прибором измеряют горизонтальные β_i , вертикальные ν_i углы и наклонное расстояние S_i от инструмента до исследуемой точки в системе координат машины или в системе координат выверяемого объекта.

Имея полярные координаты исследуемых точек, программным обеспечением измерительной машины по формулам (2) производится вычисление прямоугольных декартовых координат тех же точек в принятой системе координат:

$$x = x_0 + \Delta x; y = y_0 + \Delta y; z = z_0 + \Delta z;$$

$$\Delta z = s \cdot \sin \nu; \Delta x = s \cdot \cos \nu \cdot \cos \beta; \Delta y = s \cdot \cos \nu \cdot \sin \beta. \quad (2)$$

где x, y, z – координаты определяемой (контролируемой) точки;

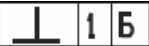
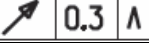
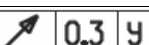
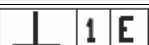
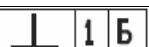
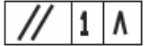
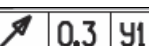
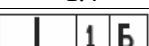
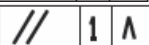
x_0, y_0, z_0 – координаты машины;

ν, β – вертикальный и горизонтальный углы;

s – наклонное расстояние;

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – приращения координат.

Таблица 2. – Формуляр тяги (В.11.04.00.000)

№ п/п	Проектное значение размера, мм	Допуск, мм	Коэффициент обеспечения точности, мм	Фактический размер, мм	Примечание
1.1	17500	± 6	0,2	17504,1	Температура
1.2	17500	± 6	0,2	17504,1	$tC^0 = +24$
2	3360	± 2	0,2	3358,8	
3	$\varnothing 500H14$	+1.55	0,2	500,4	
4	$\varnothing 400H7$	+0.057	0,3	400,0	Запрессован подшипник
5			0,2	0	
6	92	$-0.1/-0.2$	0,25	91,9	
7			0,2	0,1	
8			0,2	0	
9			0,25	0,1	
10	$\varnothing 500H14$	+1.55	0,2	500,1	
11	90	$-0.1/-0.2$	0,25	90,0	
12	$\varnothing 350H14$	+1.4	0,2	350,8	
13			0,25	0,2	
14			0,2	0	
15	$\varnothing 250H7$	+0.046	0,3	250,0	Запрессован подшипник
16	$\varnothing 350H14$	+1.4	0,2	350,9	
17			0,2	0,1	
18			0,2	0	
19	$\varnothing 350H14$	+1.4	0,2	350,5	
20			0,2	0	
21	90	$-0.1/-0.2$	0,25	89,9	
22			0,25	0,1	
23	$\varnothing 250H7$	+0.046	0,3	250,0	Запрессован подшипник
24	$\varnothing 350H14$	+1.4	0,2	350,9	
25			0,25	0,1	
26			0,25	0	

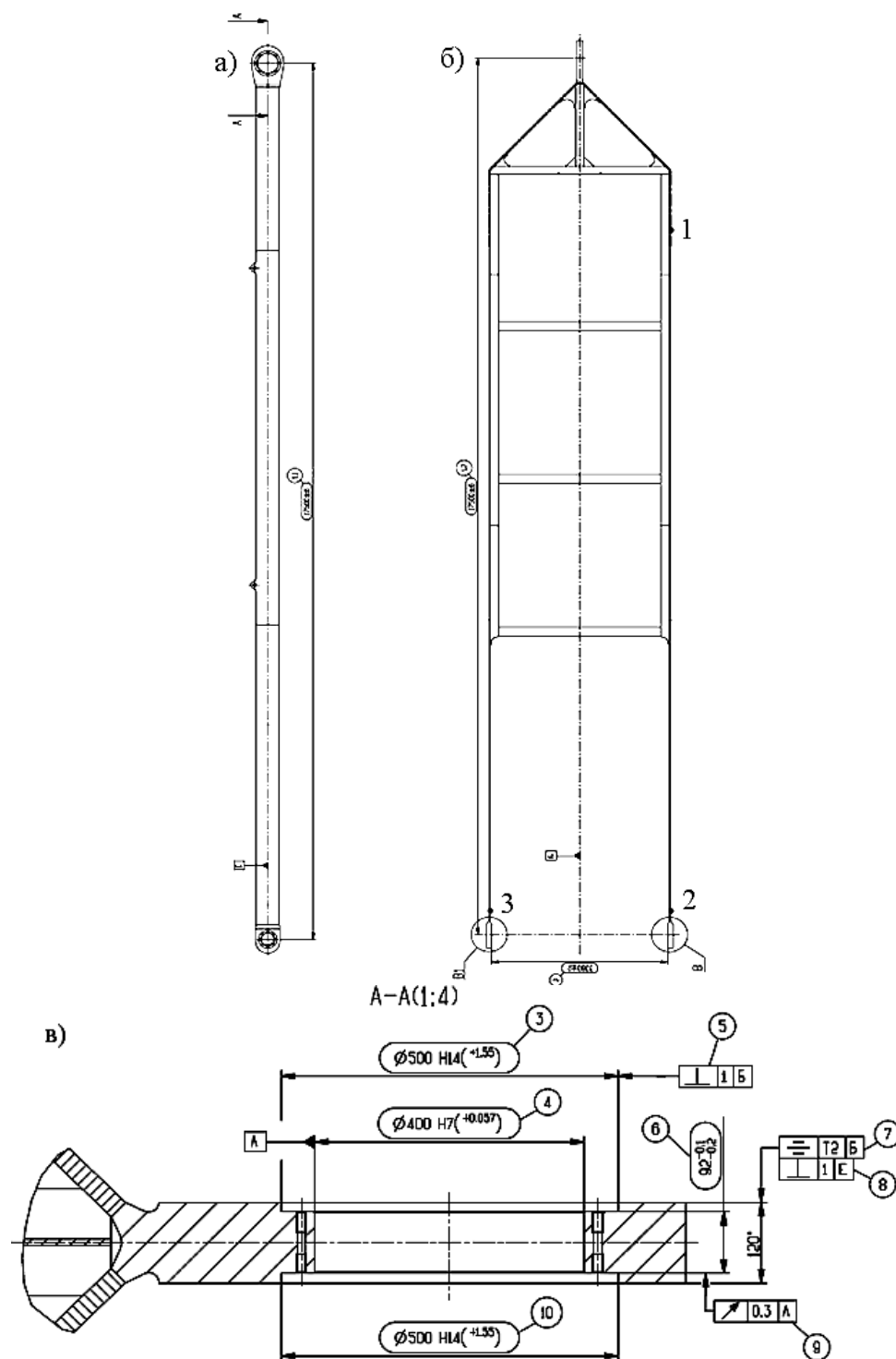


Рис. 2. – Схема контролируемых размеров тяги (B.11.04.00.000)

Тактика измерений была принята следующей. Согласно схемы контролируемых размеров тяги (B.11.04.00.000) (рис. 2), определено, что решение измерительной задачи наиболее эффективно реализовать с использованием двух станций стояния машины. Одна станция должна быть расположена со стороны (А), вторая со стороны (В). Для ориентирования машины в системе координат выверяемого изделия предложено использовать три точки, выполненные в виде марок, схема которых приведена на

рисунке 4, а, б, приклеенных на верхней поверхности детали и совмещенных с ее вертикальными образующими. При этом две марки (1), (2) наклеены вдоль одной стороны тяги, а третья (3), на противоположной стороне, примерно напротив (1). Установив измерительную машину на первой станции со стороны (А), примерно на расстоянии 2–4 метра от изделия, выполнили ее прогрев, и далее, в системе координат машины, без ее начального ориентирования, выполняют измерение координат марок (1), (2), (3).

По полученным координатам, решая обратные геодезические задачи, определяют расстояния между точками $S_{(1-2)}$, $S_{(1-3)}$ и углы ориентирования $\alpha_{(1-2)}$, $\alpha_{(1-3)}$. По вычисленным параметрам, определяют координаты марок в системе координат выверяемого объекта, и при этом принимают:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0, Y_1 = 0; \\ X_2 &= 0, Y_2 = S_{(1-2)}; \\ X_3 &= S_{(1-3)} \cdot \sin(\alpha_{(1-2)} - \alpha_{(1-3)}), Y_3 = S_{(1-3)} \cdot \cos(\alpha_{(1-2)} - \alpha_{(1-3)}). \end{aligned} \quad (3)$$

При принятых координатах марок ось У-У будет параллелен база Б и перпендикулярна базе Л.

Затем выполняют ориентирование измерительной машины в заданной координатной системе трех точек. Далее формируют файл (сеанс) новых измерений и выполняют все измерительные процедуры со стороны (А) изделия. Обеспечив полный объем измерений со стороны (А), выполняют переустановку измерительной машины на вторую станцию со стороны (В). Здесь после приведения прибора в рабочее положение выполняют ориентирование в системе координат тех же трех (1), (2), (3) точек. Далее реализуют измерительные процедуры со стороны (В). В результате получают измеренные величины параметров контролируемого изделия. Сравнивая данные значения с проектными величинами, и ориентируясь на допустимые характеристики, судят о качестве изготовленного изделия и делают заключение о его приёме или необходимости доработки.

Результаты измерений представлены в формуляре, (табл. 2).

Следовательно, на основе рассмотренного примера, сравнивая методологические основы наук, прикладной геодезии и технических измерений, отметим их единство, что позволяет успешно их применять для решения задач монтажа и наладки оборудования, и, изготовления, сборки крупногабаритной машиностроительной продукции. Это возможно, при условии дополнения знаний специалистов прикладной геодезии особенностями назначения допусков в науке технических измерений на геометрические параметры изделий и их графического представления.

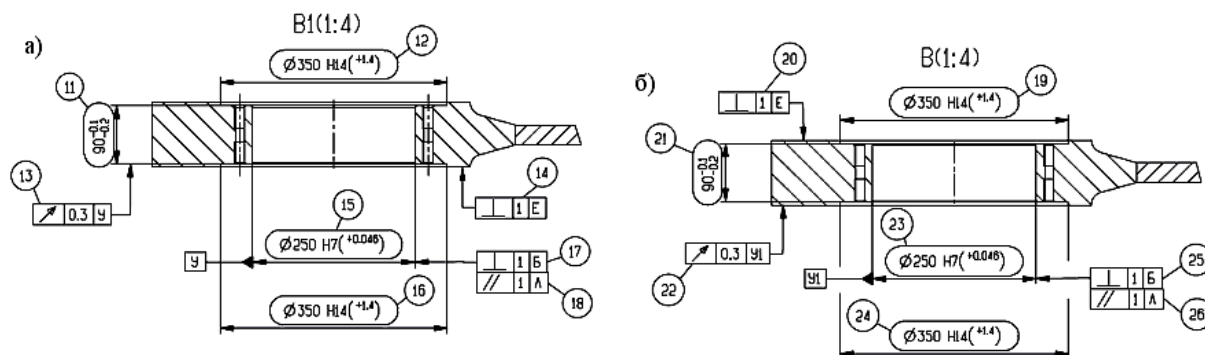


Рис. 3. – Схема размеров

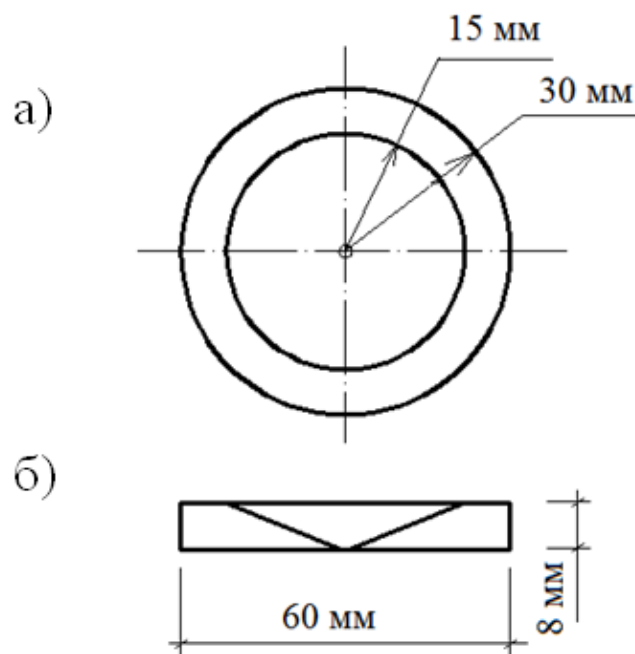


Рис. 4. – Схема конструкции марок

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутая, А.К. Справочник по производственному контролю в машиностроении [Текст] / А.К.Кутая. – Л.: Машиностроение, 1974. – 676 с.
2. Скуратов, Д.Л. и др. Технические измерения и контроль при производстве деталей в машиностроении: лаб. практикум [Текст] / Д.Л. Скуратов, В.В. Бурмистров, И.Г. Попов, С.Ю. Сидоров и др. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 160 с.
3. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Межгосударственный стандарт. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. (введен в действие Приказом Росстандарта от 18.02.2014 N 28-ст). [Текст] – М.: Стандартинформ, 2014.– 37с.
4. ГОСТ 2.308-2011. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Указания допусков формы и расположения поверхностей. (введен в действие Приказом Росстандарта от 03.08.2011 N 211-ст) [Текст] – М.: Стандартинформ, 2012.– 25с.
5. Пимшин, Ю.И. и др. Калибровка станков с числовым программным управлением с помощью лазерного трекера VINTAG [Электронный ресурс] / Ю.И. Пимшин, Ю.В. Заяров, С.М. Бурдаков, Г.А. Науменко, Л.В. Постой // Электронный научный журнал Инженерный вестник Дона: сетевой журн. – 2016, №3. – Режим доступа: URL:<http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3667> – 10.12.2016.
6. Пимшин, Ю.И. и др. Применение лазерного трекера для определения деформационных характеристик защитных оболочек [Электронный ресурс] / Ю.И. Пимшин, О.А. Губеладзе, Е.Б. Ключин, Ю.В. Заяров, В.А. Наугольнов, Д.М. Арсеньев // Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс]: тез. докл. XI Междунар. научн.-практ. конф., 27-29 мая 2015 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.].- Волгодонск: [Б.н.], 2015.- 1 электрон. опт. диск [CD]. – ISBN 978-5-7262-2114-4.
7. Полянский, А.В. Разработка методики геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ускорительно-накопительного комплекса на основе гармонического анализа: автореф. дис. канд. техн. наук. [Текст] / А.В.Полянский – Новосибирск, 2015. – 24 с.
8. Буренков, Д.Б. Разработка методики геодезического контроля изготовления и установки элементов ускорительно-накопительных комплексов с использованием API Laser Tracker 3: автореф. дис. канд. техн. наук. [Текст] / Д.Б.Буренков – Новосибирск, 2016. 24 с.
9. Gurov S., Levichev E., Neyfeld V., Okunev I., Petrov V., Polyansky A. et al. Status of NSLS-II

- booster [Электронный ресурс] / S. Gurov, E. Levichev, V. Neyfeld, I. Okunev, V. Petrov, A. Polyansky et al. // Сайт международных конференций (JACOW (www.JACoW.org)) – Режим доступа: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2011/papers/wep201.pdf> – 10.12.2016.
10. Bokov M., Burenkov D., Polyanskiy A., Pupkov Yu. and Levashov Yu. Results of Long-term Observations of Deformations of the VEPP-4 Storage Ring Constructions, BINP [Электронный ресурс] // 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham. – United Kingdom, 28 June – 1 July 2004. – 1 электрон. опт. диск [CD].

REFERENCES

- [1] Kutaya A.K. Spravochnik po proizvodstvennomu kontrolyu v mashinostroenii. [The reference book on routine control in mechanical engineering]. Leningrad. "Mashinostroenie" [Mashinostroenie publishing house], 1974, 676 p. (in Russian)
- [2] Skuratov D.L., Burmistrov E.V., Popov I.G., Sidorov S.Yu. Tekhnicheskie izmereniya i kontrol' pri proizvodstve detaley v mashinostroenii: lab. praktikum. [Technical measurements and control by production of details in mechanical engineering: laboratory practical work]. Samara. " Samara state space university " [Samara state space university publishing house], 2007, 160 p. (in Russian)
- [3] GOST 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Mezhdgosudarstvenny standart. Osnovnye normy vzaimozamenyaemosti. Kharakteristiki izdeliy geometricheskie. Sistema dopuskov na lineynye razmery. Osnovnye polozheniya, dopuski, otkloneniya i posadki. [Interstate standard. Main standards of interchangeability. Characteristics of products geometrical. System of admissions on the linear dimensions. Original positions, admissions, deviations and landings]. Moscow. " Standartinform " [Standartinform publishing house], 2014, 37 p. (in Russian)
- [4] GOST 2.308-2011. Edinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii (ESKD). Ukazaniya dopuskov formy i raspolozheniya poverkhnostey. [Uniform System of Design Documentation (USDD). Indications of admissions of a form and arrangement of surfaces]. Moscow. " Standartinform " [Standartinform publishing house], 2012, 25 p. (in Russian)
- [5] Pimshin Yu.I., Zayarov Yu.V., Burdakov S.M., Naumenko G.A., Postoy L.V. Kalibrovka stankov s chislovym programmym upravleniem s pomoshch'yu lazernogo trekera VINTAG [Calibration of machines with numerical program control by means of a laser tracker of VINTAG] [E-journal "Engineering journal of Don"], 2016, №3. – Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3667>. (in Russian)
- [6] Pimshin Yu.I., Gubeladze O.A., Kljushin E.B., Zajarov Ju.V., Naugol'nov V.A., Arsen'ev D.M. Primenenie lazernogo trekera dlya opredeleniya deformatsionnykh kharakteristik zashchitnykh obolochek. [Application of a laser tracker for definition of straining characteristics of protective shells] [XI International scientific and practical conference "Safety of nuclear power", 27-29 may 2015]. Volgodonsk. National Research Nuclear University "MEPhI": tez. dokl. on CD. ISBN 978-5-7262-2114-4. (in Russian)
- [7] Polyanskiy A.V. Razrabotka metodiki geodezicheskogo obespecheniya stroitel'stva i ekspluatatsii uskoritel'no-nakopitel'nogo kompleksa na osnove garmonicheskogo analiza. [Development of a technique of geodetic support of construction and operation of an accelerating and accumulative complex on the basis of a Fourier analysis]. Novosibirsk. " Siberian state university of geosystems and technologies " [Siberian state university of geosystems and technologies publishing house], 2015, 24 p. (in Russian)
- [8] Burenkov D.B. Razrabotka metodiki geodezicheskogo kontrolya izgotovleniya i ustanovki elementov uskoritel'no-nakopitel'nykh kompleksov s ispol'zovaniem API Laser Tracker 3. [Development of a technique of geodetic monitoring of manufacture and installation of elements of accelerating and accumulative complexes with use of API Laser Tracker 3]. Novosibirsk. " Siberian state university of geosystems and technologies " [Siberian state university of geosystems and technologies publishing house], 2016, 24 p. (in Russian)
- [9] Gurov S., Levichev E., Neyfeld V., Okunev I., Petrov V., Polyansky A. et al. Status NSLS-II bustera [Status of NSLS-II booster]. Sait mezhdunarodnykh konferentsiy (JACOW (www.JACoW.org))) [Website of the international conferences (JACOW (www.JACoW.org)))], 2011. Available at: <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/PAC2011/papers/wep201.pdf>. (in English)
- [10] Bokov M., Burenkov D., Polyanskiy A., Pupkov Yu. and Levashov Yu. Results of Long-term Observations of Deformations of the VEPP-4 Storage Ring Constructions, BINP [1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, 28 June – 1 July 2004]. Nottingham: tez. dokl. on CD. (in English)

Monitoring of the Nuclear Engineering Large Size Products

Yu.I. Pimshin*¹, G.A. Naumenko², L.V. Postoy*³, S.M. Burdakov*⁴**

* *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

³ *e-mail: lvpostoj@mephi.ru*

ORCID: 0000-0001-6637-7976

WoS ResearcherID: J-6815-2017

⁴ *3 e-mail: SMBurdakov@mephi.ru*

ORCID: 0000-0002-8599-6008

WoS ResearcherID: F-6903-2017

** *Don state technical university,*

Gagarina Sq., 1, Rostov-on-Don, Rostov region, Russia, 344000

² *e-mail: eodez@aanet.ru*

ORCID: 0000-0002-7512-4687

WoS ResearcherID: J-7170-2017

Abstract – Results of the performed works at output monitoring of nuclear engineering products on the example of the portal crane detail are given in the article. The technology of monitoring realization is considered. The conclusion where it is noted that laser trackers including the measuring Vintag vehicle produced by Faro, have high efficiency of problem solving of product monitoring of mechanical engineering is made. Their software has an opportunity to carry out processing of observed dates and preparation of reports immediately on the platform of work performance and to give results immediately. To provide accuracy of spatial coordinate measurements of 0,005-0,01 mm at distances to 10000-15000 mm. All these characteristics allow recommending to machine-building enterprises use of such and similar measuring cars for problem solving on monitoring of product geometrical parameters.

Keywords: laser tracker, measuring geometric parameters, straightness, squareness, alignment, metrology, metrological characteristics, accuracy, admissions.

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

УДК 621.791.754

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ

© 2017 В.Ф. Кубарев

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Выполнена оценка массопереноса на фронте плавления сварочной ванны при сварке неплавящимся электродом стыковых соединений низколегированных сталей толщиной 4-10 мм.

Одной из главных проблем формирования шва при сварке плавящимся электродом на высоких скоростях является проблема возникновения подрезов на лицевой поверхности шва. Возникла необходимость смоделировать процесс массопереноса из головной в хвостовую часть сварочной ванны с учетом всех основных сил, влияющих на перемещение металла.

Оценка проводилась с использованием плоской модели ванны. Процесс плавления имитировался вдувом массы металла через фронт плавления в системе координат, связанной с дугой. Оценка значимых сил выполнена с помощью критериев подобия.

Выяснено, что основными силами являются: силы тяжести, электродинамические силы, давление дуги на поверхность расплавленного металла.

Предлагаемая модель ванны принципиально отличается от существующих моделей (переменность расхода расплава по длине фронта, распределенность сил по поверхности и объему расплава, возможность расчета изменения скорости расплава по длине фронта плавления).

Ключевые слова: сварочная ванна, расход металла, плотность электродинамических сил, расплав, давление дуги, скорость движения металла.

Поступила в редакцию: 10.05.2017

Сварочная ванна является сложным гидродинамическим объектом. Перед построением модели ванны надо сделать оценку критериев подобия, оценить конечный эффект взаимодействия и их влияние на процессе массопереноса в ванне. За характерный размер при оценке критериев подобия в ванне принимали толщину слоя жидкого металла под дугой на фронте плавления.

Все физические постоянные относили к средней температуре между температурой плавления и кипения стали.

Движение металла в ванне должно строго описываться системой уравнений магнитной гидродинамики.

По параметру Бэтчелора $\beta = \frac{Re_m}{Re} \ll 1$, где Re_m – магнитное число Рейнольдса, Re – обычное число Рейнольдса, распределение электродинамических сил в ванне можно определять в безиндукционном приближении.

Приведём уравнение Навье-Стокса (1) к безразмерному виду.

В качестве основы для построения системы критериев используем электродинамические силы в сварочной ванне.

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla P + \mu \Delta \vec{v} + [\vec{j}, \vec{B}] + \rho \vec{g} \quad (1)$$

где ρ – плотность металла,
 $\vec{v}$ – скорость течения металла,
 P – давление,
 μ – вязкость расплава,
 $\vec{j}$ – плотность тока,
 $\vec{B}$ – индукция собственного магнитного поля в ванне,
 $\vec{g}$ – ускорения силы тяжести.

В относительных переменных:

$$\bar{B} = \frac{B}{B_0}; \bar{P} = \frac{P}{P_0}; \bar{v} = \frac{v}{v_0}; \bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0}; \bar{x} = \frac{x}{l_0}; \bar{y} = \frac{y}{y_0}; \bar{z} = \frac{z}{z_0},$$

где индексом "0" обозначены характеристические значения величин, уравнение (1) примет вид (2):

$$\Pi_1 \left[\frac{1}{Sh} \cdot \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{\tau}} + (\bar{v} \nabla) \bar{v} \right] = (1 + \Pi_5) \left\{ -\Pi_2 \nabla \bar{P} + \Pi_3 \Delta \bar{v} + [\bar{v} \bar{B}] \bar{B} \right\} + \Pi_4 \quad (2)$$

$\Pi_1 = \frac{\rho v_0^2 \mu_0}{B_0^2}$ – характеризуем отношение сил инерции к электродинамическим силам,

$\Pi_2 = \frac{P_0 \mu_0}{B_0^2}$ – характеризуем отношение давления в расплаве к электродинамическим силам,

$\Pi_3 = \frac{\eta v_0 \mu_0}{l_0 B_0^2}$ – характеризуем отношение вязкого трения к электродинамическим силам,

$\Pi_4 = \frac{g \rho_0 \mu_0 l_0}{B_0^2}$ – характеризуем отношение сил тяжести к электродинамическим силам,

$\Pi_5 = \beta T$ – характеризуем роль сил тепловой конвекции,

$Sh = \frac{V_0 \tau_0}{l_0}$ – число Струхала.

Оценка по этим критериям показывает, что основными для массопереноса в сварочной ванне являются силы тяжести, электродинамические силы Ампера, давление дуги на поверхность расплава.

Модель массопереноса в сварочной ванне предлагаемая авторами [2], [3] принципиально отличается от существующих моделей. При заданном режиме сварки поверхности фронтов плавления и кристаллизации неподвижны в системе отсчета, связанной с движущейся дугой. Поэтому сварочную ванну можно представить в этой системе координат в виде канала с пористыми стенками. Процесс плавления лимитируется вдувом через поверхность фронта плавления со скоростью сварки, а процесс кристаллизации отсосом расплава через поверхность фронта. Форма сварочной ванны определяется процессами теплообмена.

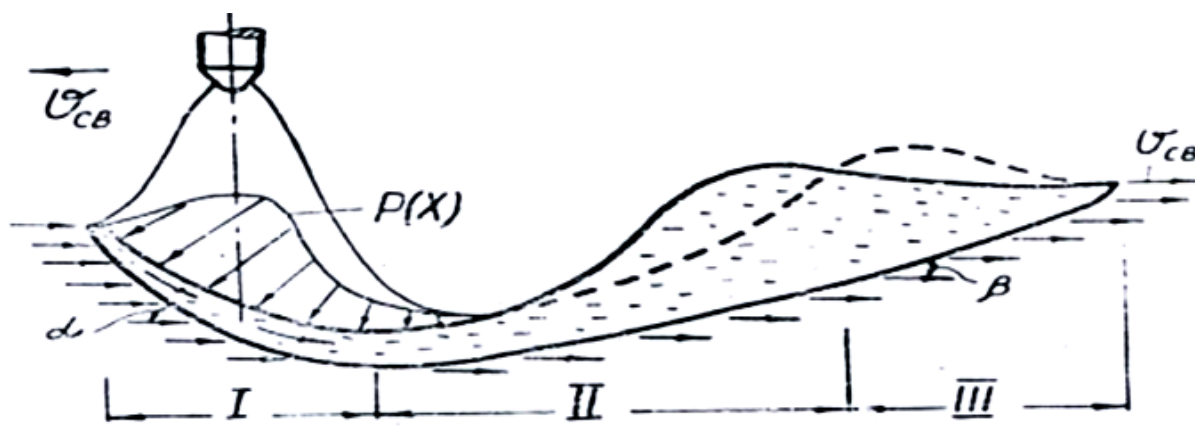


Рис. 1. – Гидродинамическая модель сварочной ванны

Скорости плавления и кристаллизации направлены по нормальям к изотермической поверхности ванны [4]. Это подтверждает возможность подобного моделирования в сварочной ванне. В трёхмерной постановке решить задачу массопереноса в ванне пока не удалось. Поэтому сделана упрощенная модель ванны в виде плоской модели, единичной ширины [3], рисунок 1.

Уравнения, описывающие движение расплава, представляют систему дифференциальных уравнений [3]

$$\frac{d(yv)}{dx} = v_{св} \sin \alpha \quad (3)$$

$$\rho \frac{d(yv^2)}{dx} - \frac{1}{2} \rho v_{св}^2 \sin 2\alpha = \rho g y \sin \alpha + f_{\partial\partial} y - y \frac{dP}{dx} - \frac{2\mu v}{y} \quad (4)$$

Уравнение (3) представляет изменение расхода $(1 \cdot yv) \frac{m^3}{c}$ по длине фронта плавления рисунок 2.

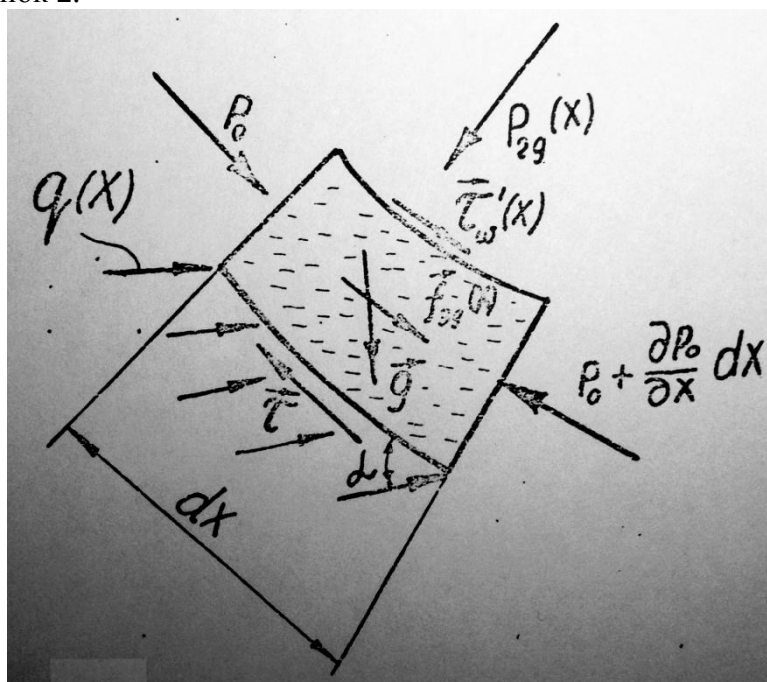


Рис. 2. – Элемент объема расплава на фронте плавления

y – толщина слоя расплава по нормали,

v – скорость течения расплава.

Уравнение (4) представляет изменение импульса элемента расплава вдоль фронта X . Для решения системы (3) (4) относительно $v(x)$, $y(x)$ необходимо знать $P(x)$, $\alpha(x)$, $f_{эд}(x)$.

Граничные условия задаются в виде (5):

$$x = x_0; y = y_0; v(x_0) = v_{св} \Delta(x_0) \quad (5)$$

При взаимодействии струи газа с наклонной плоскостью [5] максимальное давление пропорционально синусу угла φ атаки, а точка максимального давления смещается вверх от места геометрического пересечения оси струи с поверхностью преграды.

Будем полагать, что при воздействии дуги на поверхности это сохранится.

На поверхности расплава в передней части фронта $P(x)$ нарастает, а ниже оси дуги убывает.

Положение точки с максимальным давлением на фронте плавления должно влиять на скорость течения $v(x)$ и толщину слоя $y(x)$ расплава. Длины участков с нарастанием $P(x)$ или его убыванием зависят от режима сварки.

Распределение давления вдоль поверхности фронта плавления задавали по аналогии с [5] в виде

$$P(x) = P_{ш} \sin \varphi(x) \exp \left[- \left(\frac{3,46}{a_{ш}} \right)^2 (x - x_с) \right], \quad (6)$$

где $a_{ш}$ – ширина шва,

$x_с$ – координата нижней точки фронта.

Распределение плотности электродинамических сил $f_{эд}(x)$ вдоль оси ванны определяли из решения трёхмерной задачи краевой о распределении тока $\vec{j}$ и магнитной индукции $\vec{B}$ в объёме ванны [3]. Распределение $f_{эд}(x)$ задавали табличным способом.

Форма фронта плавления задается $\alpha(x)$ и на заданном режиме определяется из опытов. Система уравнений (3) (4) решалась численным методом Рунге-Кутты.

Для сварки с среде Ar, неплавящимся электродом $I = 140 \text{ A}$; $v_{св} = 15 \text{ м/ч}$; $U = 10 \text{ В}$, получена зависимость $v(x)$ рисунок 3, которая показывает нарастание скорости вдоль фронта плавления. При входе в хвостовую часть ванны эта скорость максимальна.

ВЫВОДЫ:

1) Ванну можно представить в виде канала с пористыми стенками. Плавление и кристаллизация лимитируются вдувом и отсосом расплава через поверхность фронта кристаллизации.

2) При сварке неплавящимся электродом в среде аргона количественная оценка показывает возрастание скорости течения расплава вдоль фронта плавления.

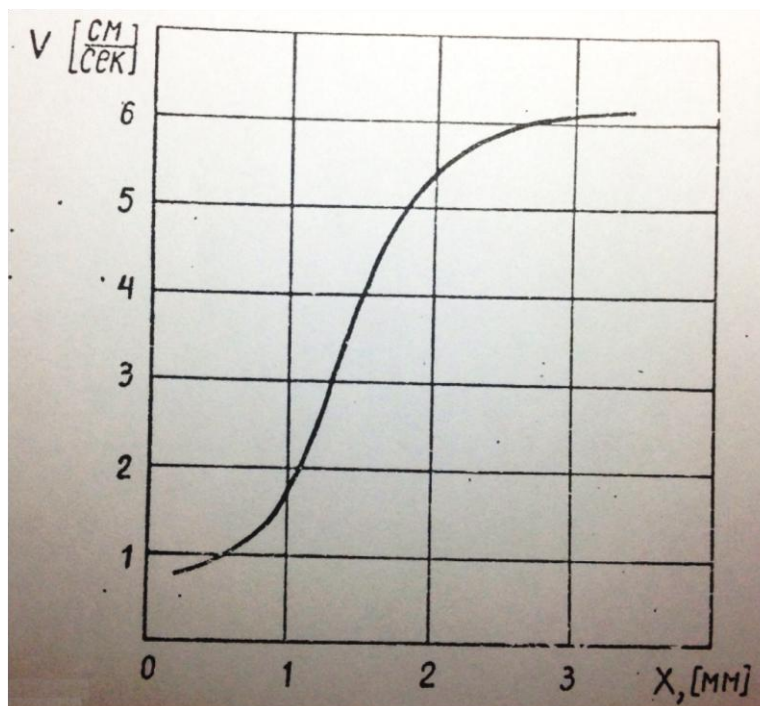


Рис. 3. – Изменение скорости течения расплава вдоль оси X

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.
2. Кубарев, В.Ф. и др. Гидродинамические процессы в сварочной ванне [Текст] / В.Ф. Кубарев и др. // Известия вузов. Машиностроение. – 1979. – № 5. – С. 119–123.
3. Кубарев, В.Ф. Исследование физических процессов взаимодействия электрической сварочной дуги с металлом и оценка возможностей управления формообразованием шва. [Текст] / В.Ф. Кубарев : дисс. канд. техн. наук. – М., 1979. – 179 с.
4. Прохоров, Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке [Текст] / Н.Н. Прохоров. – М.: Металлургия, 1968. – 694 с.
5. Юдаев, Б.Н. и др. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами [Текст] / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин. М.: Машиностроение, 1977 – 246 с.

REFERENCES

- [1] Levich V.G. Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika [Physical and Chemical Hydrodynamics]. M. Pub. Fizmatgiz [Physmatgiz], 1959, 699 p. (in Russian)
- [2] Kubarev V.F. etc. Gidrodinamicheskie protsessy v svarochnoi vanne [Hydrodynamic Processes in the Welding Tub]. Izvestiia vuzov. Mashinostroenie [News of Higher Education Institutions. Mechanical Engineering], 1979, №5, ISSN 0536-1044, pp. 119–123. (in Russian)
- [3] Kubarev V.F. Issledovanie fizicheskikh protsessov vzaimodeistviia elektricheskoi svarochnoi dugi s metallom i otsenka vozmozhnostei upravleniia formoobrazovaniem shva [Research of Physical Processes of Electric Welding Arc Interaction with Metal and Management Opportunity Assessment of Seam Shaping]. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [PhD Thesis in Engineering]. M. 1979. 179 p. (in Russian)
- [4] Prokhorov N.N. Fizicheskie protsessy v metallakh pri svarke [Physical Processes in Metals when Welding]. M. Pub. Metallurgiya [Metallurgy], 1968. 694 p. (in Russian)
- [5] Iudaev B.N., Mikhailov M.S., Savin V.K. Teploobmen pri vzaimodeistvii strui s pregradami [Heat Exchange at Interaction of Streams with Barriers]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1977, 246 p. (in Russian)

Study of Mass Transfer in Welding Tub

V.F. Cubarew

*National Research University «MPEI»,
Krasnokazarmennaya St., 14, Moscow, Russia, 111250
e-mail: doronin-45@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8493-8933
WoS ResearcherID: J-5424-2017*

Abstract – The mass transfer at the melting front of the welding tub is evaluated when welding with butt joint non-consumable electrode of low-alloy steels 4-10 mm thick.

The problem of undercutting on the seam face is one of the main problems of weld formation when welding with a consumable electrode at high speeds. It became necessary to model the mass transfer process from the head to the tail part of the welding tub taking into account all the basic forces affecting the metal movement.

The evaluation was carried out using a flat tub model. The melting process was simulated by blowing the metal mass through the fusion front in the coordinate system connected with the arc. Evaluation of significant forces was made using similarity criteria.

It was found out that the main forces are gravity forces, electrodynamics forces, arc pressure on the molten metal surface.

The proposed model of the tub differs in principle from existing models (the variability of the melt flow along the length of the front, the distribution of forces over the surface and the volume of the melt, the possibility of calculating the change in the melt velocity along the length of the fusion front).

Keywords: welding tub, metal consumption, electrodynamics force density, melt, arc pressure, metal movement speed.

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

УДК 658.562:681.3

**МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ПРИ СТРУКТУРНО-
АНАЛИТИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ
ИЗМЕРЕНИЙ**

© 2017 Ю.П. Муха, О.А. Авдеюк, И.Ю. Королева, А.Д. Королев

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Создание сложных измерительных средств (ИС), да и в целом измерительных и управляющих систем, осуществляется на основе аналитических, структурных, структурно-аналитических методов. Отмечается, что при проектировании ИС сначала выбирают алгоритмы (функции), реализуемые измерительной системой, а затем выбирается или создается аппаратура для реализации алгоритмов. При этом отсутствуют идеология и формализмы метрологического описания, соответствующие процессу синтеза сложных информационно-измерительных систем (ИИС). Особенно для технологии структурно-аналитического проектирования. Отсутствует вообще задача разработки оценочных соотношений для анализа текущего проектирования и результата проектирования. В том числе и метрологических оценок. Задача уменьшения общей погрешности результатов измерений – это задача актуальная всегда. Поэтому и понижение общей погрешности еще на этапе проектирования за счет уменьшения методической погрешности также актуальна. Предпочтительным методом синтеза сложных ИИС является структурно-аналитический, реализуемый по схеме: аналитическая форма → категория → граф с оптимизацией структуры → аналитические формы, распределенные графы → категории → графы с оптимизацией структуры → ... → финальная аналитическая форма с аналитической оптимизацией. Инновационной компонентой является технология метрологического анализа сложной измерительной системы. Результатом исследований является синтез уравнений методической погрешности для одномерной четырехпараметрической ИИС в мультиплицированном варианте коммутации входных каналов.

Ключевые слова: структурно-аналитическое проектирование системы, сложная измерительная система, полная погрешность измерения, метрологическая оценка погрешности измерения.

Поступила в редакцию: 08.05.2017

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [1,2], полная погрешность результатов измерений любого измерительного средства определяется многочисленными источниками. Очевидно, что чем сложнее измерительное средство (например, сложные измерительно-вычислительные комплексы для различных промышленных производств, распределенные измерительно-вычислительные системы экологического назначения, сложные программно-технические измерительные системы для медицинских целей и так далее), тем больше таких источников.

Значительную часть полной погрешности, при этом, составляют комплексные методические погрешности, которые сопровождают и измерительную процедуру [1] в целом, и проявляются на всех этапах измерительной процедуры: в рамках каждого

измерительного преобразования, в рамках алгоритмов управления субпроцессами измерения в сложных измерительных системах, в рамках алгоритмов представления выходных результатов измерения в виде разнообразных графиков, диаграмм, сложных образов и так далее.

При этом создание сложных измерительных средств, да и в целом измерительных и управляющих систем, осуществляется на основе аналитических [3], структурных [4], структурно-аналитических [4] методов. В [5] отмечается, что при проектировании ИС сначала выбирают алгоритмы (функции), реализуемые измерительной системой, а затем выбирается или создается аппаратура для реализации алгоритмов. При этом отсутствуют идеология и формализмы метрологического описания, соответствующие процессу синтеза сложных ИИС. Особенно для технологии структурно-аналитического проектирования. Отсутствует вообще задача разработки оценочных соотношений для анализа текущего проектирования и результата проектирования. В том числе и метрологических оценок.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Очевидно, что задача уменьшения общей погрешности результатов измерений – это задача актуальная всегда. Поэтому и понижение общей погрешности еще на этапе проектирования за счет уменьшения методической погрешности также актуальна.

С этой целью можно синтезировать процедуру разбиения передаточного отношения всей системы на отдельные составляющие модули, которые вносят наименьший методический вклад в полную методическую погрешность при условии сохранения неизменной внешней функции системы [4]. Там же было показано, что предпочтительным методом синтеза сложных ИИС является структурно-аналитический, реализуемый по схеме: аналитическая форма $\rightarrow$ категория $\rightarrow$ граф с оптимизацией структуры $\rightarrow$ аналитические формы, распределенные на графе $\rightarrow$ категории $\rightarrow$ графы с оптимизацией структуры $\rightarrow \dots \rightarrow$ финальная аналитическая форма с аналитической оптимизацией.

При этом в процессе структурных преобразований формируются замещающие структуры. Каждая замещающая структура может быть описана промежуточной измерительной ситуацией [1], т.е. уравнениями $L_{ij}, M_{yij}, M_{ycij}, M_{mij}$. Граничные условия для ij -го замещения совпадают с граничными условиями «внешнего» индекса i . Законы распределения и плотностей вероятности определяются из условий композиции. В целом возникает возможность оценивать влияние оптимального алгоритмического разбиения на выбор и использование инструментальной базы, в том числе и на инструментальную погрешность. Таким образом, методика метрологических оценок сводится к описанию измерительной ситуации в иерархических вариантах структурно-аналитического синтеза и введению критерия минимума методической погрешности текущих и заключительных функций измерительных преобразований R_i и измерительной процедуры L , формирующих финальную измерительную структуру ИИС.

ТЕХНОЛОГИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СЛОЖНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

1) Для многомерной многопараметрической ИИС записываются уравнения «шкал» по всем измеряемым параметрам в виде аналитических уравнений, собранных в систему:

$$\begin{cases} \lambda_1(t) = F_1(a_1^1, \dots, a_n^1, \gamma_1(t)), \\ \dots \dots \dots \\ \lambda_m(t) = F_m(a_1^m, \dots, a_n^m, \gamma_m(t)). \end{cases} \quad (1)$$

2) Каждое уравнение «шкалы» переводится в категорную форму, и образуются множества всех компонентов категорий «шкал»:

$$\left. \begin{matrix} F_j^o: (G_1, \Lambda_1); \\ \dots \dots \dots \\ F_m^o: ((G_m, \Lambda_m)). \end{matrix} \right\} \rightarrow \left. \begin{matrix} f_1: Hom_{\mathbb{C}_1}(G_1, \Lambda_1); \\ \dots \dots \dots \\ f_m: Hom_{\mathbb{C}_m}(G_m, \Lambda_m). \end{matrix} \right\}. \quad (2)$$

3) Категории измерительных «шкал» представляют в виде графов с распределением функций и множеств из состава категорий, относящихся вершинам графа:

$$\left. \begin{matrix} F_1^o: (G_1, \Lambda_1) \leftrightarrow (G_1 \cup \Lambda_1, H_{F1}), \\ \dots \dots \dots \\ F_m^o: (G_m, \Lambda_m) \leftrightarrow (G_m \cup \Lambda_m, H_{Fm}). \end{matrix} \right\}. \quad (3)$$

4) Оптимизируются структуры всех графов с перераспределением функций и формируются уравнения для каждой вершины графа:

$$\begin{aligned} & \left. \begin{matrix} (G_1 \cup \Lambda_1, H_{F1}) \xrightarrow{opt} [(G_1 \cup \Lambda_1)_{opt}, (H_{F1})_{opt}], \\ \dots \dots \dots \\ (G_m \cup \Lambda_m, H_{Fm}) \xrightarrow{opt} [(G_m \cup \Lambda_m)_{opt}, (H_{Fm})_{opt}] \end{matrix} \right\} \rightarrow \times \\ \times \rightarrow & \left\{ \begin{aligned} & [G'_{1i} \in (G_1 \cup \Lambda_1)_{opt}, H'_{F1i} \in (H_{F1})_{opt}] \rightarrow (G'_{1i} \xrightarrow{H'_{F1i}} G''_{1i}) \rightarrow G''_{1i} = \\ & \quad = F'_{1i}{}''(G'_{1i}) \\ & \dots \dots \dots \\ & [G'_{mi} \in (G_m \cup \Lambda_m)_{opt}, H'_{Fmi} \in (H_{Fm})_{opt}] \rightarrow (G'_{mi} \xrightarrow{H'_{Fmi}} G''_{mi}) \rightarrow G''_{mi} = \\ & \quad = F'_{mi}{}''(G'_{mi}) \end{aligned} \right. \quad (4) \end{aligned}$$

5) Формируются категории преобразований в вершинах и устанавливаются все компоненты категорий:

$$\left. \begin{matrix} G''_{1i} = F'_{1i}{}''(G'_{1i}) \rightarrow F'_{1i}: (G'_{1i}, G''_{1i}), \\ \dots \dots \dots \\ G''_{mi} = F'_{mi}{}''(G'_{mi}) \rightarrow F'_{mi}: (G'_{mi}, G''_{mi}). \end{matrix} \right\}. \quad (5)$$

6) По сформированным категориям строятся графы и восстанавливаются новые распределения функций в вершинах графов:

$$\left. \begin{matrix} F'_{1i}: (G'_{1i}, G''_{1i}) \leftrightarrow (G'_{1i} \cup G''_{1i}, H_{F'_{1i}}), \\ \dots \dots \dots \\ F'_{mi}: (G'_{mi}, G''_{mi}) \leftrightarrow (G'_{mi} \cup G''_{mi}, H_{F'_{mi}}). \end{matrix} \right\}. \quad (6)$$

7) Оптимизируются структуры графов, и происходит перераспределение функций по вершинам:

$$\left. \begin{aligned} (G'_{1i} \cup G''_{1i}, H_{F'_{1i}}) &\xrightarrow{opt} [(G'_{1i} \cup G''_{1i})_{opt}, (H_{F'_{1i}})_{opt}], \\ &\dots \dots \dots \\ (G'_{mi} \cup G''_{mi}, H_{F'_{mi}}) &\xrightarrow{opt} [(G'_{mi} \cup G''_{mi})_{opt}, (H_{F'_{mi}})_{opt}]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

8) И так далее ...

N. Выполняется аналитическая оптимизация заключительных уравнений шкалы:

$$\left. \begin{aligned} F'_{1i}: (G'_{1i}, G''_{1i}), \\ \dots \dots \dots \\ F'_{mi}: (G'_{mi}, G''_{mi}). \end{aligned} \right\} \xrightarrow{opt} \left\{ \begin{aligned} \lambda_{1opt} &= F'_{1opt}(a^1_1, a^1_2, \dots, a^1_n, t), \\ \dots \dots \dots \\ \lambda_{mopt} &= F'_{mopt}(a^m_1, a^m_2, \dots, a^m_n, t). \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Завершающая совокупность уравнений шкалы является основанием для составления структуры системы мониторинга и служит для записи системы измерительных уравнений мониторинга.

N+1. Формируется система уравнений погрешностей для всех структурных компонентов уравнений мониторинга.

В соотношениях (1)-(9) приняты следующие обозначения:

- $\lambda_i(t)_{i=\overline{1 \div m}}$ – выходная измеряемая величина i – го измерительного канала;
- a^i_j – j –й конструктивный параметр ($j = \overline{1 \div n}$) i -го измерительного канала ;
- $\gamma_i(t)$ – i – я наблюдаемая (входная) величина;
- $F_i(t)$ – аналитическая функция связи входной величины $\gamma_i(t)$ с выходной величиной $\lambda_i(t)$;
- G_i – множество значений входной величины i -го измерительного канала;
- Λ_i – множество значений выходной величины i –го измерительного канала;
- f_i – отображение, реализуемое i -м измерительным каналом;
- $\mathfrak{C}_i$ – i -я категория измерений, реализуемая i -м каналом измерений;
- $Hom_{\mathfrak{C}_i}$ – морфизм категории $\mathfrak{C}_i$;
- H_{F_i} – сеть аналитических функций $F_i(t)$, выбираемая в соответствии с принимаемой структурой системы (многоканальная, многопараметрическая, многоточечная, статистическая).

По функциям, полученным на 4, 6, и т.д. шагах, можно определить функции методической погрешности, соответствующие этим вариантам распределений в процессе проектирования. Таким образом, реализуется процедура иерархического метрологического анализа, т.е. в целом структурно-аналитический синтез (САС) – это процедура с шаговым метрологическим анализом, который позволяет оценивать качество выбора элементов (инструментальных модулей) проекта на базе более низких уровней иерархии. САС позволяет находить оптимальные структуры на всех уровнях иерархии. Финиш проектирования определяется минимумом достигнутой методической погрешности.

В соответствии с высказанными соображениями, в процессе САС получается последовательность функций методической погрешности, начиная с начального уровня и до финального:

$$\Delta_{\text{МЕТ}}F_0 \rightarrow \Delta_{\text{МЕТ}}F_1 \rightarrow \{\Delta_{\text{МЕТ}}F_i\} \rightarrow \dots \rightarrow \Delta_{\text{МЕТ}}F_{\text{ЗАКЛ}}, \quad (9)$$

что отвечает следующей структуре образования вариантов распределения:

$$F_0[F_0^1, \dots, F_0^k] \rightarrow \left[\begin{array}{c} \rightarrow F_1^1 \rightarrow \left[\begin{array}{c} \rightarrow \dots \rightarrow F_m^1 \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow F_p^1 \rightarrow \end{array} \right] \rightarrow \\ \rightarrow F_1^2 \rightarrow \left[\begin{array}{c} \rightarrow \dots \rightarrow F_l^2 \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow F_k^2 \rightarrow \\ \dots \dots \dots \\ \rightarrow \dots \rightarrow F_r^n \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow F_t^n \rightarrow \end{array} \right] \rightarrow \\ \rightarrow F_1^n \rightarrow \left[\begin{array}{c} \rightarrow \dots \rightarrow F_m^1 \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow \\ \rightarrow \dots \rightarrow F_p^1 \rightarrow \end{array} \right] \rightarrow \end{array} \right] \rightarrow F_{\text{ЗАКЛ}}[F_m^1, F_k^2, \dots, F_t^n]. \quad (10)$$

На основании (10) можно записать:

$$\lambda_{\text{ЗАКЛ}}(t) = F_{\text{ЗАКЛ}}[R_m^1, R_k^2, \dots, R_t^n]. \quad (11)$$

Здесь принято:

- F_j^i – i -й вариант функции j -го структурного элемента, получаемый в процессе структурных сверток ;
- R_j^i – функция j -го измерительного преобразования, присвоенного i -му элементу измерительной структуры, соответствующей структуре (10) в варианте $F_{\text{ЗАКЛ}}$.

Так как $\Delta_{\text{МЕТ}}F_i$ из (9) определяется на каждом шаге структурных сверток, то предположительно существует шаг, на котором $\Delta_{\text{МЕТ}}F_i = \min$. В таком случае целесообразно остановить процесс сверток на шаге j и считать, что полученная структура оптимальна по минимуму методической погрешности. То есть в соответствии с природой методической погрешности следует существование некоторой зависимости между функцией методической погрешности и структурой системы и ее компонентов. Действительно, структурный оптимум [4] определяется в зависимости от однородности функциональной представимости, которая определяется вычислительной сложностью, то есть количественной оценкой используемых арифметических операций (+, −, ×, :). При этом все арифметические операции могут быть приведены к операции суммирования и далее к сдвиговым операциям. Таким образом, всякая вычисляемая функция по сложности оценивается отношением $Sl = f(N)$, где N – число используемых сдвигов. Сдвиги реализуются внешними управляющими воздействиями на аппаратную (регистровую) структуру. Таким образом, на одном сдвиговом регистре число функциональных (воздействия) и аппаратных (регистровая структура) компонент совпадает. Поэтому в рамках достигаемого оптимума [4] элементы аппаратной структуры, адекватные элементам множества $T_{\min}$ (наименьшего множества внешней устойчивости [Берж]), близки по функциональной и аппаратной сложности, то есть по величинам полной погрешности. В этих условиях критерием достижения финала процесса структурно-аналитического проектирования может служить достигнутая полная погрешность, которая определяет операции преобразования в составе измерительной процедуры. Поэтому необходимо связывать операции преобразования R_i с функциями F_i , распределяемыми в процессе блочно-функционального распределения [4].

Обратимся к *примеру*. Предположим, что необходимо синтезировать одномерную четырехпараметрическую ИИС. Изберем мультиплицированный вариант системы с четырьмя входами, для которой справедлива следующая система уравнений шкал:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1(t) &= F_1(a_1^1, a_2^1, \dots, a_n^1, \gamma_1(t)) \\ \lambda_2(t) &= F_2(a_1^2, a_2^2, \dots, a_n^2, \gamma_2(t)) \\ \lambda_3(t) &= F_3(a_1^3, a_2^3, \dots, a_n^3, \gamma_3(t)) \\ \lambda_4(t) &= F_4(a_1^4, a_2^4, \dots, a_n^4, \gamma_4(t)) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В соответствии с *шагом 2* систему (12) переведем в категорную форму:

$$\left. \begin{aligned} F_1^0: (G_1, \Lambda_1), \\ F_2^0: (G_2, \Lambda_2), \\ F_3^0: (G_3, \Lambda_3), \\ F_4^0: (G_4, \Lambda_4) \end{aligned} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{aligned} f_1: \text{Hom}_{\mathfrak{C}_1}(G_1, \Lambda_1), \\ f_2: \text{Hom}_{\mathfrak{C}_2}(G_2, \Lambda_2), \\ f_3: \text{Hom}_{\mathfrak{C}_3}(G_3, \Lambda_3), \\ f_4: \text{Hom}_{\mathfrak{C}_4}(G_4, \Lambda_4). \end{aligned} \right. \quad (13)$$

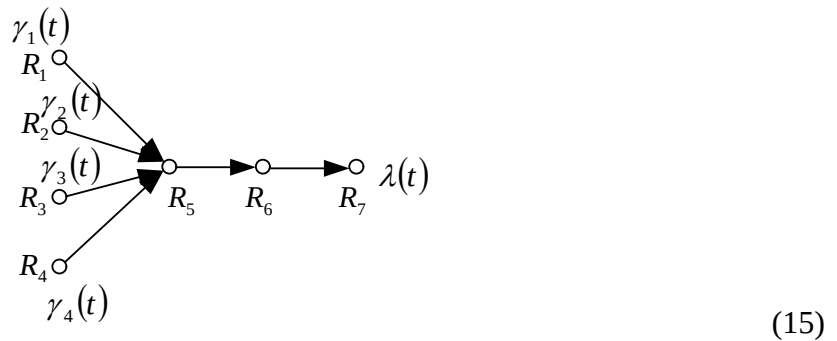
Теперь реализуем *шаг 3*:

$$\left. \begin{aligned} F_1^0: (G_1, \Lambda_1) &\leftrightarrow (G_1 \cup \Lambda_1, H_{F_1}), \\ F_2^0: (G_2, \Lambda_2) &\leftrightarrow (G_2 \cup \Lambda_2, H_{F_2}), \\ F_3^0: (G_3, \Lambda_3) &\leftrightarrow (G_3 \cup \Lambda_3, H_{F_3}), \\ F_4^0: (G_4, \Lambda_4) &\leftrightarrow (G_4 \cup \Lambda_4, H_{F_4}). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

В качестве сетей H_{F_i} ($i = \overline{1,4}$) выбирается структура мультиплицированных каналов $\{H_{F_i}, (i = \overline{1,4})\}$ с коммутацией на единый измерительный тракт с общим АЦ-преобразованием и формированием общей шкалы результатов измерений за счет реализации программных модулей для обратных преобразований и масштабирования по каждому информативному параметру.

Отсюда *шаг 4* реализуется следующим образом:

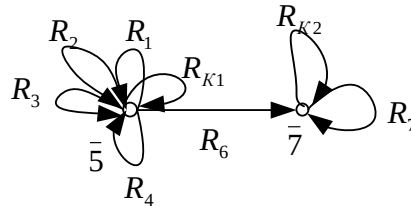
строится граф



что соответствует уравнению сети:

$$\lambda(t) = R_7 R_6 R_5 R_{K2} (R_4 + R_3 + R_2 + R_1) R_{K1} \{\gamma_i(t)\}. \quad (16)$$

Здесь R_i — это преобразования, соответствующие структуре мультиплицирующей сети $\{H_{F_i}\}$; R_{K1} и R_{K2} — коммутирующие (развертывающие) преобразования. Согласно [4] осуществим структурную оптимизацию. В результате появляется следующая структура:



(17)

Структура (17) адекватна уравнению сети:

$$\lambda_j(t) = R_7 R_5 \{\gamma_i(t)\}. \quad (18)$$

где $R_5 = R_5 R_{K2} (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) R_{K1}$ и $R_7 = R_7 R_6$.

Полученные операции преобразования R_5 и R_7 приводят к необходимости анализа их реализации, а значит к выполнению дополнительной проектной доработки на уровнях более низкой структурной иерархии.

Составим уравнения методических погрешностей [5] для вариантов систем, которые адекватны структурам (14) и (17), используя уравнения сети (15) и (18):

$$\Delta_{\text{МЕТ}} \lambda_{ij}(t) = R_7^{\text{и}} R_6^{\text{и}} R_5^{\text{и}} R_{K2}^{\text{и}} \begin{Bmatrix} R_1^{\text{и}} \\ R_2^{\text{и}} \\ R_3^{\text{и}} \\ R_4^{\text{и}} \end{Bmatrix} R_{K1}^{\text{и}} \{\gamma_{ij}(t)\} - R_7^{\text{г}} R_6^{\text{г}} R_5^{\text{г}} \begin{Bmatrix} R_1^{\text{г}} \\ R_2^{\text{г}} \\ R_3^{\text{г}} \\ R_4^{\text{г}} \end{Bmatrix} R_{K1}^{\text{г}} \{\gamma_{ij}(t)\} \quad (19)$$

и
$$\Delta_{\text{МЕТ}} \lambda_{ij}(t) = R_7^{\text{и}} R_5^{\text{и}} \{\gamma_{ij}(t)\} - R_7^{\text{г}} R_5^{\text{г}} \{\gamma_{ij}(t)\}. \quad (20)$$

В данном случае индексы «и» и «г» соответствуют принятой и номинальной реализации преобразований $R_i^{\text{и}}$ и $R_i^{\text{г}}$. Принятая реализация отличается отсутствием инструментальной составляющей погрешности [1]. Видно, что выражение (20) отличается большей вычислительной компактностью, чем выражение (19). Следовательно, можно ожидать в конечном итоге снижение методической погрешности измерительной процедуры, адекватной структуре (14).

ВЫВОДЫ

1) Структурно-аналитическое проектирование очень приспособлено, направлено на «манипуляции», «маневрирование» распределением блочных функций в процессе структурных преобразований. Поэтому здесь уместна оценка эффективности перераспределений не только по сложности (однородности сложности) функциональной представимости, но и по методической (алгоритмической) погрешности, достижимой на каждом шаге преобразований.

2) Вместе с методической погрешностью меняется и динамическая погрешность инструмента преобразования, достигаемая на каждом шаге структурной свертки, и том числе погрешность датирования, сопровождающая цифровую часть измерительной процедуры [7].

3) В блок-схеме процесса проектирования возможна коррекция цикла блочно-функционального проектирования [4] за счет использования второго критерия по оценке погрешности.

4) Целесообразно использовать методические погрешности для оценки и выбора числа шагов по структурной свертке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цветков, Э.И.* Основы математической метрологии [Текст] / Э.И. Цветков. – СПб.: Политехника, 2005. – 510 с.
2. *Фридман, А.Э.* Основы метрологии. Современный курс [Текст] / А.Э. Фридман. – СПб.: НПО «Профессионал», 2008. – 284 с.
3. *Соколов, Н.И.* Аналитический метод синтеза линеаризованных систем автоматического регулирования [Текст] / Н.И. Соколов. – М.: Машиностроение, 1966. – 328 с.
4. *Муха, Ю.П. и др.* Алгебраическая теория синтеза сложных систем: Монография [Текст] / Ю.П. Муха, О.А. Авдеюк, И.Ю. Королева. – ВолгГТУ. Волгоград, 2003. – 320 с.
5. *Цветков, Э.И.* Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез [Текст] / Э.И. Цветков. – Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.
6. *Берж, К.* Теория графов и ее применение [Текст] / К. Берж. – М.: Изд-во иностр. лит., 1962. – 319 с.
7. *Муха, Ю.П. и др.* Погрешность датирования (сдвига) результатов измерений и её связь с характеристиками интерфейса [Текст] / Ю.П. Муха, Э.И. Цветков, И.Ю. Королева // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2. – С. 50–58.

REFERENCES

- [1] Tsvetkov E.I. Osnovy matematicheskoi metrologii [Fundamentals of Mathematical Metrology]. Sankt-Peterburg. Pub. Politehnika [Polytechnics], 2005, ISBN 5-7325-0793-0, 510 p. (in Russian)
- [2] Fridman A.E. Osnovy metrologii. Sovremennyi kurs [Fundamentals of Metrology. Modern Course]. Sankt-Peterburg. Pub. NPO «Professional» [Scientific and Production Center "Professional", 2008, ISBN 978-5-91259-018-4, 284 p. (in Russian)
- [3] Sokolov, N.I. Analiticheskii metod sinteza linearizovannykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniia [Analytical Method of Synthesis of the Linearized Systems of Automatic Regulation]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1966. 328 p. (in Russian)
- [4] Mukha Yu.P., Avdeyuk O.A., Koroleva I.Yu. Algebraicheskaia teoriia sinteza slozhnykh sistem: Monografiia [Algebraic Theory of Synthesis of Difficult Systems: Monograph]. Volgograd. Pub. VolgGTU [Volgograd State Technical University], 2003, 320 s. (in Russian)
- [5] Tsvetkov E.I. Metrologiia. Modeli. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez [Metrology. Models. Metrological Analysis. Metrological Synthesis]. Sankt-Peterburg. Pub. Izdatelstvo SPbGETU «LETI» [Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"], 2014, 293 p. (in Russian)
- [6] Berzh K. Teoriia grafov i ee primeneniye [Graph Theory and its Application]. M. Pub. Izdatelstvo inostrannoi literatury [Foreign Literature Publishing House], 1962, 319 p. (in Russian)
- [7] Mukha Yu.P., Tsvetkov E.I., Koroleva I.Yu. Pogreshnost datirovaniia (sdviga) rezultatov izmerenii i ee sviaz s kharakteristikami interfeisa [The Error in the Dating (Shift) of Measurement Results and its Relationship to the Characteristics of the Interface]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №2, eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 50–58. (in Russian)

Metrological Estimates For Structural and Analytical Design of Complex Measurement Systems

Y.P. Mucha*, O.A. Avdeuk, I.Y. Koroleva***, A.D. Korolev******

*Volgograd state technical university,
Lenin, 28, Volgograd, Russia, 400005*

* e-mail: muxaup@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0919-5732

WoS Researcher ID: M-4084-2015;

** e-mail: oxal2@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6201-8773

WoS Researcher ID: L-9862-2015

*** e-mail: artmd64@rambler.ru

ORCID: 0000-0002-9185-6976

WoS Researcher ID: N-4037-2015;

**** e-mail: artmd64@mail.ru

ORCID: 0000-0003-2175-2204

Abstract – The creation of complex measuring devices and control systems is carried out based on analytical, structural, structural and analytical methods. It is noted that at design of measuring means algorithms (functions) are chosen at first implemented by measuring system and then the equipment for realization of algorithms is selected or created. At the same time there are no ideology and formalism of the metrological description corresponding to process of synthesis of difficult information and measuring systems. There is no problem of development of estimated ratios for the analysis of the current design and result of design in general. The problem of the general error reduction of measurement results is a problem urgent always. Therefore, also kickdown of the general error at a design stage due to a methodical error reduction is also urgent. Preferable method of synthesis of difficult information and measuring systems is structural and analytical, realized according to the scheme: an analytical form $\rightarrow$ category $\rightarrow$ the graph with optimization of structure $\rightarrow$ the analytical forms distributed to the column $\rightarrow$ categories $\rightarrow$ columns with optimization of structure $\rightarrow$... $\rightarrow$ a final analytical form with analytical optimization. An innovative component is the technology of metrological analysis of a complex measuring system. The result of the research is the synthesis of the equations of methodical error for one-dimensional four-parameter information and measuring systems in the multiplexed version of commutation of input channels.

Keywords: structural and analytical design of the system, complex measuring system, total measurement error, metrological evaluation of measurement error.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.86.06

**ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
АВТОМАТИЧЕСКИХ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ
ПОДЪЁМА УПАВШИХ КАССЕТ В РЕАКТОРЕ ТИПА ВВЭР 1000**

© 2017 П.Д. Кравченко*, Д.Н. Федоренко**, В.Ю. Рябенко*

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

*** Институт сферы обслуживания и предпринимательства – филиал Донского государственного технического университета, Шахты, Ростовская обл., Россия*

Предложен план проектирования конструкций автоматических грузозахватных устройств (АГЗУ) для подъёма упавших кассет в ядерном реакторе типа ВВЭР. Рассмотрены существующие конструктивные схемы АГЗУ. Применены эвристические методы при предпроектном анализе и в процессе проектирования.

Ключевые слова: автоматические грузозахватные устройства, проектирование, подъём упавшей кассеты, ядерный реактор, АЭС.

Поступила в редакцию: 11.05.2017

В процессе эксплуатации ядерных реакторов типа ВВЭР возможно возникновение нештатных ситуаций при падении топливных кассет или гермопенолов при транспортно-перегрузочных операциях.

Оборудования для подъёма этих объектов нет.

Процесс подъёма упавших объектов должен производиться в автоматическом или полуавтоматическом режимах по безлюдной технологии в связи с нахождением объектов в воде и в зоне с повышенным уровнем радиоактивности.

Известны конструкции грузозахватных устройств [1-4, 8-10, 14-23], предназначенных для работы с различными объектами, расположенными как в зонах, безопасных для человека, так и в зонах с повышенным уровнем радиоактивности. Конструктивные схемы автоматических грузозахватных устройств (АГЗУ) общеизвестны; методика проектирования таких устройств представлена в указанных источниках на инженерном уровне.

Упавшие кассета или гермопенол могут быть расположены в горизонтальном, вертикальном или наклонном положениях.

Создание АГЗУ для этих объектов является весьма сложным и ответственным процессом; АГЗУ должны быть высоконадёжными и безопасными в эксплуатации.

Проектирование конструкций АГЗУ для указанных условий необходимо производить в условиях, близких к оптимальному, что достигается с применением эвристических методов [5-7, 24-26].

Показано, что АГЗУ для указанных условий должны базироваться на гибком подвесе грузозахватных устройств [11-14], т.к. конструкции существующего транспортно-технологического оборудования даже при их модернизации не пригодны для подъёма упавших объектов.

На рисунке 1 приведена исходная схема возможных положений упавших кассеты или гермопенола.

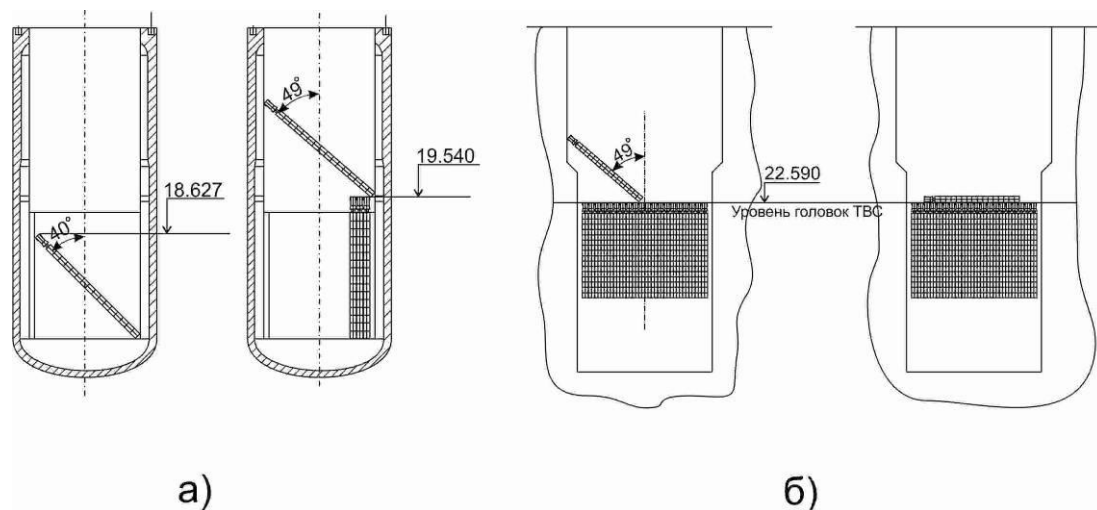


Рис. 1. – Возможные положения упавшей кассеты в реакторе (а) и в бассейне выдержке (б)

На рисунке 2 изображена головка упавшей кассеты, со всеми необходимыми размерами. Точка K и размеры $\varnothing 170$, S , S_H , 355 представлены в качестве опорных элементов. Точка K является базовой опорной точкой, на которую будет опираться захватный элемент. Размеры S и S_H являются базовыми, определяющими точку контакта разрезной втулки захватного устройства с цилиндрической поверхностью $\varnothing 170$ кассеты. Этого достаточно для построения исходной конструктивной схемы захвата.

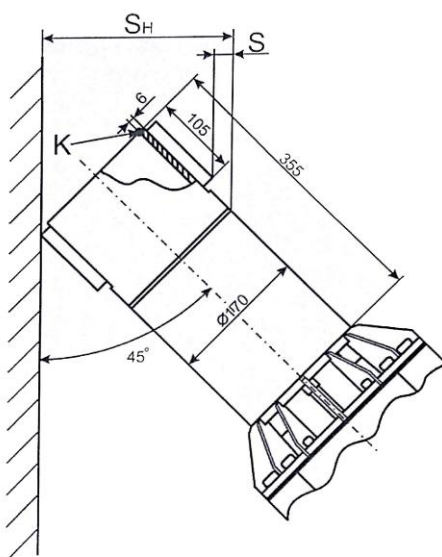


Рис. 2. – Размеры головки упавшей кассеты в наклонном положении

Для подъёма кассеты целесообразно использовать перегрузочную машину МПК [14], имеющую в своей конструкции гибкие канаты, на которых подвешивают АГЗУ. Для взаимодействия захватного устройства с головкой кассеты используется разрезная втулка с подъёмными шипами, за которые и будет осуществляться захват кассеты.

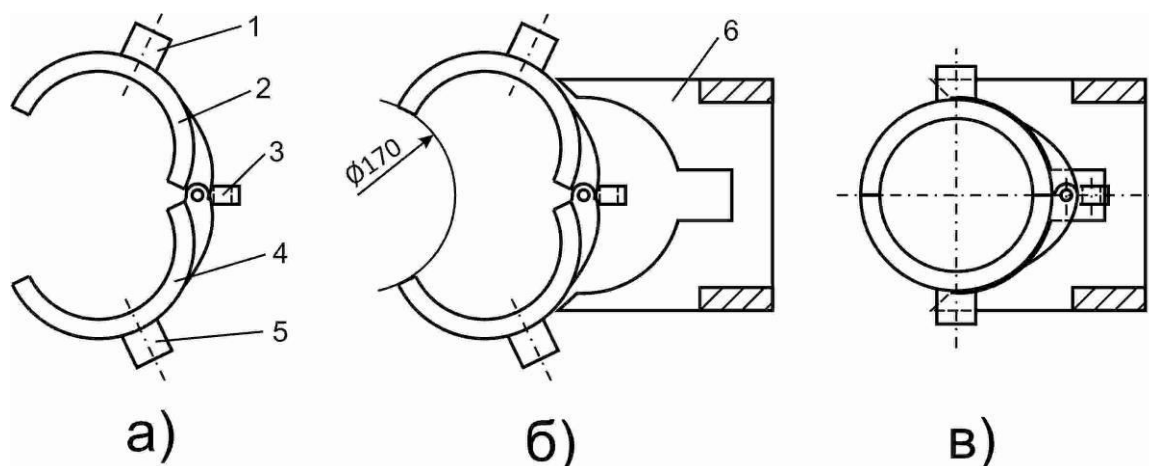


Рис. 3. – Положение разрезной втулки при захвате головки кассеты за цилиндрическую часть $\varnothing 170$ мм.
 а) – открытое положение в момент наведения на объект; б) – положение в момент наведения на объект;
 в) – положение втулки, замкнутой на цилиндр $\varnothing 170$ мм головки кассеты. 1 – шип подъёма; 2 –
 полувтулка; 3 – проушина; 4 – полувтулка; 5 – шип подъёмный; 6 – вилка фиксирующая

На рисунке 4 представлена эскизно схема взаимодействия захватного устройства с головкой кассеты, в замкнутом положении.

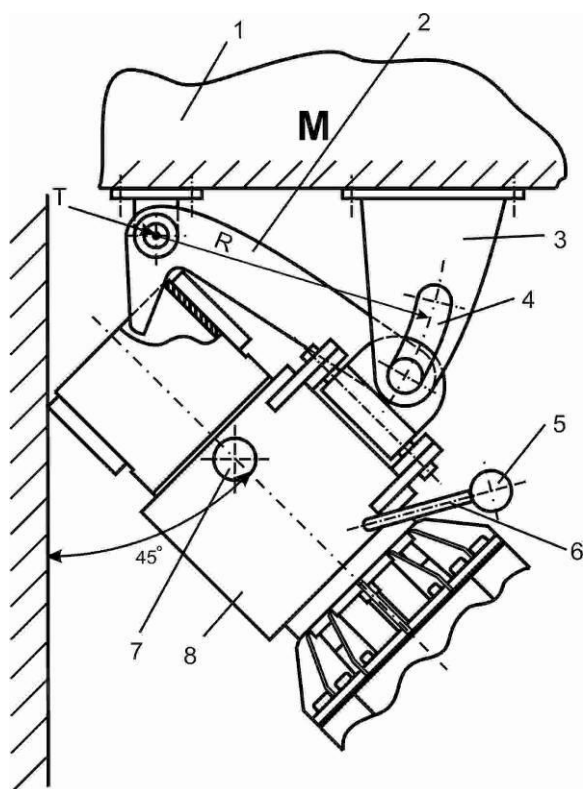


Рис. 4. – Схема воздействия захватного устройства с головкой кассеты: 1 – нагрузочная масса; 2 – рычаг;
 3 – кронштейн; 4 – паз регулировочный; 5 – пружинное устройство; 6 – стержень; 7 – шип подъёмный;
 8 – разрезная втулка; Т – ось рычага и вилки фиксирующей; R – радиус оси прорези для проушин

При опускании АГЗУ с нагрузочной массой **М** рычаг 2, опираясь на точку **К**, замыкает разрезную втулку 8 на цилиндре $\varnothing 170$ головки кассеты. Пружинное устройство предназначено только для удержания разрезной втулки в раскрытом виде перед началом операции захвата.

Конструктивные особенности АГЗУ здесь не рассматриваются, т.к. это является элементом существенной новизны и «know-how».

На рисунке 5 представлено подвесное автоматическое грузозахватное устройство[22], и положение в момент транспортировки.

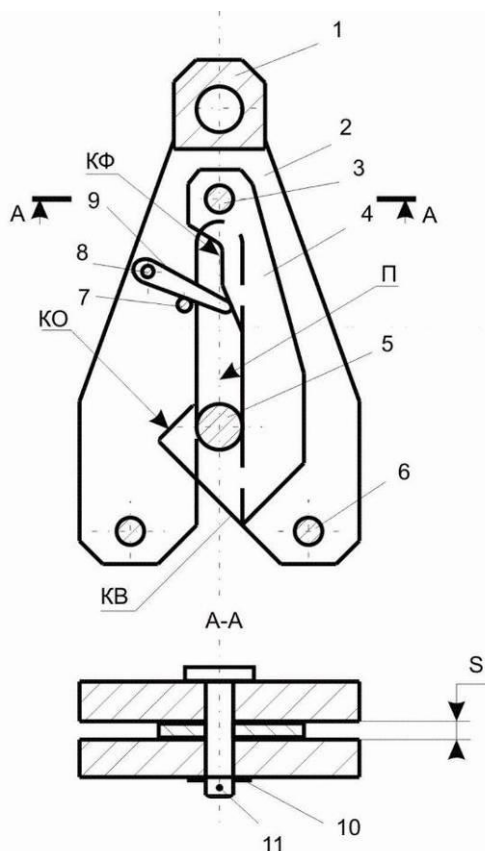


Рис. 5. – Подвесное автоматическое грузозахватное устройство: 1 – серьга; 2 – пластина; 3 – ось несущая; 4 – крюк фасонный; 5 – объект; 6 – вставка; 7 – опора; 8 – ось упора; 9 – упор; 10 – шайба; 11 – шплинт; КВ – плоскость контакта на крюке для обеспечения входа объекта; КО – плоскость контакта на крюке для освобождения объекта; П – паз направляющий; S – зазор между пластинами; КФ – плоскость контакта с упором

Порядок работы АГЗУ очевиден: при перемещении объекта 5 (в нашем случае шипа подъёмного 7 из рисунка 4) вверх или вниз при взаимодействии его с упором 9, поверхностями КФ и КО происходит автоматический захват и освобождение объекта.

На рисунке 6 представлена схема установки датчиков на машине типа МПК, обеспечивающих необходимые условия наведения АГЗУ на объект, захват, перемещение и точную его установку на заданную технологическую позицию.

Точное положение устройства в пространстве обеспечивается 3 энкодерами, каждый из которых определяет положение, относительно одной координатной оси.

Управление, отслеживание состояния элементов перегрузочной машины, состояния и положения поднятого груза, осуществляется посредством функциональной схемы. Она состоит из трёх блоков. Первый – Исполнительный комплекс перегрузочной машины; второй – Устройство числового программного управления, принципиальным отличием от традиционных систем управления является добавление ПЛИС – программируемой логической интегральной схемы; третий – Панель автоматического управления.

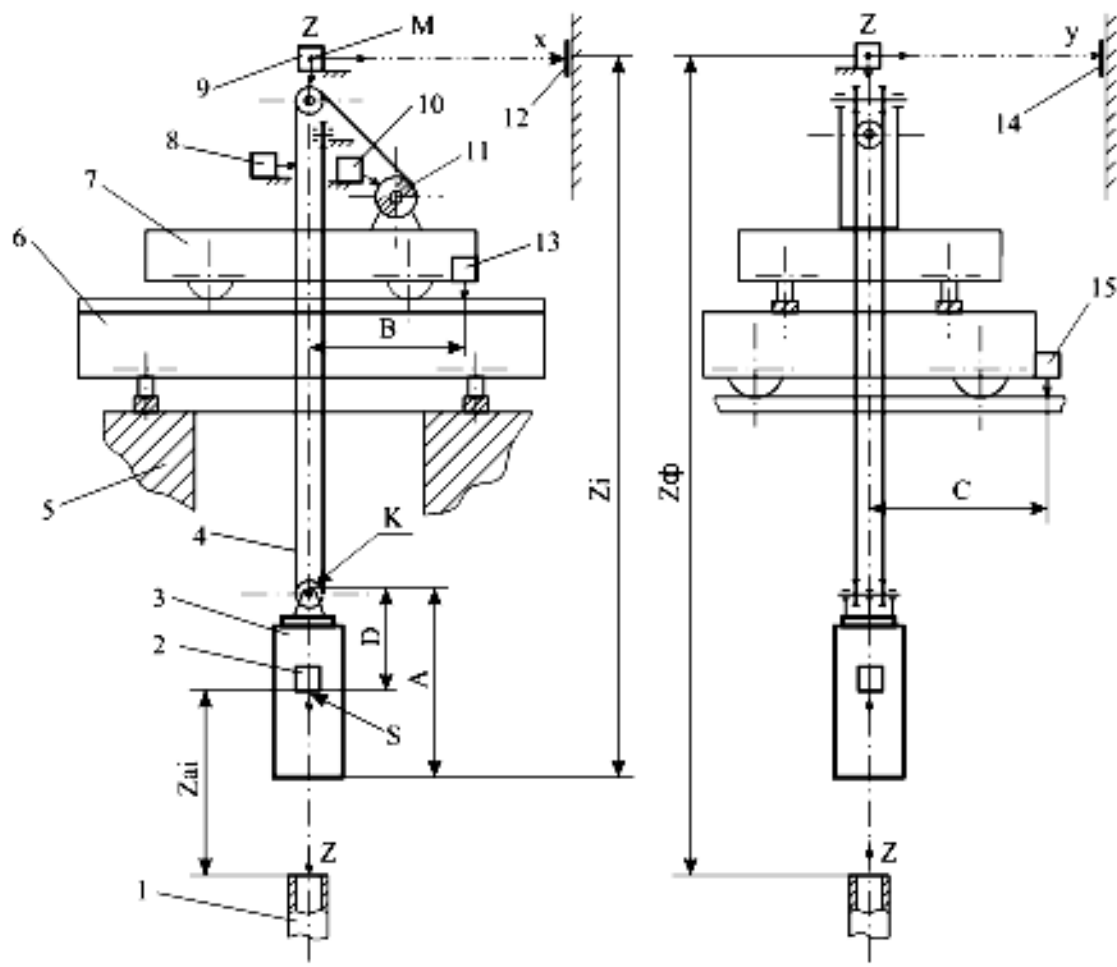


Рис. 6. – Схема установки датчиков положения и определения координат базовых элементов МПК:

1 – захватный элемент объекта – кассеты (ТВС); 2 – устройство определения расстояния от АГЗУ до объекта; 3 – автоматическое грузозахватное устройство – АГЗУ; 4 – канатный подъем в виде сдвоенного полиспаста; 5 – бетонное основание реакторного зала; 6 – мост МПК; 7 – тележка МПК; 8 – устройство определения перемещения каната; 9 – базовая точка М и устройство определения положения базовой точки М по координатам X и Y; 10 – устройство измерения углового и линейного перемещения приводного барабана канатного подъема; 11 – приводной барабан; 12 – базовая линейка, по которой определяется координата точки М по оси X; 13 – устройство определения изменения координаты точки М при движении тележки МПК по оси X; 14 – базовая линейка, по которой определяется координата точки М по оси Y; 15 – устройство определения изменения координаты точки М при движении моста МПК по оси Y; K, M, S – базовые точки на АГЗУ для определения его перемещения по оси Z относительно точки М; Z_ϕ , A, B, C, D – фиксированные координаты установки датчиков положения; Z_i – координата, определяемая от базовой точки М с учетом размера A; Z_{ai} – координата, определяемая от базовой точки S устройства 2 до объекта 1

Уточнение функциональной схемы является обычной инженерной задачей [27], которая решается после создания конструкции АГЗУ.

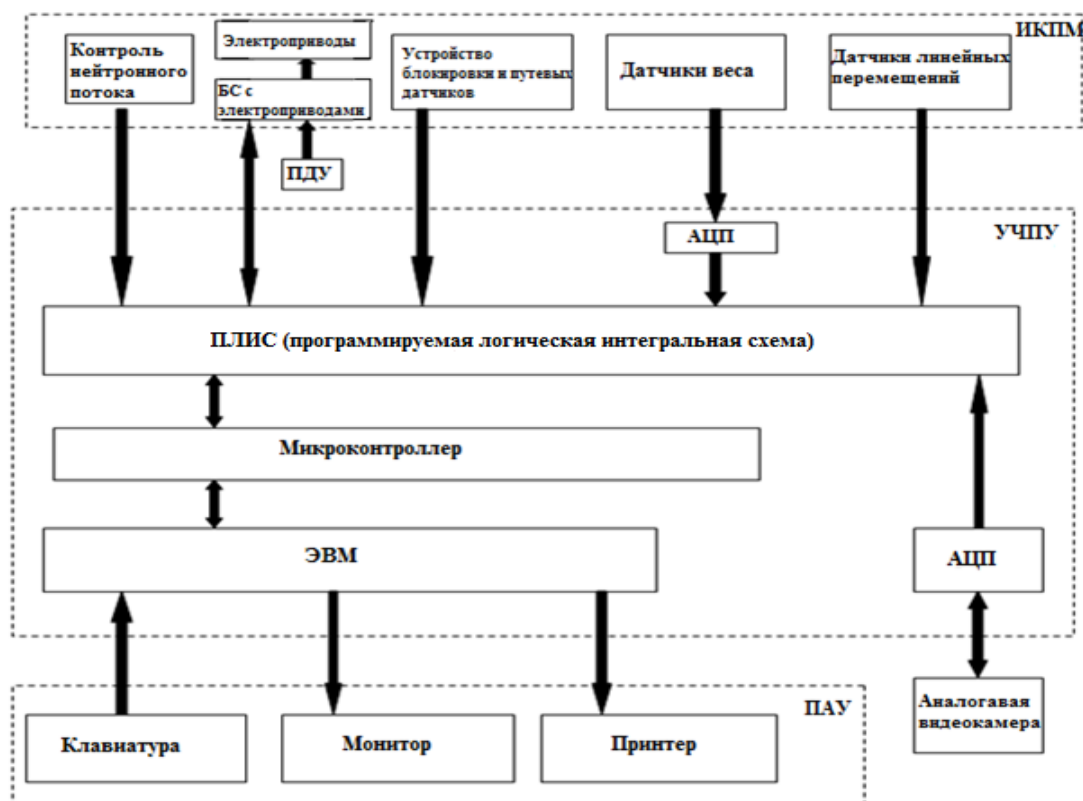


Рис. 7. – Упрощенная функциональная схема системы управления перегрузочной машиной МПК в процессе поднятия упавших объектов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будов, В.М. и др. Конструирование основного оборудования АЭС: Учеб. пособие для вузов [Текст] / В.М. Будов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 264 с.
2. Оберман, Я.И. Строповка грузов: Справ. изд. [Текст] / Я.И. Оберман. М.: Металлургия, 1990. – 336 с.
3. Челпанов, И.Б. и др. Схваты промышленных роботов [Текст] / И.Б. Челпанов, С.Н. Колпашиников. – Л.: Машиностроение, 1989. – 287 с.
4. Вайнсон, А.А. и др. Специализированные крановые грузозахваты для штучных грузов [Текст] / А.А. Вайнсон, А.Ф. Андреев. – М.: Машиностроение, 1972. – 200 с.
5. Половинкин, А.И. Основы инженерного творчества [Текст] / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
6. Настасенко, В.О. Морфологический анализ – метод синтеза тысяч изобретений: Монография [Текст] / В.О. Настасенко. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Херсон: Айлант, 2015. – 100 с.
7. Джонс, Дж.К. Методы проектирования [Текст] / Дж.К. Джонс: Пер. с англ. – 2-е изд., доп. – М.: Мир, 1986. – 326 с.
8. Кравченко, П.Д. и др. Автоматический захват [Текст] / П.Д. Кравченко, А.М. Семенцев, Л.А. Первушин, С.А. Елецкий. А.с. 1710486 СССР, МКИ В 66 С1/66.
9. Кравченко, П.Д. и др. Проектирование нестандартного оборудования. Тяжёлое и атомное машиностроение: Монография [Текст] / П.Д. Кравченко, А.Н. Дудченко, В.А. Нарыжный, Т.В. Рыбасова, Е.А. Косова; Под ред. П.Д. Кравченко. – Шахты: ЮРГУЭС, 2001. – 279 с.
10. Кравченко, П.Д. и др. Автоматизированное грузозахватное устройство. Патент РФ на изобретение №2268229 Российская Федерация С1 МПК В66С 1/66 [Текст] / П.Д. Кравченко, И.В. Березин, Е.В. Березин, И. А.Шестакова.; Заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. - № 2004114612; заявл. 13.05.2004; опубл. 20.01.2006, бюл. №26.
11. Кравченко, П.Д. и др. Сравнение конструктивных схем машин перегрузочных с жёстким и гибким подвесом исполнительного органа. Машиностроение и техносфера XXI века [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский // Сборник трудов XIII международной научно – технической конференции в г. Севастополе 2006 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2006. – Т. 2. – 324 с.

12. *Кравченко, П.Д. и др.* Машина МПК с канатным подвесом объектов перегрузки в ядерном реакторе типа ВВЭР. Актуальные проблемы техники и технологии: межвузовский сб. науч. трудов [Текст] / П.Д. Кравченко, В.С. Магалазов, И.М. Яблоновский; Под ред. А. Г. Сапронова. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. – 70 с.
13. Кравченко П.Д., Яблоновский И.М., Магалазов В.С. Новая конструкция перегрузочной машины атомной станции с ВВЭР–1000. как результат эвристического инженерного поиска. Проблемы экономики, науки и образования в сервисе: сб. науч. трудов [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, В.С. Магалазов; Под ред. П.Д. Кравченко. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. – 271 с.
14. *Кравченко, П.Д. и др.* Устройство перегрузки топливных элементов в ядерном реакторе перегрузочными машинами с гибким подвесом объектов. Патент РФ на изобретение № 2319236 Российская Федерация С1 МПК G 21 С 19/66 (2006.01) [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, В.С. Магалазов; Заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. - № 2006119869/06; заявл. 06.06.2006; опубл. 10.03.2008, бюл. №7.
15. *Кравченко, П.Д. и др.* Подвесное автоматическое устройство поворота крышки гермопенала. Патент РФ на изобретение № 2319234 Российская Федерация С1 МПК G 21 С 19/00 (2006.01) [Текст]/ П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский; Заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – №2006112706/06; заявл. 17.04.2006; опубл. 10.03.2008, бюл. №7.
16. *Кравченко, П.Д. и др.* Подвесное автоматическое устройство поворота и захвата пробки пенала. Патент РФ на изобретение № 2332729 Российская Федерация С1 МПК G 21С 3/00 (2006.01) [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, В.С. Магалазов; заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса. – №2007111699/06; заявл.29.03.2007; опубл. 27.08.2008. Бюл.№24. – ил.
17. *Кравченко, П.Д. и др.* Конструкторские решения при проектировании транспортно – технологического оборудования в атомном машиностроении: Монография [Текст] / П.Д. Кравченко, И.Ю. Пучкина, И.А. Шестакова [и др.]; Под ред. П.Д. Кравченко. – Шахты: ЮРГУЭС, 2008. – 186 с.
18. *Кравченко, П.Д. и др.* Подвесной автоматический захватно-зажимной ловитель. Пат. 2474529 Российская Федерация С2 (51)МПК В66С 1.62 (2006.01) [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, И.В. Березин, Д.Н. Федоренко; заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса №2011102098/11; заявл.20.01.2011.
19. *Кравченко, П.Д. и др.* Цанговый захват трубы. Пат. 2476370 Российская Федерация С2 (51)МПК В66С 1/54 (2006.01) [Текст] / П.Д. Кравченко, А.И. Берела, И.В. Березин, Д.Н. Федоренко, И.М. Яблоновский; заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса №2011132195/07; заявл.29.07.2011.
20. *Кравченко, П.Д. и др.* Подвесной автоматический захват-ловитель. Пат. 2474528 Российская Федерация С2 (51)МПК В66С 1./42(2006.01) [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, И.В. Березин, Д.Н. Федоренко; заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса №2011102123/11; заявл. 20.01.2011.
21. *Кравченко, П.Д. и др.* Полуавтоматический захват универсального гнезда. Пат. 2481265 Российская Федерация С2 (51)МПК В66С 1/66 (2006.01) [Текст] / П.Д. Кравченко, А.И. Берела, И.В. Березин, Д.Н. Федоренко, И.М. Яблоновский; заявитель и патентообладатель Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса №2011132196/07; заявл.29.07.2011.
22. *Кравченко, П.Д. и др.* Подвесное автоматическое грузозахватное устройство [Текст] / П.Д. Кравченко, Д.Н. Федоренко, И.В. Березин, И.М. Яблоновский. Патент РФ на изобретение №2455251 Бюл. №19 от 10.07.2012.
23. *Кравченко, П.Д. и др.* Автоматический захват плиты [Текст] / П.Д. Кравченко, Е.А. Зайцев, Д.Н. Федоренко, И.В. Березин, И.М. Яблоновский. Патент РФ на изобретение №2467944 Бюл. №33 от 27.11.2012.
24. *Кравченко, П.Д. и др.* Концепция проектирования транспортного оборудования при работе в особых условиях. Машиностроительные технологии и техника автоматизации – 2012 [Текст] / П.Д. Кравченко, Д.Н. Федоренко // Сборник трудов международной научно-технической конференции в г. Ереване, 9–15 июля 2012 г. – Ереван: ГИУА, 2012. – 280 с.
25. Kravchenko P.D., Fedorenko D.N. Heuristic Method of Design of The Load Gripping and Manipulating Devices For Work In Special Conditions. International Journal of Applied Engineering Research. Volume 10, Number 6 (2015) ISSN 0973-4562, pp. 14537–14542.
26. Kravchenko P.D., Fedorenko D.N. New Engineering Decisions in Nuclear Engineering. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, Vol. 11, №3, February, pp. 1951–1955.
27. *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.

REFERENCES

- [1] Budov V.M., Farafonov V.A. Konstruirovaniye osnovnogo oborudovaniia AES [Construction of the Main NPP Equipment]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1985, 264 p. (in Russian)
- [2] Oberman Ya.I. Stropovka грузов: Spravochnoe izdanie: Metallurgiya [Strapping of Freights: Reference Book: Metallurgy]. M., 1990. 336 p. (in Russian)
- [3] Chelpanov I.B., Kolpashnikov S.N. Skhvaty promyshlennykh robotov [Grips of Industrial Robots]. Leningrad. Pub. Mashinostroeniye [Mechanical Engineering]. 1989, 287 p. (in Russian)
- [4] Vainson A.A., Andreev A.F. Spetsializirovannyye kranovyye gruzozakhvaty dlya shtuchnykh gruzov [Specialized Crane Load Handling for Piece Cargo]. M. Pub. Mashinostroeniye [Mechanical Engineering], 1972, 200 p. (in Russian)
- [5] Polovinkin A.I. Osnovy inzhenernogo tvorchestva [Fundamentals of Engineering Creativity]. M. Pub. Mashinostroeniye [Mechanical Engineering], 1988, 368 p. (in Russian)
- [6] Nastasenkov V.O. Morfologicheskii analiz – metod sinteza tysyach izobretenii: Monografiya [Morphological Analysis - a Method of Synthesis of Thousands of Inventions: Monograph]. Izd. 2-e, pererab. i dop. Kherson. Pub. Ailant, 2015, 100 p. (in Russian)
- [7] Dzhons Dzh.K. Metody proektirovaniya [Design Methods]: Per. s angl. 2-e izd., dop. M. Pub. Mir, 1986, 326 p. (in Russian)
- [8] Kravchenko P.D., Sementsev A.M., Pervushin L.A., Eletskii S.A. Avtomaticheskii zakhvat [Automatic Capture]. A.s. 1710486 SSSR, MKI V 66 S1/66 (in Russian)
- [9] Kravchenko P.D., Dudchenko A.N., Naryzhnyi V.A., Rybasova T.V., Kosova E.A. Proektirovaniye nestandartnogo oborudovaniia. Tiazheloe i atomnoe mashinostroeniye: Monografiya [Design of Non-Standard Equipment. Heavy and Atomic Engineering: Monograph]. Pod red. P.D. Kravchenko. Shakhty. Pub. IuRGUES, 2001, 279 p. (in Russian)
- [10] Kravchenko P.D., Berezin I.V., Berezin E.V., Shestakova I.A. Avtomatizirovannoe gruzozakhvatnoye ustroystvo. Patent RF na izobretenie [Automated Load Gripping Device. Patent of the Russian Federation for invention] №2268229 Rossiiskaia Federatsiya S1 MPK V66S 1/66; Zaiavitel i patentoobladatel Iuzhno-Ros. gos. un-t ekonomiki i servisa. № 2004114612; zaiavl. 13.05.2004; opubl. 20.01.2006, biul. №26. (in Russian)
- [11] Kravchenko P.D., Yablonovskii I.M. Sravneniye konstruktivnykh skhem mashin peregruzochnykh s zhestkim i gibkim podvesom ispolnitelnogo organa. Mashinostroeniye i tekhnosfera XXI veka. Sbornik trudov XIII mezhdunarodnoi nauchno – tekhnicheskoi konferentsii v g. Sevastopole 2006 g. [Comparison of Constructive Schemes of Loading Machines with Rigid and Flexible Suspension of the Executive Body. Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI century. // Works of the XIII International Scientific and Technical Conference in Sevastopol 2006] V 5-ti tomakh. Donetsk. Pub. DonNTU, 2006, Vol. 2, 324 p. (in Russian)
- [12] Kravchenko P.D., Magaliasov V.S., Yablonovskii I.M. Mashina MPK s kanatnym podvesom ob'ekтов peregruzki v yadernom reaktore tipa VVER. Aktualnye problemy tekhniki i tekhnologii: mezhvuzovskii sb. nauch. trudov [A machine with a Cable Suspension of Overhead Objects in a Nuclear Reactor of the PWR type. Actual Problems of Technology and Technology: interuniversity collection of scientific papers] / Pod red. A.G. Sapronova. Shakhty. Pub. IuRGUES, 2007, 70 p. (in Russian)
- [13] Kravchenko P.D., Yablonovskii I.M., Magaliasov V.S. Novaya konstruktsiya peregruzochnoi mashiny atomnoi stantsii s VVER–1000. kak rezultat evristicheskogo inzhenernogo poiska. Problemy ekonomiki, nauki i obrazovaniia v servise: sb. nauch. trudov [The New Design of the Reloading Machine of the Nuclear Power Plant with PWR-1000. As a result of Heuristic Engineering Search. Problems of Economics, Science and Education in the Service: a collection of scientific papers] / Pod red. P. D. Kravchenko. Shakhty. Pub. IuRGUES, 2007, 271 p. (in Russian)
- [14] Kravchenko P.D., Yablonovskii I.M., Magaliasov V.S. Ustroystvo peregruzki toplivnykh elementov v yadernom reaktore peregruzochnymi mashinami s gibkim podvesom ob'ekтов. Patent RF na izobretenie [The device for the Transfer of Fuel Cells in a Nuclear Reactor by Reloading Machines with Flexible Suspension of Objects. Patent of the Russian Federation for invention] №2319236 Rossiiskaia Federatsiya S1 MPK G 21 C 19/66 (2006.01); Zaiavitel i patentoobladatel Iuzhno-Ros. gos. un-t ekonomiki i servisa. №2006119869/06; zaiavl. 06.06.2006; opubl. 10.03.2008, biul. №7. (in Russian)
- [15] Kravchenko P.D., Yablonovskii I.M. Podvesnoye avtomaticheskoe ustroystvo povorota kryshki germopenala. Patent RF na izobretenie [Suspended Automatic Device for Turning the Hermetic Cover. Patent of the Russian Federation for invention] №2319234 Rossiiskaia Federatsiya S1 MPK G 21 C 19/00 (2006.01); Zaiavitel i patentoobladatel Iuzhno-Ros. gos. un-t ekonomiki i servisa. №2006112706/06; zaiavl. 17.04.2006; opubl. 10.03.2008, biul. №7. (in Russian)

- [16] Kravchenko P.D., Yablonovskii I.M., Magalasov V.S. Podvesnoe avtomaticheskoe ustroystvo povorota i zakhvata probki penala. Patent RF na izobretenie [Suspended Automatic Device for Turning and Capturing the Cork Case. Patent of the Russian Federation for invention] №2332729 Rossiiskaia Federatsiia S1 MPK G 21C 3/00 (2006.01); zaiavitel i patentoobladatel Iuzhno-Ros.gos.un-t ekonomiki i servisa. №2007111699/06; zaiavl. 29.03.2007; opubl. 27.08.2008. Biul. №24. (in Russian)
- [17] Kravchenko P.D., Puchkina I.Iu., Shestakova I.A. etc. Konstruktorskie resheniia pri proektirovanii transportno – tekhnologicheskogo oborudovaniia v atomnom mashinostroenii: Monografiia [Design Solutions for the Design of Transport - Technological Equipment in Nuclear Engineering: Monograph] Pod red. P.D. Kravchenko. Shakhty. Pub. IuRGUES 2008. – 186 p. (in Russian)
- [18] Kravchenko P.D., Fedorenko D.N., Yablonovskii I.M., Berezin I.V. Podvesnoi avtomaticheskii zakhvatno-zazhimnoi lovitel [Suspended Automatic Clamping and Gripping Device]. Pat. 2474529 Rossiiskaia Federatsiia S2 (51)MPK V66C 1.62 (2006.01); zaiavitel i patentoobladatel Iuzhno-Ros. gos. un-t ekonomiki i servisa. №2011102098/11; zaiavl. 20.01.2011. (in Russian)
- [19] Kravchenko P.D., Berela A.I., Fedorenko D.N., Berezin I.V., Yablonovskii I.M. Tsangovy zakhvat truby [Collet Gripper]. Pat. 2476370 Rossiiskaia Federatsiia S2 (51)MPK V66C 1/54 (2006.01); zaiavitel i patentoobladatel Iuzhno-Ros. gos. un-t ekonomiki i servisa №2011132195/07; zaiavl. 29.07.2011. (in Russian)
- [20] Kravchenko P.D., Fedorenko D.N., Berezin I.V., Yablonovskii I.M. Podvesnoi avtomaticheskii zakhvat-lovitel[Suspended Automatic Gripping -Catcher] . Pat. 2474528 Rossiiskaia Federatsiia S2 (51)MPK V66C 1./42(2006.01); zaiavitel i patentoobladatel Iuzhno-Ros. gos. un-t ekonomiki i servisa №2011102123/11; zaiavl. 20.01.2011. (in Russian)
- [21] Kravchenko P.D., Berela A.I., Fedorenko D.N., Berezin I.V., Yablonovskii I.M. Poluavtomaticheskii zakhvat universalnogo gnezda [Semi-Automatic Gripping of the Universal Socket]. Pat. 2481265 Rossiiskaia Federatsiya S2 (51)MPK V66C 1/66 (2006.01); zaiavitel i patentoobladatel Iuzhno-Ros. gos. un-t ekonomiki i servisa №2011132196/07; zaiavl. 29.07.2011. (in Russian)
- [22] Kravchenko P.D., Fedorenko D.N., Berezin I.V., Iablonovskii I.M. Podvesnoe avtomaticheskoe gruzozakhvatnoe ustroystvo. Patent RF na izobretenie [Suspended Automatic Lifting Device] №2455251 Biul. №19 ot 10.07.2012. (in Russian)
- [23] Kravchenko P.D., Zaitsev E.A., Fedorenko D.N., Berezin I.V., Iablonovskii I.M. Avtomaticheskii zakhvat plity. Patent RF na izobretenie [Automatic Plate Gripper] №2467944 Biul. №33 ot 27.11.2012. (in Russian)
- [24] Kravchenko P.D., Fedorenko D.N. Kontseptsii proektirovaniia transportnogo oborudovaniia pri rabote v osobykh usloviakh. Mashinostroitelnye tekhnologii i tekhnika avtomatizatsii – 2012. Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii v g. Erevane, 9-15 iyulia 2012 g [The Concept of Designing Transport Equipment when Working in Special Conditions. Machine-Building Technologies and Automation Technology – 2012. Collection of Works of the International Scientific and Technical Conference in Yerevan, July 9-15, 2012]. Erevan. Pub. GIUA, 2012, 280 s. (in Russian)
- [25] Kravchenko P.D., Fedorenko D.N. Heuristic Method of Design of The Load Gripping and Manipulating Devices For Work In Special Conditions. International Journal of Applied Engineering Research. Volume 10, Number 6 (2015) ISSN 0973-4562, pp. 14537–14542. (in English)
- [26] Kravchenko P.D., Fedorenko D.N. New Engineering Decisions in Nuclear Engineering. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, Vol. 11, №3, February, pp. 1951–1955. (in English)
- [27] Shiiianov A.I. Sistemy upravleniia peregruzochnykh manipulatorov AES s VVER [Control Systems for Handling Manipulators of NPPs with PWR]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1987, 176 p. (in Russian)

Organization of Automatic Load Gripping Device Designing for Fallen Cartridge Lifting in the PWR 1000 Reactor

P.D. Kravchenko*¹, D.N. Fedorenko², V.Yu. Ryabenko*³**

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

¹e-mail: krapa21@yandex.ru
ORCID: 0000-0003-3437-9998

WoS ResearcherID: G-5279-2017

²e-mail: fdn999@ya.ru

ORCID: 0000-0003-2483-7801

WoS ResearcherID: G-5164-2017

**** Institute of Service and Business the Branch of Don State Technical University**
Shevchenko str., 147, Shakhty, Rostov region, Russia 346500

³e-mail: vya4eslav-00@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-8593-0570

WoS ResearcherID: G-5165-2017

Abstract – A plan for designing automatic load-gripping devices (ALGD) for fallen cartridge lifting in a nuclear reactor of the PWR type is presented. The existing constructive schemes of ALGD are considered. Heuristic methods in the pre-project analysis and in the design process are applied.

Keywords: Automatic load-gripping devices, design, fallen cartridge lifting, nuclear reactor, NPP.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 536.242

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОЖИДКОСТЕЙ В
СИСТЕМАХ ОТВОДА ТЕПЛА В ЗАПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ,
СОПРОВОЖДАЕМЫХ ПЛАВЛЕНИЕМ АКТИВНОЙ ЗОНЫ**

© 2017 А.Л. Сироткина, Е.Д. Федорович, В.В. Сергеев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты оценки перспектив применения нанодисперсных жидкостей (наножидкостей, НЖ) в системах безопасности АЭС, в частности, в системе аварийного охлаждения корпуса реактора в запроектных авариях, сопровождаемых плавлением активной зоны. Оценка основана на результатах проведенных авторами доклада экспериментов и теоретического моделирования, краткое описание которых дано в начале статьи.

Ключевые слова: удержание кориума, наножидкость, системы безопасности, кризис кипения, критический тепловой поток.

Поступила в редакцию: 06.05.2017

ВВЕДЕНИЕ

В течение всего периода развития техники и технологий человек стремился к тому, чтобы создаваемое им энергетическое оборудование имело большую мощность при меньших размерах, чем обусловлена необходимость постоянного поиска все новых способов интенсификации теплообмена. Особую важность проблема имеет в атомной энергетике и атомной технике, в частности, в системах безопасности АЭС, чьей основной функцией является недопущение перегрева и пережога тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), предупреждение и смягчение последствий аварий.

Кипение, особенно пузырьковое, является одним из наиболее эффективных механизмов теплоотвода от высоконапряженных поверхностей нагрева. При этом имеются существенные ограничения по отводимому тепловому потоку, связанные с возникновением кризиса теплообмена (здесь и далее под словом «кризис» имеется в виду кризис кипения 1-го рода – резкий переход от пузырькового кипения к пленочному, сопровождающийся скачкообразным ростом температуры поверхности с возможным ее пережогом). Математическое моделирование процессов кипения и кризиса кипения – чрезвычайно сложно, поскольку, фактически, имеет место взаимодействие трех фаз – жидкости, пара и твердого тела, на котором происходит кипение. Традиционные подходы к описанию этих явлений включают в себя только свойства жидкости и пара; свойства твердой поверхности учитываются некоторыми поправками, базирующимися на экспериментальных данных, либо не учитываются вовсе, несмотря на то, что влияние свойств поверхности на теплообмен при кипении и кризис отмечалось еще в работах С.С. Кутателадзе [1].

Проблема включения свойств поверхности в корреляции для расчета теплообмена при кипении и критического теплового потока (КТП) в последние годы стала чрезвычайно актуальной (например, см. [2-3]) из-за появления нового типа теплоносителей, оказывающих влияние на теплообменную поверхность. К таким

теплоносителям относят нанодисперсные жидкости (наножидкости, НЖ) – чаще всего водные (либо на основе органических жидкостей) дисперсии наночастиц (частиц с размерами 100 нм и менее).

Одной из наиболее интересных с практической точки зрения особенностей НЖ является способность существенно (до двух и более раз) увеличивать критическую плотность теплового потока при кипении. Замечено, что основной причиной этого является слой на теплообменной поверхности, образующийся непосредственно в ходе кипения [2-5]. Влияние этого слоя сводится к трем основным факторам:

- за счет специфической морфологии поверхности значительно увеличивается шероховатость и улучшается смачиваемость;
- структура покрытия – пористая, что обеспечивает дополнительный подвод жидкости к поверхности нагрева за счет капиллярных сил;
- нанослой сам по себе зачастую обладает достаточно низкой теплопроводностью и вносит дополнительное термическое сопротивление между обогреваемой поверхностью и жидкостью; однако, учитывая микронную толщину слоя, этот фактор невелик.

Для практического использования в энергетическом оборудовании интересны не столько сами наножидкости, сколько наноструктурированные поверхности (поверхности с пористым покрытием из наночастиц). Стоит отметить, что формирование покрытий подобного рода возможно не только при кипении НЖ:

- группа Дж. Буонджиорно в Массачусетском технологическом институте (США) синтезировали пористый слой, по форме аналогичный осадку, образующемуся на тепловыделяющих элементах в ходе эксплуатации, путем послойного осаждения частиц на подложку [6];
- в работе [7] продемонстрирована возможность получения покрытия подобного типа электрофорезным методом (ElectroPhoretic Deposition, EPD).

Однако данные методы являются достаточно дорогостоящими и не позволяют получить такие же высокие значения КТП, как в случае слоя, сформированного при кипении НЖ. Таким образом, в настоящее время задача исследования образования и свойств нанопокрыва, получаемого путем осаждения при кипении НЖ, а также возрастания КТП в элементах энергетического оборудования с поверхностями нагрева, обработанными подобным образом, является крайне актуальной с точки зрения дальнейшего практического применения наноструктурированных поверхностей в энергетике и технике.

1 ЦЕЛЬ И МЕТОД

Целью исследования, результаты которого изложены в настоящей статье, является оценка возможного повышения эффективности отвода тепла от корпуса реактора в запроектных авариях, сопровождаемых плавлением активной зоны (стратегия удержания кориума внутри корпуса – «In-Vessel Retention Strategy»), в двух вариантах:

- при использовании НЖ в качестве теплоносителя системы;
- при предварительном нанесении нанопокрыва на корпус реактора (а в качестве теплоносителя системы – дистиллят).

На рисунке 1 представлена схема организации отвода тепла от корпуса реактора в запроектных авариях, сопровождаемых плавлением активной зоны (на примере легководного корпусного реактора [8]).

Достижение критической плотности теплового потока от кориума к охлаждающей среде приведет к проплавлению корпуса и выходу высокоактивных веществ в

герметичную оболочку. Отсюда следует, что надежность работы данной системы (и вообще реализация «стратегии удержания») напрямую зависит от величины КТП.

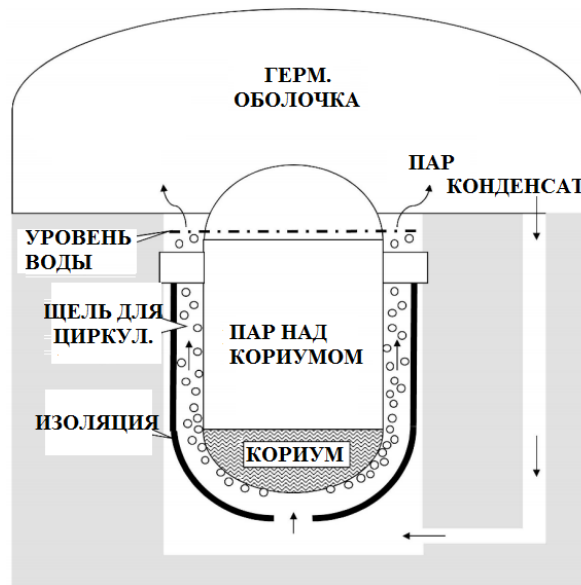


Рис. 1. – Схема организации отвода тепла от корпуса реактора в запроектных авариях [2]

Оценка повышения КТП при использовании наножидкости как теплоносителя системы базируется на разработанной авторами теоретической модели, связывающей режимные параметры кипения (величину плотности теплового потока, концентрацию НЖ, время кипения) со свойствами образующегося нанопокртия и величиной КТП. Ниже приведено краткое описание модели.

Процесс образования нанослоя на обогреваемой поверхности при кипении НЖ условно разделяется на 4 стадии:

СТАДИЯ 1. «ИСХОДНОЕ СОСТОЯНИЕ»

Рассматриваемая система состоит из обогреваемой поверхности и дисперсии наночастиц (наножидкости) малой концентрации (ниже 0,1% об.).

Изначально поверхность нагревателя – гладкая, с равномерно распределенными центрами парообразования (например, адсорбированными атомами/молекулами газов). Поверхность обогревается; ее перегрев достаточен для начала пузырькового кипения.

Дисперсия прогрета до температуры насыщения. Невысокая концентрация позволяет принять допущение, что теплофизические свойства дисперсии не отличаются от свойств базовой жидкости (дистиллята в данном случае).

Осаждение частиц на поверхность при однофазной конвекции наножидкости отсутствует (что подтверждается данными, опубликованными в литературе, и собственными наблюдениями автора в ходе проведения экспериментальных работ). Это может объясняться, в частности, следующим образом: частицы в дисперсии движутся хаотически, концентрация их мала. Соответственно, мала и вероятность взаимодействия друг с другом и с поверхностью.

СТАДИЯ 2. «ПЕРВЫЕ ПАРОВЫЕ ПУЗЫРИ»

Равномерность распределения центров парообразования на исходной поверхности нагрева означает, что возникновение пузыря равновероятно в любом месте

поверхности. Пузырь возникает с радиусом, равным критическому R^* , и растет до размера, равного отрывному диаметру D_0 . На этой стадии для вычисления D_0 еще может быть использована широко распространенная модель Фритца [9].

При испарении дисперсии в пузырь НЧ, находившиеся в данном объеме дисперсии, частично переходят в жидкий микрослой под пузырем, откуда оседают при выпаривании этого микрослоя (рис. 2):



Рис. 2. – Одиночные паровые пузыри в НЖ (Стадия 2 процесса)

Количество частиц, перешедших из пара в микрослой под пузырем, учтем коэффициентом ξ , равным отношению времени образования монослоя на поверхности нагревателя при 100%-ном оседании частиц к реальному времени образования слоя. Этот коэффициент далее будет вычислен с использованием полученных авторами настоящей статьи экспериментальных данных по толщине нанослоя, образовавшегося на поверхности нагревателя при определенных условиях (время, тепловой поток, концентрация).

СТАДИЯ 3. «ОБРАЗОВАНИЕ ПЕРВОГО СЛОЯ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦА – ПОВЕРХНОСТЬ»

В качестве допущения принято, что частицы, находясь во взвешенном состоянии в дисперсии, не взаимодействуют между собой (иными словами, не «слипаются», находясь во взвешенном состоянии). Также в первом приближении не будем учитывать, что не все частицы из дисперсии оседают на поверхность – учтем это после, введением коэффициента ξ в итоговое уравнение.

Исходя из соображений, что при отрыве пузыря частицы покрывают площадь поверхности, равную $0,25\pi D_0^2$, с учетом вероятности для пузыря образоваться в месте, где уже есть частицы, было получено выражение для времени образования «монослоя» (единичного слоя на поверхности) следующего вида:

$$\tau = \frac{2}{9} \cdot 10^{-7} \frac{F_{\text{пов}} \cdot D_0 (\rho'' \cdot r)^3 \Delta T^2}{\xi \cdot q \sigma^2 T_{\text{нас}}^2} \quad (1)$$

где $F_{\text{пов}}$ – площадь поверхности;

D_0 – отрывной диаметр пузыря;

ρ'' – плотность пара;

r – удельная теплота парообразования;

ΔT – перегрев поверхности относительно температуры насыщения (в градусах Кельвина);

ξ – коэффициент, учитывающий, что не все частицы переходят из объема

- испарившейся дисперсии в микрослой под пузырем;
- q – плотность теплового потока при кипении;
- σ – коэффициент поверхностного натяжения;
- $T_{\text{нас}}$ – температура насыщения.

СТАДИЯ 4. «ОБРАЗОВАНИЕ ВТОРОГО И ДАЛЕЕ СЛОЯ ЧАСТИЦ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦА – ЧАСТИЦА»

Модель Фритца для отрывного диаметра парового пузыря применима только для гладкой поверхности. После возникновения на ней первого слоя наночастиц поверхность уже не может считаться гладкой. С учетом наличия впадин на поверхности средним диаметром устья d_k отрывной диаметр может быть найден как [10]:

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{6d_k\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')}} \quad (2)$$

- где d_k – диаметр устья;
- σ – коэффициент поверхностного натяжения;
- g – ускорение свободного падения;
- ρ' – плотность воды;
- ρ'' – плотность пара.

Шероховатость ψ , суть отношение площади шероховатой поверхности к площади гладкой поверхности, может быть вычислена как:

$$\psi = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4 \cdot \delta_{\text{вп}}^2} \left[\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \theta} + 1} - 1 \right] + 1 = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4 \cdot \delta_{\text{вп}}^2} \left[\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right] + 1, \quad (3)$$

- где $\delta_{\text{вп}}$ – расстояние между центрами впадин на поверхности;
- θ – краевой угол смачивания.

Можно принять, что глубина впадины приблизительно равна толщине покрытия $\delta_{\text{покр}}$. Тогда, учитывая $\delta_{\text{покр}} = d_k/(2 \tan \theta)$, в скобках выражения (3) под корнем получаем отношение $d_k^2/(4 \delta_{\text{покр}}^2)$.

С учетом наблюдаемой авторами в экспериментах зависимости параметров покрытия (d_k , $\delta_{\text{покр}}$) от режимных параметров кипения (объемной концентрации НЖ C_0 , времени выдержки $\tau_{\text{эк}}$, плотности теплового потока q_0) выражение для коэффициента шероховатости ψ принимает вид:

$$\psi = K_1 \cdot (q_0^n \tau_{\text{эк}} C_0^m)^2 \cdot \left[\sqrt{K_2 \cdot (q_0^n \tau_{\text{эк}} C_0^m) + 1} - 1 \right] + 1, \quad (4)$$

где K_1 , K_2 – константы, связанные между собой соотношением $K_1 = K_2 \cdot \pi \cdot B^2 / \delta_{\text{вп}}^2$.

Относительное увеличение КТП в НЖ относительно КТП в дистилляте выражается коэффициентом ($\kappa^{-0.5}$) (см. модель Теофануса – Дина [11]):

$$\kappa^{-0,5} = 2,8 \cdot \left[1 - \frac{\sqrt{1 - K_3^2 \psi^2}}{2} - \frac{\frac{\pi}{2} - \arccos(K_3 \psi)}{2K_3 \psi} \right]^{0,25}, \quad (5)$$

где K_3 – также некоторая константа.

Из сравнения с экспериментальными данными получаем:

$n = 2$; $m = -0,02$; $K_1 = 0,001$; $K_2 = 0,08$; $K_3 = 0,005$

Приведенные выше соотношения в настоящей работе были использованы для оценки повышения КТП при использовании НЖ как теплоносителя в системе отвода тепла от корпуса реактора в ходе запроектных аварий с плавлением активной зоны.

Оценка повышения КТП при предварительном нанесении нанопокрyтия на корпус реактора базируется на распространении полученных в ходе экспериментов результатов на данный случай. Предполагается, что покрытие нанесено при осаждении НЧ в ходе кипения НЖ в оптимальном из исследованных режимов; максимально достигнутое относительное повышение КТП в этом случае составляет 33%. Преимущество данного способа – заводская обработка поверхности, что не требует усложнений системы для поддержания состояния НЖ. Однако аппроксимирование экспериментальных данных на случай использования воды как теплоносителя, кипящего на покрытии подобного рода, требует дополнительных исследований.

2 РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ

При использовании наножидкости как теплоносителя системы получаем следующие оценочные результаты:

Предполагается, что при аварии наножидкость заполняет пространство вокруг корпуса реактора. Корпус охлаждается за счет кипения наножидкости. Пар охлаждается во внешнем охладителе и снова поступает в объем системы вокруг реактора. Случай соответствует кипению наножидкости в большом объеме. В ходе аварии тепловой поток через стенку корпуса реактора может повышаться из-за: выпаривания теплоносителя, плавления и поступления кориума к стенкам корпуса с внутренней стороны и т.д.

Таким образом, некоторое время наножидкость кипит при определенной плотности теплового потока. Учитывая, что это время достаточно велико, по результатам экспериментальных исследований, полученных нами, можно предложить использование НЖ с концентрацией не выше 0,001%об. В таком случае, если плавления и поступления кориума к стенкам не будет в течение 15 минут, то при толщине стенки корпуса ~200 мм, теплопроводности ~30 Вт/(м·К) и разнице температур $(T_{\text{внутр}} - T_{\text{внеш}}) = 500$ К, что соответствует плотности теплового потока $q_0 = 75 \text{ кВт/м}^2 \approx 0,1 \text{ МВт/м}^2$ увеличение КТП составит 57%, т.е., при $q_{\text{кр}} \approx 1,2 \text{ МВт/м}^2$ для дистиллята при использовании НЖ будет достигнуто $q_{\text{кр}} \approx 1,88 \text{ МВт/м}^2$, т.е. даже при поступлении кориума с температурой 2000-3000 °С к стенкам корпуса будет обеспечено надежное охлаждение.

Если предварительно на внешнюю поверхность корпуса реактора было нанесено покрытие (путем осаждения при кипении наножидкости), то при аппроксимации экспериментальных данных на этот случай, приходим к выводу, что максимальное увеличение КТП составит 33%, т.е. при $q_{\text{кр}} \approx 1,2 \text{ МВт/м}^2$ для дистиллята при использовании НЖ будет достигнуто $q_{\text{кр}} \approx 1,6 \text{ МВт/м}^2$, что тоже соответствует случаю надежного охлаждения даже при контакте кориума с корпусом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основываясь на результатах, изложенных в настоящей статье, можно сделать вывод о том, что применение наножидкостей в качестве теплоносителя (рабочего тела) в системах и энергетическом оборудовании, в частности, в системах безопасности реакторных установок АЭС, а также предварительная модификация высоконапряженных поверхностей нагрева путем формирования на них нанопокрывтия с заданными параметрами является перспективным решением для увеличения надежности и расширения границ безопасной эксплуатации энергетического оборудования и станций.

Возможные дальнейшие направления исследований в данной тематике – варьирование типа наночастиц и базовой жидкости, исследование прочности и долговечности сформированных покрытий, проведение полномасштабных экспериментов на моделях, сходных с узлами энергетического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе, С.С. Теплопередача при конденсации и кипении [Текст] / С.С. Кутателадзе. – М.: Машгиз, 1952. – 236 с.
2. Kim S.J. [et al] Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, №50, pp. 4105–4116.
3. Jeong Y.H., Chang W.J., Chang S.H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, №51, pp. 3025–3031.
4. Фокин, Б.С. и др. Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц [Текст] / Б.С. Фокин, М.Я. Беленький, В.И. Альмяшев, В.Б. Хабенский, О.В. Альмяшева, В.В. Гусаров // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35(10). – С. 1–5.
5. Васильев, Н.В. и др. Экспериментальные данные по кипению воды, недогретой до температуры насыщения, на поверхностях с мезорельефом [Текст] / Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, Ю.А. Кузма-Кичта и др. // Тепловые процессы в технике. – 2016. – №8(3). – С. 98–102.
6. Coyle C., Buongiorno J., McKrell T. Synthesis of CRUD and its Effect On Pool and Subcooled Flow Boiling: CASL L3 Milestone Report. USA: US Department of Energy, 2015, 16 p.
7. Corradini, M. Marschman S., Goldner F. Improved LWR cladding performance by EPD surface modification technique: Final report of NEUP project 09-766. Madison: University of Wisconsin, 2012, 62 p.
8. Chupin A., Hu L.W., Buongiorno J. Applications of nanofluids to enhance LWR accidents management in in-vessel retention and emergency cooling systems. Proceedings of ICAPP'08: Paper 8043. Anaheim, CA USA, 2008, pp. 1707–1714.
9. Фритц, В. Вычисление максимального объема парового пузыря [Текст] / В. Фритц // Phys Z, 1935, 36(11), pp. 379–384.
10. Лабунцов, Д.А. и др. Механика двухфазных систем: учебное пособие для вузов [Текст] / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 374 с.
11. Theofanous T.G., Dinh T.N. High heat flux boiling and burnout as microphysical phenomena: mounting evidence and opportunities. Multiphase Science Tech, 2006, №18(1), pp. 361–364.

REFERENCES

- [1] Kutateladze S.S. Teploperedacha pri kondensatsii i kipenii [Heat Transfer at Condensation and Boiling]. M. Pub. Mashgiz [Mashgiz], 1952, 236 p. (in Russian)
- [2] Kim S.J. [et al] Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, №50, pp. 4105–4116. (in English)
- [3] Jeong Y.H., Chang W.J., Chang S.H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, №51,

- pp. 3025–3031. (in English)
- [4] Fokin B.S., Belenkii M.Ia., Almiashv V.I., Khabenskii V.B., Almiashva O.V., Gusarov V.V. Kriticheskii teplovoi potok pri kipenii vodnoi dispersii nanochastits [Critical Heat Flux when Boiling Aqueous Dispersion of Nanoparticles]. Pisma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Letters to Technical Physics Journal], 2009, Vol. 35(10), ISSN 0320-0116, pp. 1–5. (in Russian)
 - [5] Vasilev N.V., Zeigarnik Iu.A., Kuzma-Kichta Iu.A. etc. Eksperimentalnye dannye po kipeniiu vody, nedogretoi do temperatury nasyshcheniia, na poverkhnostiakh s mezorelefom [The Experimental Datas on Boiling of Water Underheated to saturation temperature on Surfaces with Mesorelief]. Teplovyie protsessy v tekhnike [Thermal Processes in Technique], 2016, №8(3), ISSN 2074-2649, pp. 98–102. (in Russian)
 - [6] Coyle C., Buongiorno J., McKrell T. Synthesis of CRUD and its Effect On Pool and Subcooled Flow Boiling: CASL L3 Milestone Report. USA: US Department of Energy, 2015, 16 p. Available at: <http://www.casl.gov/docs/CASL-U-2015-0068-000.pdf> (in English)
 - [7] Corradini, M. Marschman S., Goldner F. Improved LWR cladding performance by EPD surface modification technique: Final report of NEUP project 09-766. Madison: University of Wisconsin, 2012, 62 p. (in English)
 - [8] Chupin A., Hu L.W., Buongiorno J. Applications of nanofluids to enhance LWR accidents management in in-vessel retention and emergency cooling systems. Proceedings of ICAPP'08: Paper 8043. Anaheim, CA USA, 2008, pp. 1707–1714. (in English)
 - [9] Frittc V. Vychislenie maksimalnogo obema parovogo puzyria [Calculation of Maximal Volume of Steam Bubble]. Phyz Z, 1935, №36(11), pp. 379–384. (in Russian)
 - [10] Labuntcov D.A., Iagov V.V. Mekhanika dvukhfaznykh sistem: uchebnoe posobie dlia vuzov [Mechanics of Two-Phase Systems: manual for higher education institutions]. M. Pub. MPEI, 2000, 374 p. (in Russian)
 - [11] Theofanous T.G., Dinh T.N. High heat flux boiling and burnout as microphysical phenomena: mounting evidence and opportunities. Multiphase Science Tech, 2006, №18(1), pp. 361–364. (in English)

Prospects of Nanoliquid Use in Heat Withdrawal Systems in the Beyond Design Basis Accidents Accompanied with Fissile Area Melting

A.L. Sirotkina*, E.D. Fedorovich, V.V. Sergeev*****

*Peter the Great St.-Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg
Polytechnicheskaya St., 29, St.-Petersburg, Russia, 195251*

e-mail: sashulena991@inbox.ru

** ORCID iD: 0000-0002-5735-0461*

WoS ResearcherID.: K-4065-2017

*** ORCID iD: 0000-0002-1349-1895*

**** ORCID iD: 0000-0001-8883-4381*

Abstract – The article represents assessment results of prospects of nanodispersible liquids (nanoliquids) use in the NPP security systems, in particular, in emergency cooling system of the reactor vessel in the beyond design basis accidents accompanied with fissile area melting. The assessment is based on experiment and theoretical model operation results which short description is given at the beginning of article.

Keywords: corium deduction, nanoliquid, security systems, burn-out, critical heat flux.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.384.039

**ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ
РЕЗОНАНСОВ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ НА АЭС**

© 2017 К.Н. Проскураков^{*}, А.И. Фёдоров^{**}, М.В. Запорожец^{*}

^{*} *Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

^{**} *Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная электростанция»,
Нововоронеж, Воронежская обл., Россия*

В статье показано, что опередившие в свое время текущие потребности ядерной энергетики результаты научных исследований, проведенные в XX в. в Московском энергетическом институте, в настоящее время сохраняют актуальное значение. Приведенные результаты подтверждают необходимость государственной поддержки для продолжения научно-исследовательских работ, в созданном на кафедре АЭС Национального исследовательского университета «МЭИ» новом научном направлении «Прогнозирование, диагностика и предотвращение виброакустических резонансов в оборудовании АЭС» для повышения безопасности и конкурентоспособности российских АЭС. Опережение России в разработке и внедрении проектно-конструкторские решений по предотвращению виброакустических резонансов при авариях и землетрясениях необходимо для создания конкурентных преимуществ отечественных АЭС на мировом рынке.

Ключевые слова: стоячие волны, вибрации, виброакустический резонанс, электроакустические аналогии, резонатор Гельмгольца, сейсмические воздействия, АЭС.

Поступила в редакцию: 12.05.2017

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ДИАГНОСТИКА И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ В ОБОРУДОВАНИИ АЭС**

В Национальном исследовательском университете «МЭИ» с середины 1960-х гг. ведутся исследования теплогидравлического возбуждения акустических колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ и методов их идентификации. Ранее была обоснована возможность возникновения теплогидравлической неустойчивости типа автоколебаний в одиночном парогенерирующем канале и их влияния на уменьшение величины критического теплового потока при увеличении длины испарительного участка [1], её содержание нашло отражение в работе [2], в которой систематизированы публикации, внесшие новые знания в изучение кризисов кипения и критических тепловых потоков.

В статье [1] обоснована физическая природа возникновения автоколебаний скорости потока в одиночном парогенерирующем канале, частота которых является собственной частотой колебаний содержащейся в нём текучей среды. Показано что сильное уменьшение величины критического теплового потока происходит при большом паросодержании и обусловлено увеличением длины испарительного участка.

Именно этот эффект, как установлено в [3] привел к разрушению реактора на Чернобыльской АЭС: «Продолжающееся снижение расхода воды через технологический канал (ТК) реактора в условиях роста мощности привело к интенсивному парообразованию, а затем к кризису теплоотдачи, разогреву топлива, его

разрушению, бурному вскипанию теплоносителя, в который попали частицы разрушенного топлива, резкому повышению давления в ТК, их разрушению и тепловому взрыву, разрушившему реактор и часть конструкций здания и приведшему к выбросу активных продуктов деления во внешнюю среду».

В работах [4, 5] впервые показано, что если при увеличении скорости двухфазного потока сила трения уменьшается, то это приводит к самовозбуждающимся колебаниям давления. Такие условия возникают при работе парогенерирующего канала в диапазоне массовых расходов, соответствующих падающему участку гидродинамической характеристики. Этот феномен необходимо учитывать в качестве главного фактора, вызывающего многократное увеличение динамических нагрузок на оборудование при протекании максимальной проектной аварии (МПА) на АЭС с ВВЭР. В более поздних публикациях [6-8] отмечается влияние этого эффекта на колебания трубопроводов и надежность парогенераторов.

В МЭИ (ТУ) с середины 1970-х годов ведутся исследования термогидравлических источников возмущений и методов их идентификации. К ним относится публикация [9], в которой впервые было показано, что частота пульсаций давления теплоносителя в аварийном режиме при наличии кипения в активной зоне реактора в несколько раз меньше частоты, соответствующей режиму нормальной эксплуатации. Это изменение в спектре пульсаций давления является диагностическим признаком кипения в активной зоне реакторов типа ВВЭР и PWR.

ТЯЖЕЛЫЕ АВАРИИ НА АЭС С ВОДНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Авария на АЭС «Три-Майл Айленд-2» (ТМІ) произошла после появления данной информации. Если бы был датчик пульсаций давления теплоносителя, позволявший фиксировать изменение спектра пульсаций давления, то персонал АЭС ТМІ своевременно заметил бы начало кипения в активной зоне и принял бы правильные решения для предотвращения одной из самых тяжелых аварий на АЭС. В этой же работе предложена акустическая модель компенсатора давления, используемого на АЭС с ВВЭР (и их зарубежных аналогах- PWR), согласно которой компенсатор давления представляет собой резонатор Гельмгольца нескольких акустических волн. Через несколько лет эта модель, была использована для расчета одной из этих частот [10-12].

Важным этапом в развитии методов анализа акустических систем теплоносителя в АЭС явилось обоснование правомерности электроакустических аналогий для одномерного пульсирующего потока двухфазной среды, как с однозначной, так и многозначной гидродинамической характеристиками [13].

Разработанные в [13] методы расчета акустических параметров теплоносителя в парообразующих каналах активной зоны ядерного реактора и в акустических системах АЭС, с однофазной и двухфазной средами, позволяют учитывать влияние на скорость звука, а, следовательно, и на частоту акустических стоячих волн (АСВ), давления, температуры, паросодержания и скоростей движения фаз в потоке. Эти методы достаточно просты и эффективны при определении акустических свойств сложных систем с несколькими степенями свободы, дают результаты с точностью достаточной для решения практических задач [14]: определения частот АСВ, добротности акустических контуров теплоносителя, полосы пропускания, волнового сопротивления и пр. Методы могут быть применены для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при сейсмических и ударных воздействиях.

В [14] показано, что расчетные значения частот АСВ, полученные при использовании метода электроакустических аналогий, разработанного для анализа акустических систем с двухфазной текучей средой [13], совпадают с результатами измерений колебаний давления теплоносителя в парообразующих каналах активной зоны ядерного реактора. Экспериментальное доказательство, приведенное в [14], правомерности использования метода электроакустических аналогий, для расчета частот АСВ в кипящих реакторах, в настоящее время приобретает особое значение для повышения конкурентоспособности и безопасности российских АЭС. Разработанные методы и алгоритмы расчета АСВ имеют ясный физический смысл, позволяют проводить идентификацию источников генерации АСВ по результатам измерений вибраций оборудования и пульсаций давления теплоносителя на АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах.

Следует отметить, что повышенные вибрации и соударения ТВС и стенок ТК наблюдались в процессе эксплуатации реакторов Чернобыльской АЭС. В связи с необходимостью диагностирования такого рода соударений и их предотвращения, на основе результатов, полученных в работах [1, 4, 5, 13] по инициативе ЧАЭС в 1985 году, был заключен хоздоговор между МЭИ и ВНИИАЭС «Исследования влияния потока теплоносителя на виброакустические характеристики технологических каналов реактора РБМК для разработки систем диагностики методами неразрушающего контроля основного и вспомогательного оборудования АЭС». Работы, начатые с Чернобыльской АЭС, послужили основанием того, что старший автор этой статьи в мае 1986 г. был привлечен в качестве эксперта к работе Правительственной комиссии по расследованию причин чернобыльской аварии. В представленном им экспертном заключении были указаны следующие вероятные причины аварии: недопустимый рост паросодержания в ТК, привел к развитию автоколебаний теплоносителя, кризису теплообмена [1] и, весьма вероятно, возникновению виброакустического резонанса с колебаниями ТВС. В качестве неотложных мер было предложено сформировать службы технической диагностики на всех АЭС, а в МЭИ создать: а) новую специализацию «Техническая диагностика АЭС» для подготовки кадров, и б) материальные условия для форсирования исследований в области шумовой диагностики оборудования и технологических процессов АЭС.

ДОКЛАД ГОСАТОМНАДЗОРА СССР В СОВЕТ МИНИСТРОВ СССР В МАЕ 1986 г.

Согласно поручению Совета министров СССР, ПП-8768 от 18.05.86 первым лицам министерств и ведомств, работающих по атомной тематике, эти предложения были рассмотрены. Особенно большое значение имел ответ министра среднего машиностроения СССР Е.П. Славского. В его ответе было сказано, что предполагаемый экспертом сценарий аварии, вполне вероятен, что следует одобрить в целом сделанные предложения, оказать необходимую поддержку МЭИ для подготовки кадров и форсирования исследований в области шумовой диагностики оборудования и технологических процессов АЭС.

Госатомнадзором СССР в Совет Министров с учетом консультаций со специалистами ИАЭ им. И.В. Курчатова и НИИ энерготехники было доложено:

«1) Предложение т. Проскурякова К.Н. к Межведомственному техническому совету по АЭС по уточнению существующей концепции о максимальной проектной аварии (МПА) является правильным. Предполагаемое автором исходное событие и путь развития аварии потенциально возможны и должны быть проанализированы Научным руководителем, Главным конструктором и Генеральным проектировщиком

АЭС. 2). Автор предложений справедливо указывает на необходимость ускорения внедрения системы непрерывной диагностики эксплуатируемого оборудования с использованием в частности контроля состояния теплоносителя. 3). Следует форсировать работы по выполнению предложений к Минприбору и Минэнерго по оснащению АЭС средствами виброакустической диагностики. 4) Госатомнадзор поддерживает рекомендации т. Прокуракова К.Н. Минвузу СССР о необходимости создания специализации «Диагностика технического состояния АЭС и обслуживание систем надежности и безопасности». К сожалению, осуществлению этих рекомендаций помешала происходившая в стране перестройка. Финансирование научной группы кафедры АЭС, которая работала в новом не имевшем аналогов научном направлении «Создание методов диагностики, прогнозирования и предотвращения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС» было прекращено.

КОММЕНТАРИЙ ПО ПОВОДУ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА ДАЙИЧИ»

И, наконец, по поводу последней тяжелой аварии на АЭС «Фукусима Дайичи». По официальным данным, авария произошла из-за того, что дизель - генераторы, обеспечивающие аварийное охлаждение активной зоны, пострадали в результате цунами. Однако, в ряде публикаций и бесед с персоналом станции, попавших в интернет, содержится информация о том, что наблюдались течи теплоносителя, которые возникли в результате землетрясения, ещё до прихода цунами. Проверить правдоподобность этой версии в настоящее время не представляется возможным. Ввиду этого официальная версия способна вуалировать иную вероятную первопричину потери охлаждения активной зоны и игнорировать версию резонансного усиления сейсмических воздействий, произошедшего при совпадении частот сейсмических волн с частотой акустических колебаний в кипящем реакторе. По нашему мнению, необходимо проведение дополнительных исследований свойств реактора типа BWR, как резонатора Гельмгольца.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРЕВЫШЕНИЯ ПРОЕКТНОГО УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

В [15] показана возможность превышения проектного уровня вибраций основного оборудования АЭС с ВВЭР внешних периодических нагрузках, вызванных землетрясением, и попадании частоты вибраций основного оборудования реакторной установки и частоты упругих волн в полосу частот, соответствующую максимальным значениям огибающих спектров отклика

Этот результат получен путем сопоставления спектра отклика сооружений АЭС, с частотами вибраций оборудования I контура АЭС с ВВЭР-1000, из которого следует, что частоты вибраций основного оборудования РУ попадают в полосу частот в спектре отклика, соответствующую максимальным огибающим спектрам отклика.

В публикации [16] указаны частоты вибраций оборудования I контура АЭС с ВВЭР-1000: частота 9.277 Гц соответствует вертикальной форме колебаний корпуса реактора ВВЭР1000. Приведены также результаты расчета собственной частоты, равной 10.1 Гц, поперечных колебаний топливных сборок (третья форма), корпуса реактора, металлоконструкций верхнего блока и собственной частоты, равной 13.1 Гц, вертикальных колебаний топливных сборок, корпуса реактора, металлоконструкций верхнего блока.

В настоящее время прогнозирование возникновения виброакустических

резонансов при тяжелых авариях на АЭС является неразрешимой задачей, поскольку планировать и осуществлять на энергоблоке аварийную ситуацию для измерения вибрации оборудования неприемлемо. В этих условиях использование, разработанных и апробированных на АЭС, моделей и алгоритмов расчета частот АСВ для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов при авариях с течами теплоносителя и при ударных воздействиях и землетрясениях, может быть своевременным и полезным.

Игнорирование возможности возникновения виброакустических резонансов с сейсмическими волнами в оборудовании АЭС объясняется отсутствием в российской и зарубежной нормативной документации требований проведения количественного определения СЧКДТ в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах и, следовательно, отсутствием нормативов для предотвращения резонансного взаимодействия вибраций оборудования АЭС с упругими волнами в теплоносителе.

В качестве наиболее эффективного средства предотвращения виброакустических резонансов предлагается использование акустического фильтра частот, типа резонатора Гельмгольца. Данное устройство будет обеспечивать подавление акустических колебаний теплоносителя совпадающими с частотами вибраций оборудования, вынужденными колебаниями давления, вызванными работой ГЦН или внешними ударными и сейсмическими воздействиями.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Актуальность обеспечения АЭС средствами предотвращения виброакустических резонансов определяется тем, что, в настоящее время, поставлена задача обеспечить надежную эксплуатацию АЭС в маневренных режимах и в регионах с высокой сейсмической активностью. Ввиду этого необходимо заложить в проектные решения АЭС предотвращения возникновения условий резонанса вибраций в пусковых и маневренных режимах, а также в условиях сейсмических и волновых нагрузок.

Для создания конкурентных преимуществ российским АЭС необходимо обеспечить опережение зарубежных поставщиков АЭС в разработке отечественных технологий и проектно-конструкторские решений, предотвращающих возникновение виброакустических резонансов как в эксплуатационных режимах, так и при авариях и землетрясениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проскуряков, К.Н.* Автоколебания в одиночном парогенерирующем канале [Текст] / К.Н. Проскуряков // Теплоэнергетика. – 1965. – №12. – С. 75–77.
2. Tong L.S. Boiling crisis and critical heat flux. Westinghouse Electric Corporation. Published by Atomic Energy Commission office of information services, 1972.
3. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ [Текст] // Атомная энергия. – 1986. – Т. 61. – Вып. 5. – Ноябрь. – С. 301–320.
4. *Проскуряков, К.Н.* Электрическая модель парогенерирующего канала [Текст] / К.Н. Проскуряков. – М.: Труды МЭИ, 1972. – Вып. №126.
5. *Проскуряков, К.Н.* Условие возникновения колебаний в парогенерирующем канале [Текст] / К.Н. Проскуряков // Kernenergie I. – №5. – 1975. (на немецком яз.)
6. Van Blarcom P.P., Smitt R.D. Flashing fluids at low pressures. Proc. ISA Conf. And Exhib. Chicago, 1979, pp. 391–340.
7. *Овчинников, В.Ф. и др.* Колебания трубопроводов с нестационарным потоком жидкости [Текст] / В.Ф. Овчинников, Л.В. Смирнов // Вопросы атомной науки и техники. Физика и техника ядерных реакторов. – 1981. – Вып. 2. – С. 3–11.
8. *Вереземский, В.Г. и др.* Влияние режимов работы контуров циркуляции АЭС с ВВЭР-1000 на надежность парогенераторов ПГВ-1000 [Текст] / В.Г. Вереземский, Л.В. Смирнов, В.Ф. Овчинников, А.В. Яскеляин // Теплоэнергетика. – 1998. – №5. – С. 36–41.

9. *Проскуряков К.Н. и др.* Теоретическое определение частот собственных колебаний теплоносителя в первом контуре АЭС / К. Н. Проскуряков, С. П. Стоянов, Г. Нидцбалла, А. В. Грязев и др. // Труды МЭИ. – 1979. – Вып. 407. – С. 87–92.
10. Mullens L.A., Thie J.A. Understanding Pressure Dynamic Phenomena in PWRs for Surveillance, Diagnostic Application. Proceedings of 5-th Power Plant Dynamics, Controls, Testing Symposium University of Tennessee. Knoxville, March 1983.
11. Por G., Izsak E. t Valka S. Some Results of Noise Measurements in PWR NPP. Progress in Nuclear Energy. 1985, №15, P. 387.
12. Nagy I., Katona T. Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs. Progress in Nuclear Energy, 1985, №15, pp. 651–659.
13. *Проскуряков, К.Н.* Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Текст] / К.Н. Проскуряков. – М.: МЭИ, 1984. – 67 с.
14. *Фомичев, М.С.* Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ [Текст] / М.С. Фомичев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 247 с.
15. *Проскуряков, К.Н. и др.* Прогнозирование условий возникновения в первых контурах АЭС с ВВЭР виброакустических резонансов с внешними периодическими нагрузками [Текст] / К.Н. Проскуряков, А.И. Фёдоров, М.В. Запорожец // Теплоэнергетика. – 2015. – №8. – С. 17–23.
16. *Печинка, Л. и др.* Влияние вибраций ВКУ реактора ВВЭР 1000/320 АЭС “Темелин” на устойчивость шахты реактора [Текст] / Л. Печинка, П. Стулик, В. Земан // Материалы V Межд. науч. техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. Подольск. 29 мая–1 июня 2007 г. – Подольск, 2007.

REFERENCES

- [1] Proskuriakov K.N. Avtokolebaniya v odinochnom parogeneriruiushchem kanale [Self-Oscillations in the Individual Steam-Generating Channel]. Teploenergetika [Heat Power Engineering], 1965, №12, ISSN 0040-3636, pp. 75–77. (in Russian)
- [2] Tong L.S. Boiling crisis and critical heat flux. Westinghouse Electric Corporation. Published by Atomic Energy Commission office of information services, 1972. (in English)
- [3] Informatsiya ob avarii na Chernobylskoi AES i ee posledstviakh, podgotovlennaya dlya MAGATE [Information of the Chernobyl Accident and Its Consequences Prepared for the IAEA]. Atomnaya energiya [Nuclear Energy], 1986, Vol. 61, Issue 5, November, ISSN 0004-7163, pp. 301–320. (in Russian)
- [4] Proskuriakov K.N. Elektricheskaya model parogeneriruiushchego kanala [Electrical Model of Steam Generating Channel]. M. Pub. Trudy MPEI [MPEI Works], 1972, Issue №126. (in Russian)
- [5] Proskuriakov K.N. Uslovie vozniknoveniia kolebaniy v parogeneriruiushchem kanale [Condition of Fluctuation Emergence in the Steam-Generating Channel]. Kernenergiia I [Kernenergy I], №5, 1975. (in German)
- [6] Van Blarcom P.P., Smitt R.D. Flashing fluids at low pressures. Proc. ISA Conf. And Exhib. Chicago, 1979, pp. 391–340. (in English)
- [7] Ovchinnikov V.F., Smirnov L.V. Kolebaniia truboprovodov s nestatsionarnym potokom zhidkosti [Fluctuations of Pipelines with an Unsteady Flow of Liquid]. Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Fizika i tekhnika yadernykh reaktorov [Nuclear Science and Technology Issues. Physics and Technique of Nuclear Reactors.], 1981, Issue 2, ISSN 0205-4671 pp. 3–11. (in Russian)
- [8] Verezhemskii V.G., Smirnov L.V., Ovchinnikov V.F., Iaskeliain A.V. Vliyanie rezhimov raboty konturov tsirkulatsii AES s VVER-1000 na nadezhnost parogeneratorov PGV-1000 [Influence of the NPP Circulation Contour Modes with PWR-1000 on Reliability of PGV-1000 Steam Generators]. Teploenergetika [Heat Power Engineering], 1998, №5, ISSN 0040-3636, pp. 36–41. (in Russian)
- [9] Proskuriakov K.N., Stoianov S.P., Nidtsballa G., Griazev A.V. Teoreticheskoe opredelenie chastot sobstvennykh kolebaniy teplonositel'ia v pervom konture AES [Theoretical Determination of Frequencies of Heat Carrier in the NPP First Contour]. Trudy MPEI [MPEI Works], 1979, Issue 407, pp. 87–92. (in Russian)
- [10] Mullens L.A., Thie J.A. Understanding Pressure Dynamic Phenomena in PWRs for Surveillance, Diagnostic Application. Proceedings of 5-th Power Plant Dynamics, Controls, Testing Symposium University of Tennessee. Knoxville, March 1983. (in English)
- [11] Por G., Izsak E. t Valka S. Some Results of Noise Measurements in PWR NPP. Progress in Nuclear Energy. 1985, №15, P. 387. (in English)
- [12] Nagy I., Katona T. Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs. Progress in Nuclear Energy, 1985, №15, pp. 651–659. (in English)

- [13] Proskuriakov K.N. Teplogidravlichesкое возбуждение колебаний теплоносителя во vnutrikorpusnykh ustroystvakh IaEU [Heathydraulic Excitation of the Heat Carrier Oscillations in the NPP Intra Body Devices]. M. Pub. MPEI, 1984, 67 p. (in Russian)
- [14] Fomichev M.S. Eksperimentalnaia gidrodinamika IaEU [The Experimental Hydrodynamics of Nuclear Installations]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1989, 247 p. (in Russian)
- [15] Proskuriakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V. Prognozirovaniye uslovii vozniknoveniia v pervykh konturakh AES s VVER vibroakusticheskikh rezonansov s vneshnimi periodicheskimi nagruzkami. Teploenergetika [Heat Power Engineering], 2015, №8, ISSN 0040-3636, pp. 17–23. (in Russian)
- [16] Pechinka L., Stulik P., Zeman V. Vliianie vibratsii VKU reaktora VVER_1000/320 AES “Temelin” na ustoychivost shakhty reaktora. Materialy V Mezhd. nauch._tekhn. konf. “Obespechenie bezopasnosti AES s VVER”. Podolsk. 29 maya–1 iyunya 2007 g. Podolsk, 2007. (in Russian)

Causes of Vibroacoustic Resonances in Severe Accidents at Nuclear Power Plants

K.N. Proskuryakov^{*1}, A.I. Fedorov^{2}, M.V. Zaporozhets^{*3}**

^{} National Research University «MPEI»,
Krasnokazarmennaya St., 14, Moscow, Russia, 111250*

¹ e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru

ORCID: 0000-0002-1884-5576

WoS ResearcherID: I-3583-2017

³ ORCID: 0000-0002-8017-5200

WoS ResearcherID: K-3710-2017

*^{**} Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of «Rosenergoatom Concern» JSC
Yuzhnaya St., 1, Plant zone, Novovoronezh, Voronezh region, Russia, 396072*

² ORCID: 0000-0002-5661-9502

WoS ResearcherID: K-3752-2017

Abstract – The paper shows that the results of scientific research carried out in the past century in MPEI, which outpaced in the past the current requirements of nuclear power, are of great importance. The results confirm the need for state support for scientific research work continuation in the new scientific area "Forecasting, Diagnostics and Prevention of Vibroacoustic Resonances in NPP Equipment" created at the Department of NPP MPEI, to increase safety and competitiveness of Russian nuclear power plants.

Keywords: standing waves, vibrations, vibroacoustic resonance, electro-acoustic analogies, Helmholtz resonator, seismic effects, NPP.

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

УДК 159.9:62

**ПОВЫШЕНИЕ СТРЕССОУСТОЙЧИВОСТИ ЗА СЧЕТ РАЗВИТИЯ
НАВЫКОВ САМОКОНТРОЛЯ И САМОРЕГУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ
ДИСТАНЦИОННЫХ НЕКОНТАКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
РЕГИСТРАЦИИ БИОПАРАМЕТРОВ ЧЕЛОВЕКА¹**

© 2017 М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина, А.М. Алюшин, И.А. Морозов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Стрессоустойчивость операторов управления опасными объектами и, в первую очередь, АЭС, является одной из составляющих такого понятия, как человеческий фактор, имеющего принципиальное значение для обеспечения безопасности эксплуатации объектов данного класса. Рассматривается методика проведения психологического тренинга с использованием биологической обратной связи, для реализации которой применяются дистанционные неконтактные технологии регистрации биопараметров человека.

Ключевые слова: стрессоустойчивость, самоконтроль, саморегуляция, неконтактные дистанционные технологии, биологическая обратная связь.

Поступила в редакцию: 08.05.2017

Одним из требований, предъявляемых к операторам управления опасными объектами экономики, является умение быстро и правильно действовать в сложных постоянно меняющихся ситуациях, так как от этого во многом зависит возможность возникновения, а также тяжесть протекания аварий техногенного происхождения. Особое значение данное требование имеет для работников атомной отрасли и, в первую очередь, для оперативного состава управления АЭС. Одним из факторов, обуславливающим правильность и своевременность предпринимаемых оператором действий, является стрессовая нагрузка. В этом плане, обладание всей совокупностью теоретических, методических и практических знаний и навыков не может гарантировать не только своевременности и правильности действий по причине, например, нахождения оператора в заторможено-испуганном состоянии (ступоре), но и исключения его неправильных и опасных действий. Показательным в этом плане является время реакции оператора, допустимый диапазон изменения которого для ряда критических областей жестко регламентируется нормативными документами [1, 2].

Принятая практика подготовки оперативного персонала АЭС к действиям в случае возникновения нештатных, либо аварийных ситуаций при проведении учебно-тренировочных занятий на полномасштабных тренажерах, несомненно, способствует повышению стрессоустойчивости за счет накопления опыта действий при устранении

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».

конкретных неполадок, отработке практических навыков по ликвидации аварийных ситуаций, а также развитию командного взаимодействия в коллективе.

Обучение навыкам самоконтроля и саморегуляции крайне важно для гарантирования высокого уровня стрессоустойчивости, в первую очередь, при действиях в сложных запутанных и постоянно меняющихся ситуациях, при отсутствии достаточного опыта ликвидации неполадок и отказов малоизученного типа.

В настоящее время разработаны и применяются разнообразные методики психологического тренинга, направленные на развитие навыков самоконтроля и саморегуляции психоэмоционального состояния. В основе большинства современных методик психологического тренинга лежит использование так называемой биологической обратной связи (БОС), позволяющей человеку отслеживать свое текущее психоэмоциональное состояние. Для этой цели осуществляется визуализация, например, на экране монитора персонального компьютера, текущих данных о его состоянии в количественной, либо качественной интерпретации. В первом случае информация, например, о частоте дыхания, частоте сердечного ритма представляется в виде графиков, либо цифровых значений. Во втором – в виде изменения цвета, громкости звука. К сожалению, психологический тренинг рассматриваемого типа предполагает использование ряда контактных датчиков, обеспечивающих измерение в реальном масштабе времени текущих биопараметров человека. Данная ситуация характерна для многих областей, связанных с подготовкой управляющего персонала для опасных, либо важных объектов. Типичными примерами являются атомная, аэрокосмическая и военная области. Применение контактных датчиков в значительной степени ограничивает реализуемость разработанных методик психологического тренинга в условиях проведения учебно-тренировочных занятий, а также непосредственно во время производственной деятельности.

Разработанные и экспериментально апробированные к настоящему времени дистанционные неконтактные технологии (ДНТ) мониторинга текущего функционального и психоэмоционального состояния [3, 4] позволяют повысить эффективность, а также существенно расширить возможные варианты сценариев проведения психологического тренинга. Принципиальным преимуществом таких технологий является отсутствие неудобств и ограничений в передвижении, вызванных наличием контактных датчиков, а также сугубо пассивный режим их работы при регистрации биопараметров человека в оптическом [5] и акустическом спектрах излучения [6, 7]. Данное обстоятельство дает возможность реализовывать различные методики тренировки стрессоустойчивости при использовании БОС как во время проведения учебно-тренировочных занятий различных уровней, так и непосредственно на производстве.

Целью работы является анализ перспектив использования технологии повышения стрессоустойчивости за счет развития навыков самоконтроля и саморегуляции при использовании БОС на основе ДНТ регистрации биопараметров человека.

На рисунке 1 представлена обобщенная блок-схема, иллюстрирующая практическую реализацию данной технологии применительно к задачам тренировки стрессоустойчивости для широкого круга оперативного персонала управления опасными объектами, например, АЭС. Основные задачи, решаемые при практической реализации технологии, допускают автоматизацию на основе использования современных высокопроизводительных средств вычислительной техники.

Представленная блок-схема является основой для создания специализированных программно-аппаратных комплексов для реализации различных методик тренинга стрессоустойчивости за счет развития навыков саморегуляции и самоконтроля практически на всех этапах управления персоналом, включая:

- плановые тренировки в специализированных лабораториях психофизиологического обеспечения;
- учебно-тренировочные занятия на полномасштабных тренажерах;
- специализированные занятия по тренировке стрессоустойчивости.

Все вышеперечисленные виды занятий являются персонально ориентированными и основываются на использовании пополняемой базы персональных данных, содержащей, в том числе, информацию о зависимости достигаемого уровня стресса от сложности выполняемых заданий и уровня действующих помех (стрессоров).

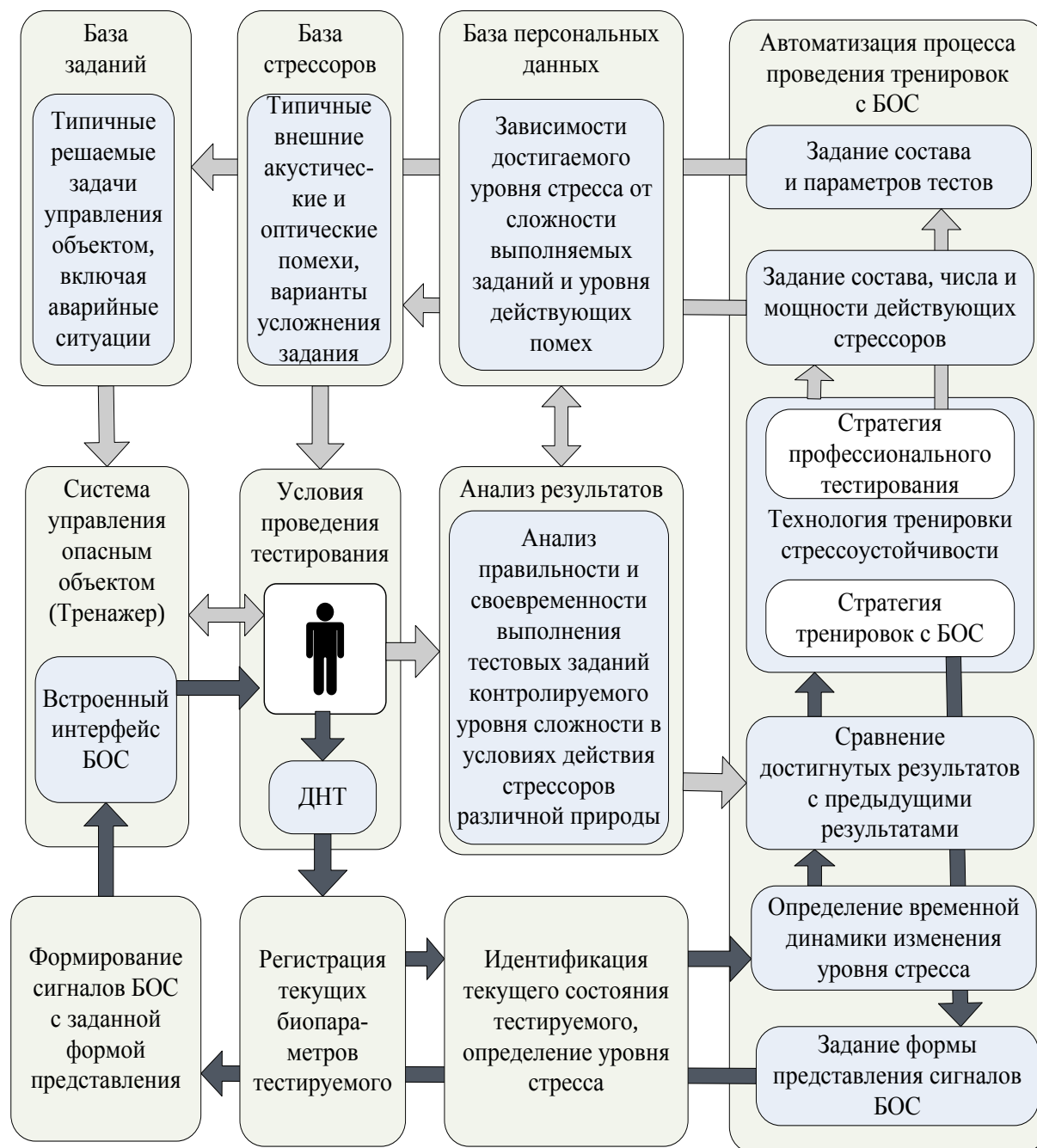


Рис. 1. – Обобщенная блок-схема

Рассматриваемая технология основывается на периодическом (в соответствии с принятой стратегией тренировки стрессоустойчивости) выполнении тестируемым

набора тестовых заданий с заранее определенным уровнем сложности в условиях действия помех заданного уровня. Основными элементами технологии, предназначенными для осуществления профессионального тестирования в соответствии с выбранной стратегией, являются:

- задание состава и параметров профессиональных тестов;
- задание состава, числа и мощности действующих стрессоров;
- база профессиональных заданий, содержащая типичные решаемые на практике задачи управления опасным объектом, включая нештатные и аварийные;
- база типичных стрессоров, характерных для данной профессиональной области, содержащая информацию о наиболее характерных оптических и акустических помехах, а также о типичных вариантах усложнения решаемых на практике задач управления опасным объектом, например, варианты множественных отказов различных агрегатов, варианты комплексного воздействия стрессоров различной физической природы;
- модуль анализа результатов, обеспечивающий анализ правильности и своевременности выполнения тестовых заданий контролируемого уровня сложности в условиях действия стрессоров различной природы.

Основными функциональными элементами, обеспечивающими реализацию БОС, являются:

- регистрация текущих биопараметров, тестируемых на основе ДНТ;
- идентификация текущего состояния тестируемого, определение уровня стресса;
- определение временной динамики изменения уровня стресса;
- сравнение достигнутых результатов с предыдущими результатами;
- реализация выбранной стратегии проведения тренировок с БОС;
- задание формы представления сигналов БОС;
- формирование сигналов БОС с заданной формой представления;
- передача сформированных сигналов БОС тренируемому с помощью встроенного интерфейса БОС.

Обмен данными между перечисленными функциональными элементами, обеспечивающими реализацию БОС, представлен на рис.1 темными штрихованными стрелками.

В зависимости от вида тренировочных занятий рассматриваемая технология тренировки стрессоустойчивости может быть ориентирована на использование различных классов систем управления опасным объектом (АЭС), наиболее типичными из которых являются:

- компьютерные стенды для тренировки стрессоустойчивости;
- полномасштабные тренажеры;
- реальные пульты (щиты) управления опасным объектом.

Для перечисленных классов оборудования необходимо использовать соответствующий интерфейс, обеспечивающий поддержку БОС. Как правило, такой интерфейс целесообразно встроить в систему управления, либо тренажер. В случае применения компьютерных стендов в качестве такого интерфейса целесообразно использовать имеющийся графический интерфейс персонального компьютера, входящего в состав стенда, а также стандартную акустическую систему. В этом случае в качестве сигналов БОС будут использоваться автоматически синтезируемые графические образы на мониторе компьютера и соответственно акустические сигналы.

При планировании учебно-тренировочных занятий на полномасштабных тренажерах, либо на реальных пультах управления в качестве интерфейса для поддержания БОС целесообразно использовать устройства, сигналы от которых не

находятся в одном информационном поле с рабочими сигналами управления опасным объектом. Наиболее подходящими с этой точки зрения могут быть современные малогабаритные беспроводные средства для передачи, например, вибросигналов тестируемому, свидетельствующих о высоком уровне стресса у последнего. С точки зрения технологического изготовления таких устройств они могут быть выполнены в виде браслетов, колец, либо быть вмонтированными в рабочее кресло.

Для развития навыков самоконтроля и саморегуляции разработаны объектно-ориентированные методики, предполагающие моделирование стрессовых ситуаций различного уровня [8].

Стратегии тренировок с БОС являются персонализированными. Выбор той, либо иной стратегии тренировки с БОС зависит от многих факторов, наиболее значимыми из которых являются:

- возраст, физическое и психологическое состояние тестируемого;
- уровень профессиональной подготовки;
- имеющийся практический опыт работы по управлению опасным объектом, особенно в нештатных и аварийных ситуациях;
- планируемая продолжительность учебно-тренировочных занятий;
- имеющийся опыт аналогичных занятий.

Наиболее типичными стратегиями проведения занятий с БОС являются учебно-тренировочные занятия с:

- плавным увеличением от занятия к занятию, как уровня стрессовой нагрузки, так и уровня сложности решаемых профессиональных тестовых задач;
- плавным увеличением уровня стрессовой нагрузки и значительным усложнением выполняемых тестовых заданий в рамках каждого учебно-тренировочного занятия;
- плавным увеличением сложности выполняемых тестовых заданий в течение ряда занятий и резким изменением уровня стрессовой нагрузки в течение каждого из занятий;
- значительное одновременное увеличение, как уровня стрессовой нагрузки, так и сложности выполняемых тестовых заданий на каждом учебно-тренировочном занятии.

Например, для молодых сотрудников с хорошей физической формой возможна реализация второй, третьей и четвертой стратегий. Для лиц более старшего возраста – только первой, второй и третьей.

На рис. 2 представлены получаемые при практической реализации разработанной технологии экспериментальные результаты [8], демонстрирующие динамику повышения стрессоустойчивости у студентов в зависимости от числа циклов психологических тренировок с использованием БОС. В качестве стратегии проведения тренировок использовалась четвертая из вышеперечисленных. Приведенные зависимости отображают изменение психоэмоциональной напряженности (значение функции $G=1$ соответствует психоэмоциональному напряжению в состоянии стресса) во время выполнения тестового задания при воздействии однотипного стрессора (в момент времени T_0) для различных сеансов тренинга ($N=1, 2, \dots, 5$). Приведенные зависимости являются усредненными для группы студентов из 37 человек, прошедших обучение методам саморегуляции и самоконтроля. В качестве стрессоров были использованы световые и звуковые помехи различной интенсивности, а также неожиданное усложнение условий выполнения тестового задания [8].

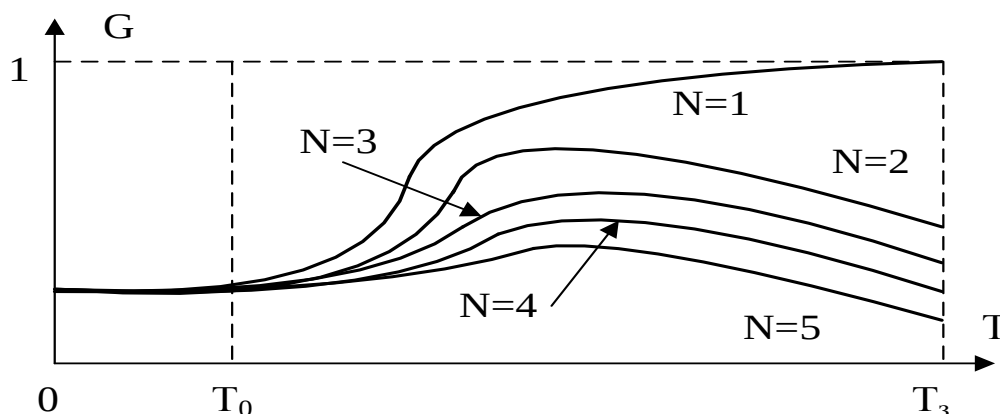


Рис. 2. – Динамика изменения уровня стрессоустойчивости

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о приобретенном умении стабилизировать свое психоэмоциональное состояние после нескольких занятий. В данном исследовании число занятий не превышало пяти.

Таким образом, применение дистанционных бесконтактных технологий регистрации биопараметров дает возможность осуществить эффективные занятия по повышению стрессоустойчивости в сложных ситуациях за счет развития навыков саморегуляции и самоконтроля, что имеет принципиальное значение для минимизации влияния человеческого фактора на возможность возникновения аварий и катастроф техногенного происхождения [9, 10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алюшин, М.В. и др. Экспериментальное исследование времени реакции человека в условиях действия акустических помех [Текст] / М.В. Алюшин, В.М. Алюшин // Вопросы психологии. – 2016. – №1. – С. 163–168.
2. Алюшин, М.В. и др. Методика измерения времени реакции оператора управления [Текст] / М.В. Алюшин, В.М. Алюшин // Вопросы психологии. – 2015. – №5. – С. 157–165.
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. Алюшин, М.В. и др. Дистанционные и неконтактные технологии регистрации биопараметров оперативного персонала как средство управления человеческим фактором и повышения безопасности АЭС [Текст] / М.В. Алюшин, А.В. Алюшин, Л.О. Андриюшина, Л.В. Колобашкина, В.В. Пшенин // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №3(8). – С. 69–77.
5. Алюшин, М.В. и др. Оптические технологии для систем мониторинга текущего функционального состояния оперативного состава управления объектами атомной энергетики [Текст] / М.В. Алюшин, А.В. Алюшин, В.М. Белопольский, Л.В. Колобашкина, В.Д. Ушаков // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №2(7). – С. 69–77.
6. Алюшин, В.М. Диагностика психоэмоционального состояния на основе современных акустических технологий [Текст] / В.М. Алюшин // Вопросы психологии. – 2015. – №3. – С. 145–152.
7. Алюшин, М.В. и др. Акустические технологии для «интеллектуальных» систем мониторинга функционального состояния оперативного состава управления объектами атомной энергетики [Текст] / М.В. Алюшин, В.М. Алюшин, С.В. Дворянkin, Л.В. Колобашкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №4(9). – С. 63–71.
8. Алюшин, М.В. и др. Психологический тренинг стрессоустойчивости на основе дистанционных неконтактных технологий регистрации биопараметров [Текст] / М.В. Алюшин, В.Н. Абрамова, Л.В. Колобашкина // Вопросы психологии. – 2014. – №6. – С. 144–152.
9. Алюшин, М.В. и др. Профессиональный отбор персонала по психологическим качествам на основе методов, разработанных в рамках теории принятия решений [Текст] / М.В. Алюшин, Л.В. Колобашкина, А.В. Хазов // Вопросы психологии. – 2015. – №2. – С. 88–94.

10. *Алюшин, М.В. и др.* Методологические аспекты автоматизированного прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного происхождения [Текст] / М.В. Алюшин, В.М. Алюшин, Л.В. Колобашкина // Вопросы психологии. – 2016. – №2. – С. 83–90.

REFERENCES

- [1] Aliushin M.V., Aliushin V.M. Eksperimentalnoe issledovanie vremeni reakcii cheloveka v usloviakh deistviia akusticheskikh pomekh [Experimental Study of the Time of Human Reaction under Acoustic Noise Conditions]. *Voprosy psikhologii* [Psychology Issues], 2016, №1, ISSN 0042-8841, pp. 163–168. (in Russian)
- [2] Aliushin M.V., Aliushin V.M. Metodika izmereniia vremeni reakcii operatora upravleniya [Measuring Technique of Reaction Time of Management Operator]. *Voprosy psikhologii* [Psychology Issues], 2015, №5, ISSN 0042-8841, pp. 157–165. (in Russian)
- [3] Aliushin M.V., Kolobashkina L.V. Monitoring bioparametrov cheloveka na osnove distantcionnykh tekhnologii [перевод]. *Voprosy psikhologii* [Psychology Issues], 2014, №6, ISSN 0042-8841, pp. 135–144. (in Russian)
- [4] Aliushin M.V., Aliushin A.V., Andriushina L.O., Kolobashkina L.V., Pshenin V.V. Distantcionnye i nekontaktnye tekhnologii registratsii bioparametrov operativnogo personala kak sredstvo upravleniya chelovecheskim faktorom i povysheniia bezopasnosti AES [Monitoring of Bioparameters on the Basis of Distant Technologies]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety], 2013, №3(8), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 69–77. (in Russian)
- [5] Aliushin M.V., Aliushin A.V., Belopolskii V.M., Kolobashkina L.V., Ushakov V.D. Opticheskie tekhnologii dlia sistem monitoringa tekushchego funktsionalnogo sostoiianiia operativnogo sostava upravleniya obektami atomnoi energetiki [Optical Technologies for Systems of Monitoring of the Current Functional State of Nuclear Power Object Management Quick Structure]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety], 2013, №2(7), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 69–77. (in Russian)
- [6] Aliushin V.M. Diagnostika psikhoemotsionalnogo sostoiianiia na osnove sovremennykh akusticheskikh tekhnologii [Diagnostics of Psychoemotional State on the Basis of the Modern Acoustic Technologies]. *Voprosy psikhologii* [Psychology Issues], 2015, №3, ISSN 0042-8841, pp. 145–152. (in Russian)
- [7] Aliushin M.V., Aliushin V.M., Dvoriankin S.V., Kolobashkina L.V. Akusticheskie tekhnologii dlia «intelektualnykh» sistem monitoringa funktsionalnogo sostoiianiia operativnogo sostava upravleniya obektami atomnoi energetiki [Acoustic Technologies for "Intellectual" Systems of Functional Condition Monitoring of Nuclear Power Object Management Quick Structure]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety], 2013, №4(9), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 63–71. (in Russian)
- [8] Aliushin M.V., Abramova V.N., Kolobashkina L.V. Psikhologicheskii trening stressoustoichivosti na osnove distantcionnykh nekontaktnykh tekhnologii registratsii bioparametrov [Psychological Training of Stress Resistance on the Basis of Remote Non-Contact Recording Person Bioparameter Technologies]. *Voprosy psikhologii* [Psychology Issues], 2014, №6, ISSN 0042-8841, pp. 144–152. (in Russian)
- [9] Aliushin M.V., Kolobashkina L.V., Khazov A.V. Professionalnyi otbor personala po psikhologicheskim kachestvam na osnove metodov, razrabotannykh v ramkakh teorii priniatiia reshenii [Professional Selection of Personnel on Psychological Qualities on the Basis of the Methods Developed within a Decision Theory]. *Voprosy psikhologii* [Psychology Issues], 2015, №2, ISSN 0042-8841, pp. 88–94. (in Russian)
- [10] Aliushin M.V., Kolobashkina L.V. Metodologicheskie aspekty avtomatizirovannogo prognozirovaniia chrezvychainykh situatsii tekhnogennogo proiskhozhdeniia [Methodological Aspects of the Automated Prediction of Technogenic Emergency Situations]. *Voprosy psikhologii* [Psychology Issues], 2016, №2, ISSN 0042-8841, pp. 83–90. (in Russian)

**Stress Resistance Increase Due to the Skills of Self-control
and Self-regulation Development on the Basis of Remote Non-contact
Recording Person Bioparameters Technology**

M.V. Alyushin^{*}, L.V. Kolobashkina^{}, A.M. Alyushin^{***}, I.A. Morozov^{****}**

*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*
ORCID: 0000-0002-8555-4453
WoS Researcher ID: F-9247-2017
 *** *e-mail: amalyushin@mephi.ru*
ORCID: 0000-0003-1722-0598
WoS Researcher ID: F-8004-2017;
 **** *e-mail: csbwalker@yandex.ru*
ORCID: 0000-0002-6377-763X
WoS Researcher ID: F-8505-2017

Abstract – Stress resistance hazardous facilities management operators is one of the components of such a thing as the human factor, which is essential to ensure the facility safe operation. Method of psychological training using biofeedback is considered. Remote non-contact recording person bioparameter technologies are applied for the implementation of biological.

Keywords: stress resistance, self-control, self-regulation, remote non-contact technology, biofeedback.

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

351.862.82 : 621.039.58 : 621.311.25

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ КАК ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ В
ФОРМИРОВАНИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ
РАБОТНИКОВ АЭС**

© 2017 В.А. Руденко, Ю.А. Евдошкина, А.В. Железнякова, А.В. Жук

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

Вопросы культуры безопасности, включающие культуру каждого индивида, работающего на потенциально опасных производствах и формирование осознания безопасности населением, которое проживает вблизи данных объектов, имеют ряд противоречий. В статье рассмотрены особенности процесса формирования общественного мнения горожан о факторах, влияющих на безопасное функционирование АЭС. Особое внимание авторы уделяют результатам профессиографического анализа экспертной группы состоящей из работников АС: руководителей, компетентных сотрудников. На основе сравнительного анализа результатов опроса жителей города Волгодонска и экспертной группы определяются основные проблемы и тенденции в структуре оценивания факторов, влияющих на процесс безопасного функционирования АЭС. Основным выводом авторов является обоснование приоритета профессионально значимых личностных качеств работников АЭС, имеющих системообразующее значение для успешности трудовой деятельности. Результаты работы могут быть учтены при организации информационной работы атомных станций с населением.

Ключевые слова: культура безопасности, профессиональный стандарт, профессиональные компетенции, социально-психологические характеристики, АЭС.

Поступила в редакцию: 08.05.2017

Вопросы формирования культуры безопасности достаточно актуальны в современной науке, так как являются жизненно важным элементом безопасности во многих сферах общественной жизни и отраслях промышленности. Культура безопасности – это элемент общечеловеческой культуры в целом. Вместе с культурой, выражающей общественные потребности, интересы, менялись социальные представления о нормах безопасности, способах ее достижения. Основные признаки безопасности, т.е. работы и жизни без опасности, остаются неизменными во все времена.

В настоящее время культура безопасности рассматривается как основополагающий управленческий принцип. Разработке концепции культуры безопасности и внедрению её на потенциально опасных производствах отдается приоритет. Сегодня в атомной отрасли невозможно представить обеспечение безопасности без «сильной культуры безопасности», которая в документах МАГАТЭ INSAG-131 определена в качестве цели, для которой создается вся система управления обеспечением безопасности [1]. Несомненно, и то, что разработка профессиональных стандартов работников атомной отрасли также имеет большое значение для

формирования нового поколения специалистов. Так, например, в утвержденных и вступивших в силу с 1 января 2017 года, профессиональных стандартах «Инженер по строительству атомных электрических станций», «Инженер-проектировщик по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии» определены такие необходимые знания, как «принципы культуры безопасности в атомной отрасли» [2]. Активное участие в разработке профессиональных стандартов, в том числе и для атомной отрасли, принимает Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Так, только Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ (далее – ВИТИ НИЯУ МИФИ) на протяжении 2013-2014 годов разработал 9 профессиональных стандартов для специалистов ГК «Росатом» [3]. Это важный вклад не только в развитие профессиональных навыков работников таких предприятий, но и в формирование осознания безопасности населением, которое проживает вблизи объектов с повышенной опасностью.

Глубина и прочность усвоения способов и средств защиты от опасных и чрезвычайных ситуаций, развития умений и навыков безопасного поведения в различных условиях является основой снижения рисков жизнедеятельности людей. Немалую роль в этом процессе играют качества человека, под которыми понимают индивидуально-психологические особенности личности.

Потребность в кадрах и высокие требования к уровню их профессиональной подготовки ставят перед профильными вузами социально-педагогические задачи максимально возможного приближения выпускника к идеальной модели, характеристики которой определены работодателем. Это объясняется чрезвычайно высокой степенью ответственности работников, занятых в атомной энергетике, что требует от них не только соответствующего уровня первоначальной подготовки, но и способности к самообразованию, саморазвитию, совершенствованию имеющихся и приобретению новых профессиональных знаний, умений и навыков [4].

Успешное формирование профессионализма личности, а вследствие и профессионализма коллектива, базируется на сочетании индивидуально-психологических характеристиках с социальными чертами. Для достижения профессионализма в деятельности нужно обладать определенными «стартовыми возможностями»: способностями, специальными знаниями, умениями, квалификацией, мотивацией.

Таким образом, сравнительный анализ мнений горожан города расположенного вблизи АЭС о факторах, влияющих на безопасное функционирование АЭС и экспертной группы, состоящей из работников АЭС: руководителей, компетентных сотрудников занимает особое место в данном исследовании. В марте-мае 2017 года научно-исследовательской группой студентов и преподавателей ВИТИ НИЯУ МИФИ проводилось исследование по изучению мнения жителей города Волгодонска, целью которого было выявление социально-психологических характеристик работников атомной станции значимых для ее безопасной эксплуатации. Для этого был организован опрос населения на городских улицах, площадях, в скверах.

В исследовании приняли участие 126 человек: 70 женщин и 56 мужчин. Средний возраст респондента составил 42,5 лет, при этом самому младшему участнику опроса 17 лет, самому старшему – 68 лет.

При проведении опроса горожан просили проставить ранги от 1 до 10 наиболее значимым социально-психологическим качествам личности, которыми должен обладать работник атомной станции. При необходимости было предложено дополнить список 2-3 качествами.

Для ранжирования были предложены следующие качества: честность, ответственность, профессионализм, следование установленным правилам и

процедурам.

При ответе на данный вопрос было дано 42 варианта ответов при учете семантики слов, форм образования причастий, суффиксов и других особенностей языка. Для корреляционного анализа часть слов была объединена согласно общему смыслу (например: хорошее образование, образованность).

Обнинский научно-исследовательский центр (ОНИЦ) «Прогноз». В качестве одного из инструментов при проведении профессиографического анализа на АС используют метод экспертной оценки важности каждой из выделенного перечня компетенций. В качестве экспертов выступают не специалисты-психологи, а работники АС: руководители, компетентные сотрудники, подчиненные. Причем, выделяют как отдельно важные качества в профессионально-должностных группах, так и обобщенные характеристики (компетенции) оперативного персонала и руководящих работников АС, которые представлены на рис 2.

При анализе ответов респондентов можно отметить, что жители г. Волгодонска считают самыми значимыми социально-психологическими характеристиками ответственность (80%), профессионализм (76%) и дисциплинированность и исполнительность (66%).

Экспертная группа также считает самой главной характеристикой человека, работающего в атомной отрасли ответственность (100%). Дисциплинированность, исполнительность, организаторские способности и умение работать в команде, по их мнению (по 90%), являются второй важной социально-психологической характеристикой сотрудника. А вот среди жителей г. Волгодонска только 23% считают необходимой такую важную составляющую социальной характеристики, как работа в команде. В то время как такая социальная составляющая, как организаторские способности, данными респондентами вообще не рассматривалась. Возможной причиной такого выбора может являться мнение, что при работе в атомной отрасли такие способности не нужны. Хотя организаторские способности являются одной из самых важных социальных характеристик, что подтверждают сотрудники АС.

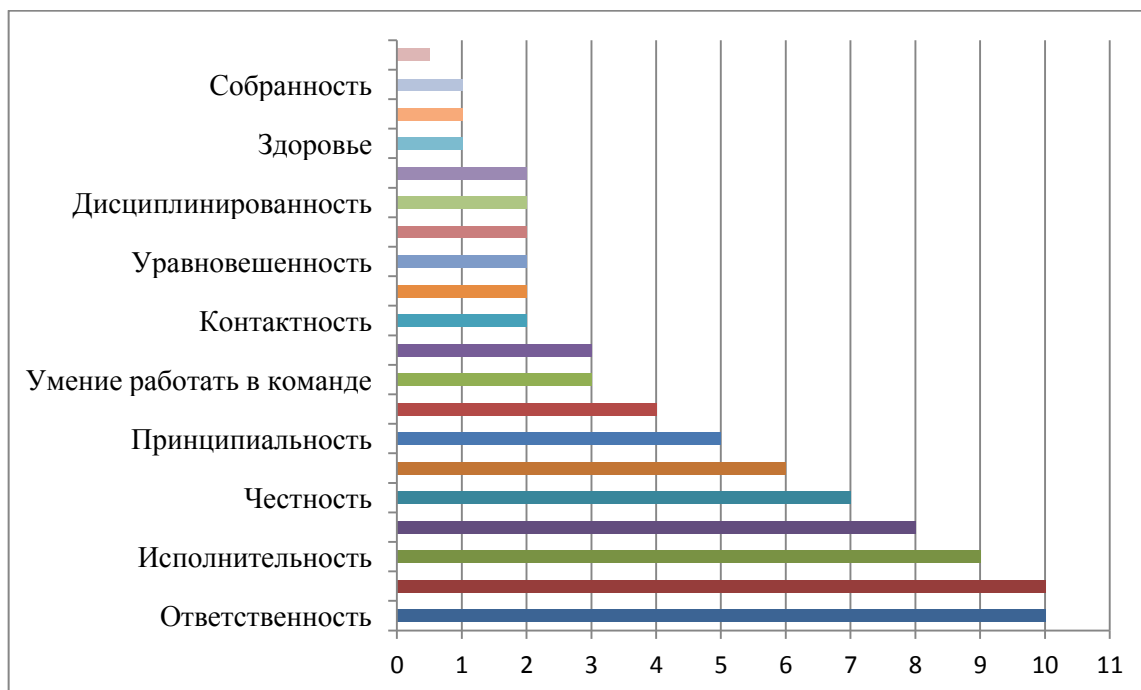


Рис. 1. – Значимые социально-психологические характеристики работников АС (по материалам опроса жителей г. Волгодонска)

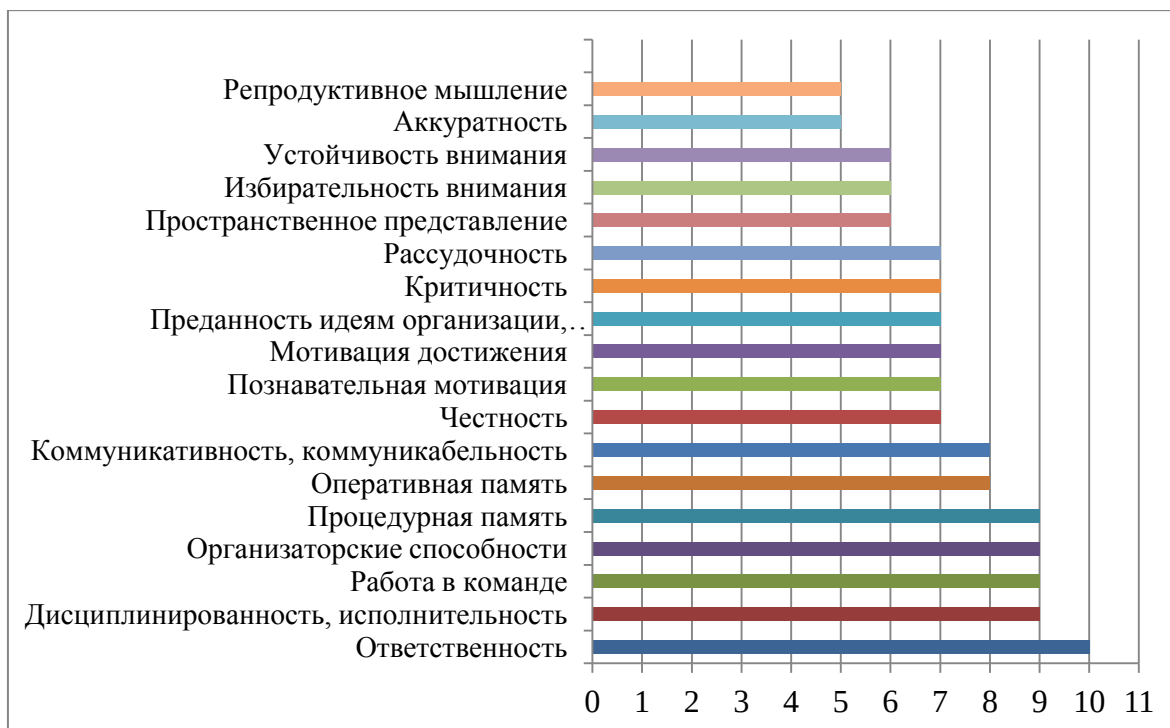


Рис. 2. – Профессионально важные качества и обобщенные характеристики (компетенции) оперативного персонала и руководящих работников атомных станций

Такую характеристику, как профессионализм экспертная группа разделила на несколько составляющих. Из них самая важная – процедурная память. На втором месте по значимости – оперативная память. На третьем месте – устойчивость и избирательность внимания и пространственное представление. На четвертом месте – репродуктивное мышление.

Следующим важной социально-психологической характеристикой оба типа респондентов считают честность, её отметили 68% жителей города и 70% экспертов.

Приблизительно 18% жителей указали в анкете такие социальные характеристики, как коммуникативность, коммуникабельность, которым эксперты отдали 80%.

Всего 4 человека (3%) жителей, принявших участие в опросе, считают важным стремление к улучшению навыков и знаний, в то время как эксперты (70%) считают ее необходимой и важной характеристикой.

Преданность идеям организации, приоритет ценности безопасности немаловажный фактор для сотрудников атомной энергетики (70%), жителями города вообще не рассматривался.

Результаты, полученные в ходе проведенного исследования, позволили выявить тенденции формирования общественного мнения по поводу безопасной деятельности АЭС у горожан, живущих вблизи объектов повышенной опасности и работников данных предприятий.

Был выявлен ряд расхождений по вопросу профессиональных качеств и их роли в процессе безопасного функционирования АЭС.

Выявлены серьезные расхождения в оценках иерархии профессионально важных качеств горожан и экспертов. Зачастую мнения опрашиваемых групп были диаметрально противоположны. Горожане недооценивают роль таких качеств как стремление к улучшению навыков и знаний, коммуникативность, коммуникабельность, и совершенно не рассматривают такое качество как преданность идеям организации,

которое выделено экспертами как приоритет ценности безопасности.

Таким образом, важнейшим требованием к образовательным организациям, осуществляющим подготовку специалистов для атомной отрасли, как объектов с повышенной опасностью, является ориентация образовательной деятельности не только на формирование у студентов универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, но и качественное изменение в ценностном отношении к будущей профессиональной деятельности, их ориентации на принятые в отрасли актуальные корпоративные ценности.

Опираясь на опыт ВИТИ НИЯУ МИФИ [5, 6] важно отметить, что в институте формирование профессионального самоопределения студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли, на примере актуальных ценностей ГК «Росатом», проходит в ситуации неопределенности: прошлый опыт обучающегося перестает быть значимым, а новый еще отсутствует. Для студента возникает проблема: необходимо не просто привыкнуть к переменам, а выработать новые подходы к реализации деятельности, новый образ, соответствующий будущей профессии [7].

Таким образом, безопасность отдельного человека неразрывно связана с безопасностью общества в целом. Исходная предпосылка безопасности – личностные качества человека: ответственность, дисциплинированность, профессионализм и др. Одним из основных факторов безопасности – деятельность самого человека, в том числе и профессиональная, на основе знаний о безопасности и профессиональной подготовки. В организации работы отрасли такого сложного и потенциально опасного производства, как атомная энергетика применяется комплексный подход, который является основой для выделения индивидуальных показателей приверженности работников АС культуре безопасности. Использование данного метода для оценки профессиональной деятельности позволяет прогнозировать реальную приверженность как отдельно взятого специалиста, так и предприятия в целом ценностям культуры безопасности. Включение подобных социально-психологических направлений при организации информационной работы атомной станции, учет влияния представлений сформированных у населения зоны расположения АЭС в отношении вопросов культуры безопасности, социально-психологических характеристик работников атомной станции, на наш взгляд, повысит привлекательность атомной промышленности и энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Машин, В.А.* Культура безопасности и система сбора, учета, классификации и анализе событий низкого уровня [Текст] / В.А. Машин // Электрические станции. – 2012. – №8 – С. 20–28.
2. Профессиональный стандарт «Инженер по строительству атомных электрических станций», Профессиональный стандарт «Инженер-проектировщик по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии» (утверждены приказом Минтруда России от 6 ноября 2015 г. №850н). – 2015 – Режим доступа: URL: <http://fgosvo.ru/uploadfiles/profstandart/01.004.pdf> – 07.05.2017
3. *Руденко, В.А. и др.* Новые профессиональные стандарты для атомной отрасли и производственная система «Росатом» [Текст] / В.А. Руденко, Н.Н. Подрезов, С.А. Томилин, Ю.В. Заяров, Г.А. Доблер, В.В. Синельщиков, А.Э. Гюок // Новый университет. Серия Технические науки. – 2014. – №09(31). – С. 4–8.
4. *Руденко, В.А. и др.* Основные проблемы организации подготовки специалистов для атомной отрасли в условиях внедрения профессиональных стандартов [Текст] / В.А. Руденко, С.А. Томилин, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – №3(20). – С. 80–87.
5. *Евдошкина, Ю.А.* Формирование культуры безопасности личности как новое направление образовательного процесса в техническом вузе [Текст] // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №2(7). – С. 92–94.
6. *Руденко, В.А. и др.* Компетентностный подход в воспитании культуры безопасности в вузе

- [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – №2-3(4). – С. 136–140.
7. Томилин, С.А. и др. Корпоративные ценности как основа формирования профессионального самоопределения студентов при подготовке специалистов для атомной отрасли / С.А. Томилин, Н.П. Василенко, А.В. Железнякова, И.С. Василенко // Педагогика и просвещение. – 2017. – №1. – С. 31–41. – Режим доступа: URL: http://nbpublish.com/library_read_article.php?id=220761 – 08.05.2017.

REFERENCES

- [1] Mashin V.A. Kultura bezopasnosti i sistema sbora, ucheta, klassifikatsii i analize sobytii nizkogo urovnia [Safety Culture and System of Collecting, Recording, Classifying And Analyzing Low-Level Activities]. Elektricheskie stantsii [Electric Stations], 2012, №8, ISSN 0201-4564, pp. 20–28. (in Russian)
- [2] Professionalnyi standart «Inzhener po stroitelstvu atomnykh elektricheskikh stantsii», Professionalnyi standart «Inzhener-proektirovshchik po vyvodu iz ekspluatatsii obiektov ispolzovaniia atomnoi energii» (utverzhdeny prikazom Mintruda Rossii ot 6 noiabria 2015 goda. №850n) [Professional Standard "Engineer of Nuclear Power Plant Construction", Professional Standard "Design Engineer of Nuclear Facility Decommissioning " (approved by order of the Ministry of Labor of Russia on November 6, 2015, No. 850n)]. 2015. Available at: <http://fgosvo.ru/uploadfiles/profstandart/01.004.pdf> (in Russian)
- [3] Rudenko V.A., Podrezov N.N., Tomilin S.A., Zaiarov Iu.V., Dobler G.A., Sinelshchikov V.V., Gook A.E. Novye professionalnye standarty dlia atomnoi otrasli i proizvodstvennaia sistema «Rosatom» [New Professional Standards for the Nuclear Industry and "Rosatom" Production System]. Novyi universitet. Seriya Tekhnicheskie nauki [New University. Series of Engineering.], 2014, №09(31), ISSN 2221-9552, pp. 4–8. (in Russian)
- [4] Rudenko V.A., Tomilin S.A., Vasilenko N.P. Osnovnye problemy organizatsii podgotovki spetsialistov dlia atomnoi otrasli v usloviakh vnedreniia professionalnykh standartov [The Main Problems of Training Specialists for the Nuclear Industry in the Context of Professional Standards Introduction]. Globalnaya yadernaia bezopasnost [Global nuclear safety], 2016, №3(20), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 80–87. (in Russian)
- [5] Evdoshkina Iu.A. Formirovanie kultury bezopasnosti lichnosti kak novoe napravlenie obrazovatel'nogo protsessa v tekhnicheskoi vuze [Forming Personal Safety Culture as a New Area of the Educational Process in Technical University]. Globalnaya yadernaia bezopasnost [Global nuclear safety], 2013, №2(7), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 92–94. (in Russian)
- [6] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Kompetentnostnyi podkhod v vospitanii kultury bezopasnosti v vuze [Competence Approach in the Education of Safety Culture in the University]. Globalnaya yadernaia bezopasnost [Global nuclear safety], 2012, №2-3(4), eISSN 2499-9733, ISSN 2305-414X, pp. 136–140. (in Russian)
- [7] Tomilin S.A., Vasilenko N.P., Zhelezniakova A.V., Vasilenko I.S. Korporativnye tsennosti kak osnova formirovaniia professionalnogo samoopredeleniia studentov pri podgotovke spetsialistov dlia atomnoi otrasli [Corporate Values as a Basis for the Professional Self-Determination Formation in Training Specialists for the Nuclear Industry]. Pedagogika i prosveshchenie [Pedagogy and Education], 2017, №1, ISSN 2306-434X, pp. 31–41. Available at: http://nbpublish.com/library_read_article.php?id=220761 (in Russian)

Safety Culture as an Integrated Element in Forming Professional Competencies of NPP Workers

V.A. Rudenko*, Y.A. Evdoshkina, A.V. Zheleznyakova***, A.V. Zhuk******

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

* e-mail: viti@mephi.ru

ORCID iD: 0000-0002-6698-5469

WoS ResearcherID: B-7730-2016

** e-mail: YAEvdoshkina@mephi.ru

ORCID: 0000-0002-6704-0643

WoS ResearcherID: G-8379-2017

*** e-mail: AVZheleznyakova@mephi.ru

ORCID: K-2597-2017

WoS ResearcherID: K-2597-2017

**** e-mail: AVZhuk@mephi.ru

ORCID: 0000-0002-7596-5240

WoS ResearcherID: G-3749-201

Abstract – Issues of safety culture including the culture of each individual working in potentially hazardous industries and the formation of safety awareness of the population living near these facilities, have a number of contradictions. The article considers the peculiarities of the public opinion formation process about the factors that affect the safe functioning of the NPP. Special attention is paid to the results of the professional analysis of the expert group consisting of NPP workers: managers, competent employees. The main problems and trends in the structure of the assessment of factors affecting the NPP safe operation process are determined based on a comparative analysis of the survey results of Volgodonsk residents and the expert group. Authors conclude the priority substantiation of professionally significant personal qualities of NPP workers, who have a system forming importance for the labor activity success. The results of the work can be taken into account when organizing the information work of nuclear stations with the population.

Keywords: safety culture, professional standard, professional competencies, social and psychological characteristics, NPP.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Авдеюк О.А.	62	Морозов И.А.	96
Алюшин А.М.	96	Муха Ю.П.	62
Алюшин М.В.	96	Науменко Г.А.	47
Бугакова А.В.	38	Пахомов И.В.	38
Бурдаков С.М.	47	Пимшин Ю.И.	47
Горская О.И.	7	Постой Л.В.	47
Дворников О.В.	38	Прокопенко Н.Н.	38
Дятлов В.Л.	38	Проскуряков К.Н.	89
Евдошкина Ю.А.	104	Руденко В.А.	104
Елохин А.П.	21	Рябенко В.Ю.	71
Железнякова А.В.	104	Сапельников В.М.	7
Жилина М.В.	21	Сергеев В.В.	81
Жук А.В.	104	Сироткина А.Л.	81
Запорожец М.В.	89	Федоренко Д.Н.	71
Колобашкина Л.В.	96	Фёдоров А.И.	89
Королев А.Д.	62	Федорович Е.Д.	81
Королева И.Ю.	62	Черешнева Л.А.	7
Кравченко П.Д.	71	Чеховский В.А.	38
Кубарев В.Ф.	56	Яковлев С.В.	7

AUTHOR INDEX OF VOL. 2, 2017

Alyushin A.M.	96	Kravchenko P.D.	71
Alyushin M.V.	96	Morozov I.A.	96
Avdeuk O.A.	62	Mucha Y.P.	62
Bugakova A.V.	38	Naumenko G.A.	47
Burdakov S.M.	47	Pakhomov I.V.	38
Chekhovskii V.A.	38	Pimshin Yu.I.	47
Chereshneva L.A.	7	Postoy L.V.	47
Cubarew V.F.	56	Prokopenko N.N.	38
Dvornikov O.V.	38	Proskuryakov K.N.	89
Dyatlov V.L.	38	Rudenko V.A.	104
Elokhin A.P.	21	Ryabenko V.Yu.	71
Evdoshkina Y.A.	104	Sapelnikov V.M.	7
Fedorenko D.N.	71	Sergeev V.V.	81
Fedorov A.I.	89	Sirotkina A.L.	81
Fedorovich E.D.	81	Yakovlev S.V.	7
Gorskaya O.I.	7	Zaporozhets M.V.	89
Kolobashkina L.V.	96	Zheleznyakova A.V.	104
Korolev A.D.	62	Zhilina M.V.	21
Koroleva I.Y.	62	Zhuk A.V.	104

NOTES FOR AUTHORS

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

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

3) Information attached:

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

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

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

- the abstract in Russian and English;

- UDC index;

- keywords in Russian and English.

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

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

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

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

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

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

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

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

7) The Publication Ethics.

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

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

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

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

c) final approval of the version to be published.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH:

For journals:

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

Indicate article DOI if it in the presence.

For books:

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

For web-resources:

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

For foreign references:

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

For materials of conferences:

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

For materials of conferences (foreign references):

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

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

2) Комплект должен содержать экспертное заключение о возможности опубликования.

3) К статье прилагаются:

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

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

- название статьи и инициалы авторов на русском и английском языке;

- аннотация на русском и английском языках;

- индекс УДК;

- ключевые слова на русском и английском языках.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Библиография должна быть оформлена согласно ГОСТу 7.1-2003 «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления». **References** предоставляются отдельно (правила оформления см. 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. : Магма, 1993. – С. 19-25.

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

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

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

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

E-mail: oni-viti@mephi.ru

Тел.: 8(8639)222717.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2017, 2(23)

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

Сдано в набор 14.06.2017 г.

Компьютерная верстка Вишнева М.М.

Подписано к печати 16.06.2017 г.

Бумага «SvetoCory» 80 г/м². Объем 14,4 усл.печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ(ф) НИЯУ МИФИ