

ISSN 2305-414X

2016, 1

**GLOBAL
NUCLEAR
SAFETY**



**ГЛОБАЛЬНАЯ
ЯДЕРНАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

<http://gns.mephi.ru>

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2016, 1(18)

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.M. Agapov (Doctor of Technical sciences, Professor (*Russia*)),

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address:

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia

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

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

Press address:

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

Moscow

© National Research Nuclear University MEPhI, 2016

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2016, 1(18)

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 Андржей (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.М. Агапов (д-р техн. наук, проф. (Россия)),
А.В. Чернов (д-р техн. наук, проф. (Россия)),
Ю.И. Пимишин (д-р техн. наук, проф. (Россия)),
Ю.П. Муха (д-р техн. наук, проф. (Россия)),
В.В. Кривин (д-р техн. наук, проф. (Россия)),
В.И. Ратушный (д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)),
Ю.С. Сысоев (д-р техн. наук, проф. (Россия)),
А.В. Паламарчук (к-т техн. наук (Россия)),
В.Е. Шукинунов (д-р техн. наук, проф. (Россия)),
В.П. Поваров (к-т физ.-мат. наук (Россия)),
С.М. Бурдаков (к-т техн. наук, доц. (Россия)),
И.А. Бубликова (к-т техн. наук, доц. (Россия)),
А.В. Жук (к-т ист. наук, доц. (Россия))

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

Москва

CONTENTS

2016, 1(18)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

Indistinct and Multiple Simulation and Assessment of Farmland Ecological Safety in Case of Radiation Pollution <i>A.F. Rogachev, E.V. Melikhova</i>	7
The Analysis of Existing Methods for Washing the Filter Cloths of the Fish Protection Devices, Designed to Ensure Industrial and Environmental Safety of Nuclear Power Plants <i>V.G. Tkachev, L.V. Postoj</i>	19

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

Exploratory Researches in Information and Control System Creating for Nuclear Power Plants under Uncertainty <i>A.E. Kolodenkova</i>	26
Laser and Hybrid Laser-Arc Welding of Cryogenic 9%Ni Steel <i>S. Gook, A. Gumenyuk, M. Rethmeier, A.M. El-Batahgy</i>	34
Study of Wear-Resistance Coatings Obtained by Means of Supersonic Gas-powder and Gas-powder Surfacing <i>T.A. Litvinova, A.A. Metsler, R.V. Pirozhkov</i>	46
Stability of Steel Cylindrical Shell Made of Prefabricated Elements <i>S.A. Rashchepkina</i>	51
Influence of Surface Boiling at Underheating on Boiling Area State <i>P.A. Ponomarenko, M.A. Frolova, N.N. Lenivenko</i>	60
Modern Methods of Automatic Welding of Responsible Large Dimension Thin-walled Aluminum Workpieces: Analysis of the Technological Capability <i>A.M. Tupitsyn, E.A. Gladkov, A.V. Chernov</i>	66
Multichannel Radiation-Hardened Instrumentation Amplifier for Sensor Systems and Analog Interfaces of Demanding Application <i>N.N. Prokopenko, N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova, A.A. Ignashin</i>	76

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Problem of Transport Technology Equipment Improving in Nuclear Engineering Using Reloading Machine as an Example <i>P.D. Kravchenko, A.D. Maliarenko</i>	87
Operation Extension Features of Overload Machines of PWR-1000 Reactors Power Units <i>A.A. Lapkis, V.N. Nikiforov, O.Yu. Pugacheva</i>	95

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

VETI NRNU "MEPhI" Training Programs for the Self-Regulatory Organization Noncommercial Partnership "SOYUZATOMSTROY" Increase Security Installation Level of Nuclear Facilities <i>V.S. Opekunov, V.A. Rudenko, V.A. Denisov, A.V. Stambulko, Yu.V. Zajarov, Yu.I. Pimshin</i>	104
Interaction of Sarov State Physics and Technical Institute the branch of NRNU "MEPhI" and the Nuclear Industry in the Scientific and Engineering Personnel Preparation <i>G.D. Belyaeva, A.G. Sirotkina, G.A. Fedorenko, A.B. Makarets</i>	108
Safety Culture in Value System of «Rosatom» State Corporation <i>V.A. Rudenko, N.P. Vasilenko</i>	118

Author Index of vol. 1, 2016	123
------------------------------------	-----

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1, 2016

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Нечетко-множественное моделирование и оценка экологической безопасности сельскохозяйственных земель при радиационном загрязнении
А.Ф. Рогачев, Е.В. Мелихова.....7

Анализ существующих способов промывки фильтрующих полотен рыбозащитных устройств, используемых в обеспечении промышленной и экологической безопасности атомных электростанций
В.Г. Ткачев, Л.В. Постой.....19

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

Предпроектные исследования по созданию информационно-управляющих систем атомных станций в условиях неопределенности
А.Е. Колоденкова.....26

Лазерная и гибридная лазерно-дуговая сварка хладостойких сталей с содержанием никеля до 9%
С.Э. Гоок, А.В. Гуменюк, М. Ретмайер, А.М. Эль-Батаги.....34

Исследование износостойкости покрытий, полученные методами газопорошковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки
Т.А. Литвинова, А.А. Мецлер, Р.В. Пирожков.....46

К вопросу об устойчивости металлической цилиндрической оболочки из сборных элементов
С.А. Ращепкина.....51

Влияние поверхностного кипения с недогревом на состояние кипящей поверхности
П.А. Пономаренко, М.А. Фролова, Н.Н. Ленивенко.....60

Анализ технологических возможностей современных способов автоматической сварки крупногабаритных тонкостенных изделий ответственного назначения из алюминиевых сплавов
А.М. Тупицын, Э.А. Гладков, А.В. Чернов.....66

Многоканальный радиационно-стойкий инструментальный усилитель для датчиковых систем и аналоговых интерфейсов ответственного применения
Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова, А.А. Игнашин.....76

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Проблема совершенствования транспортно-технологического оборудования в атомном машиностроении на примере перегрузочной машины <i>П.Д. Кравченко, А.Д. Маляренко</i>	87
Особенности продления срока эксплуатации перегрузочных машин энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 <i>А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева</i>	95

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

Программы повышения квалификации ВИТИ НИЯУ МИФИ для НП СРО «Союзатомстрой», повышающие уровень безопасности сооружений ОИАЭ <i>В.С. Опекунов, В.А. Руденко, В.А. Денисов, А.В. Стамбулко, Ю.В. Заяров, Ю.И. Пимишин</i>	104
Взаимодействие СарФТИ НИЯУ МИФИ с предприятиями атомной отрасли в вопросах подготовки научных и инженерных кадров <i>Г.Д. Беляева, А.Г. Сироткина, Г.А. Федоренко, А.Б. Макареца</i>	108
Культура безопасности в системе ценностей госкорпорации «РОСАТОМ» <i>В.А. Руденко, Н.П. Василенко</i>	118
Авторский указатель номера 1, 2016.....	123

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621.311.25

НЕЧЕТКО-МНОЖЕСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

© 2016 А.Ф. Рогачев, Е.В. Мелихова

Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Россия

Развитие ядерной энергетики и ее влияние на все сферы экономики определяет важность рассмотрения вопросов моделирования и оценки уровня обеспечения экологической безопасности с учетом специфических угроз для сельскохозяйственного производства в рамках развития сельскохозяйственной радиозоологии. Значительное количество локальных факторов, определяющих общий уровень экологической и радиационной безопасности, требует обоснования системы моделируемых показателей и инструментария их агрегирования.

Цель работы: Разработка математического аппарата и нечетко-множественной модели для интегральной оценки экологической безопасности сельскохозяйственного производства при радиационном загрязнении.

Для реализации цели необходимо решение следующих задач:

- обоснование системы показателей и их укрупненных групп для моделирования экологической безопасности сельскохозяйственного производства с учетом специфических угроз;
- обосновать структуру и реализовать нечетко-множественную модель экологической безопасности регионального аграрного производства;
- осуществить компьютерную реализацию разработанной системы нечеткого вывода, с использованием которой выявить приоритетные направления совершенствования экологической безопасности аграрного производства региона на примере Волгоградской области.

Исследование проводилось с использованием свободно распространяемой программной среды «FisPro version 3.5», позволяющей в автоматизированном режиме строить моделирующие системы нечеткого логического вывода, а также статистических данных по условиям аграрного производства в условиях Волгоградской области.

Основные выводы:

1. Обоснована система показателей экологической безопасности аграрного производства с учетом специфических угроз радиационного загрязнения, включающая укрупненные группы, а также характеризующие их локальные показатели для нечетко-множественного моделирования.
2. Построенная на основе алгоритма нечеткого вывода Мамдани двухуровневая модель экологической безопасности, реализованная в среде «FisPro version 3.5», позволяет моделировать и оценивать влияние укрупненных групп системы экологических показателей на уровень экологической безопасности аграрного производства субъектов различного уровня в условиях специфических угроз загрязнения сельскохозяйственных земель.
3. Приоритетным направлением улучшения экологической безопасности аграрного производства Волгоградской области может быть совершенствование культуры земледелия и, прежде всего, поддержание состояния почвенного покрова с учетом региональной системы сухого земледелия.

Ключевые слова: математическое моделирование, экологическая безопасность, радиационное загрязнение, система экологических показателей, нечетко-множественная модель, состояние сельскохозяйственных земель.

Поступила в редакцию 20.03.2016 г.

Согласно действующей «Стратегии национальной безопасности РФ», утвержденной Указом Президента РФ от 12 мая 2009 г. № 537, «...Стратегическими целями обеспечения экологической безопасности страны ставятся сохранение обеспечения защиты окружающей природной среды, а также ликвидация экологических последствий хозяйственной деятельности ...» [1]. При этом отмечается наличие экологически неблагоприятных регионов в Российской Федерации, сохранение угроз в сфере экологической безопасности, а также то, что радиоактивные отходы неядерного топливного цикла остаются вне нормативного правового регулирования и надлежащего надзора.

Категория «Экологическая безопасность», как одна из существенных компонент национальной безопасности, включает совокупность требований, обеспечивающих безопасность жизнедеятельности населения и устойчивое состояние природных эко- и биосистем.

Негативные эколого-экономические и социальные тенденции техногенного воздействия на среду определяют необходимость выявления и классификации специфических угроз и факторов риска, а также сокращения неблагоприятных последствий от их воздействия. Упомянутые направления являются основой региональной экологической политики и устойчивого эколого-экономического развития [2].

Развитие ядерной энергетики и ее влияние на все сферы экономики определяет важность рассмотрения вопросов моделирования и оценки уровня обеспечения экологической безопасности сельскохозяйственного производства в рамках развития сельскохозяйственной радиоэкологии.

В радиобиологии используется понятие коэффициента качества излучения, который позволяет учитывать возможные различия биологической эффективности ионизирующих излучений разного качества по критерию линейной передачи энергии (ЛПЭ). Коэффициент качества, учитывающий неблагоприятные биологические последствия облучения человека в малых дозах, составляет: для рентгеновского и гамма-излучения – 1, для протонов с энергией меньше 10 МэВ – 10, нейтронов с энергией 0,1-10 МэВ – 10, для альфа-излучения энергией меньше 10 МэВ – 20. Для учета биологической эффективности различных излучений введено понятие эквивалентная доза, являющееся основной дозиметрической величиной в области радиоэкологии, радиобиологии и радиационной безопасности.

Сельскохозяйственная радиоэкология (СХРЭ) изучает закономерности миграции радионуклидов по биологическим цепям в агропромышленной сфере и действие ионизирующих излучений, как одного из ведущих экологических факторов в современной биосфере, на агроценозы, сельскохозяйственные растения и животных [3]. СХРЭ разрабатывает способы ограничения вовлечения радионуклидов в биологический круговорот, снижения содержания радиоактивных веществ в продукции растениеводства и животноводства и обосновывает систему ведения агропромышленного производства, обеспечивающую минимальное радиационное воздействие на человека, а в некоторых случаях и на растения и животных, обосновывает принципы функционирования АПК на территориях с повышенным содержанием радиоактивных веществ.

В монографии [5] отмечается, что для условий размещения РоАЭС «уровень экологической напряженности, рассматриваемый в рамках трехзвенной цепи: антропогенная нагрузка (промышленная, сельскохозяйственная, транспортная) – загрязнение окружающей среды (атмосферного воздуха, питьевой воды, почв и сельхозпродукции) – здоровье человека, оценивается как кризисный».

Настоящая работа посвящена математическому моделированию и оценке

экологической безопасности сельскохозяйственного производства в условиях специфических угроз радиационного загрязнения. В качестве объекта исследования рассматривается нечеткая математическая модель для оценки уровня экологической безопасности сельскохозяйственного производства.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вопросы математического моделирования экологической безопасности, в частности аграрного производства, рассматривались отечественными исследователями А. Голубевым, В. Зеляковской, М. Крассом, Г. Лобачевой, Н. Мосиенко, Е. Литвиновым, И. Наталухой, Р. Нижегородцевым, Е. Попковой, Е. Шаврак и другими.

В работах перечисленных авторов рассматриваются основные источники радиоактивного загрязнения биосферы и ее составной части – агроценозов, общие принципы организации аграрного производства в условиях радиоактивного загрязнения, проблемы, возникающие в связи с миграцией радионуклидов по пищевым цепям: «почва – растение – человек», «почва – растение – с.-х. животное – продукция животноводства – человек». Сельское хозяйство является основным каналом, через который происходит вовлечение радионуклидов в пищевые цепи. Обобщенная классификация видов загрязнения сельскохозяйственных земель представлена на рисунке 1.

Растения могут загрязняться в процессе выпадения радионуклидов из воздуха (авральный путь загрязнения). В то же время, выпавшие радионуклиды попадают в почву, из почвы – в корни растений, и снова через растения – в организм животного и человека. Основным источником поступления радионуклидов в организм человека – молоко и молочные продукты. В некоторых случаях с растительной пищей (овощи, злаки) может поступать в организм человека до 40-60% стронция-90 и цезия-137 [9].

Рассмотрим угрозы радиоактивного загрязнения, специфические для аграрного производства. По мере расширения сети АЭС и увеличения объемов радиоактивных отходов, будет возрастать число районов с повышенным содержанием искусственных радионуклидов. Даже при безаварийной работе ядерных реакторов образуются газообразные радионуклиды, поступающие в атмосферу. Количество некоторых радионуклидов в расчете на МВт мощности реактора за год его работы составляет: ^{85}Kr – $1,4 \cdot 10^{13}$ Бк; ^3H – $7,4 \cdot 10^{11}$ Бк; ^{222}Rn – $2,1 \cdot 10^9$ Бк. Кроме того, в биосферу поступают и природные радионуклиды, ассоциированные с органическими отложениями: так, на 1 МВт мощности, получаемой при сжигании угля, за год работы в биосферу попадает: ^{226}Ra – $2 \cdot 10^7$ Бк, ^{228}Ra – $1,3 \cdot 10^7$ Бк, а также уран и торий. В результате неполадок в работе и аварий ядерные реакторы становятся потенциальными источниками таких радионуклидов, как ^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs .

В результате испытания ядерного оружия в биосфере возросло содержание не только продуктов радиоактивного распада, образующихся непосредственно в процессе ядерной реакции, но и таких радионуклидов, как ^3H , ^{14}C , ^{35}Fe , которые образуются под воздействием потока нейтронов в зоне ядерного взрыва. По некоторым оценкам, в результате ядерных взрывов в атмосферу попало 2100 кг радионуклида ^{14}C и 215 кг трития, что значительно превышает количество этих радионуклидов, образующихся в результате естественных процессов в верхних слоях атмосферы (естественный уровень трития в атмосфере 1,8 кг, ежегодно в верхних слоях атмосферы образуется 8 кг радионуклида ^{14}C).

Аэральное радиоактивное загрязнение растений происходит в результате выпадения радиоактивных осадков из атмосферы. Радиоактивные аэрозоли, вносимые в атмосферу в результате ядерных взрывов, а также аварий и разрушений атомных

электростанций и предприятий ядерного топливного цикла, постепенно осаждаются и загрязняют биосферу.

Величина радиоактивного загрязнения растительности тем меньше, чем больше времени пройдет от начального выпадения радиоактивных осадков на посевы до уборки урожая.



Рис. 1. – Классификация видов загрязнения сельскохозяйственных земель

Зная величину плотности радиоактивных выпадений, коэффициент первичного удерживания и динамику полевых потерь, можно рассчитать загрязнение растительной массы на любое время после одноразового выпадения на посевы:

$$A_t = \sigma \left(\alpha_0 - \frac{ПП_t}{100} \right) \quad (1)$$

где A_t – содержание радиоактивных веществ в растительной массе с площади 1 м^2 через t дней после загрязнения посева, Ки;
 σ – плотность радиоактивных выпадений, Ки;
 α_0 – коэффициент первичного удерживания (в долях единицы);
 $ПП_t$ – полевые потери, процент первоначально задержанного растениями количества радиоактивных веществ за время t .

Кроме аэрального загрязнения, имеет место и корневое загрязнение растений радионуклидами. Почва как основной компонент агроценоза оказывает определяющее

влияние на интенсивность включения радиоактивных веществ в кормовые и пищевые цепи. Величины перехода ^{90}Sr и ^{137}Cs из почвы в растения прежде всего зависят от типа почв. Наиболее высокие уровни загрязнения наблюдаются на дерново-подзолистых почвах, особенно легкого гранулометрического состава, меньшие – на серых лесных почвах и сероземах и самые низкие – на черноземах. Из кислых почв радионуклиды поступают в растения в значительно больших количествах, чем из почв слабокислых, нейтральных или слабощелочных. Гранулометрический состав почв сильнее влияет на поступление в растения ^{137}Cs , чем на накопление ^{90}Sr . Это обусловлено спецификой сорбции Цезия в почвах и, в частности, необменной сорбцией его в некоторых глинистых минералах.

Для характеристики накопления радионуклидов в растениях при поступлении их из водного раствора и почв используется коэффициент накопления — отношение содержания радионуклида в единице растительной массы к содержанию его в единице массы почвы или единице объема раствора.

При поступлении из водного раствора величина коэффициента накопления ^{137}Cs значительно выше, чем ^{90}Sr , тогда как при поступлении из почвы коэффициент накопления ^{137}Cs намного меньше, чем ^{90}Sr (см. табл.). Отметим, что размеры накопления радионуклидов в растениях зависят от их видовых и сортовых биологических особенностей. Имеет место аналогия в поступлении в растения ^{90}Sr и ^{137}Cs и их химических аналогов кальция и калия. Растения, содержащие больше кальция, накапливают ^{90}Sr в повышенных количествах, а растения, отличающиеся высоким содержанием калия, в большинстве накапливают и больше ^{137}Cs .

Таблица 1. – Коэффициенты накопления радионуклидов для разных типов почв

Радио- нуклид	Из водного раствора		Из дерново-подзолистой суглинистой почвы		Из выщелоченного чернозема	
	солома	зерно	солома	зерно	солома	зерно
^{90}Sr	24,1	3,4	10,0	0,5	1,2	0,09
^{137}Cs	100,3	36,5	0,8	0,3	0,13	0,03

Кроме того, поступление радионуклидов зависит от распределения корневой системы в почве, продуктивности растений, продолжительности вегетационного периода и некоторых других биологических особенностей. В товарной части растениеводческой продукции (зерно, корнеплоды, клубни) на единицу сухой массы урожая больше всего упомянутых радионуклидов содержат корнеплоды (столовая свекла, морковь) и бобовые культуры (горох, соя, вика), затем картофель, более низкое количество – зерновые злаки.

Следует отметить существенную разницу в накоплении радионуклидов в урожае озимых и яровых зерновых культур. Озимые зерновые культуры (пшеница, рожь) как правило накапливают в 2-2,5 раза меньше ^{90}Sr и ^{137}Cs , чем яровые зерновые культуры (пшеница, овес, ячмень). Это объясняется более высоким урожаем озимых, чем яровых.

Определенную опасность для человека представляет потребление загрязненных радионуклидами овощных культур, поскольку овощи в большинстве случаев поступают в пищу без переработки. Нуклиды ^{90}Sr больше всего накапливается в корнеплодах столовой свеклы и меньше – в плодах томатов и клубнях картофеля, что в известной мере связано с концентрацией кальция в этих частях урожая.

Более низкое содержание ^{90}Sr в клубнях картофеля, чем в корнеплодах свеклы и моркови, объясняют тем, что корнеплод – это видоизмененный корень, через который

^{90}Sr поступает из почвы в растение, клубень же картофеля – видоизмененный стебель, и радионуклид может поступать из почвы в надземную часть растения, минуя клубни.

Отметим, что продукты животноводства как важнейшие ингредиенты питания относятся к основным источникам радионуклидов для человека. Сельскохозяйственные животные в общей схеме миграции радионуклидов занимают особое место. Прежде всего это жвачные животные, которым требуется много грубых и сочных кормов – в пастбищный период корова в течение суток поедает траву с площади 100-300 м². При этом вместе с травой она потребляет большое количество радионуклидов, выпавших на пастбище, являясь своеобразным аккумулятором и передатчиком радионуклидов человеку по пищевой цепи.

Многообразие рисков и угроз специфических загрязнений обуславливает необходимость выбора соответствующего математического аппарата для их адекватного учета. Математический аппарат нечеткой логики обычно применяют, когда имеющейся количественной и качественной информации недостаточно, либо она неполная для получения статистически значимых выводов с требуемой степенью надежности. Такой подход позволяет формировать обобщенные индикаторы на основе нечетких оценок их технико-экономических показателей путём экспертного ранжирования, либо решения формулируемой задачи экономико-математической оптимизации. Гибкость методов теории нечеткой математики позволяет рассматривать их как эффективный инструмент для решения различных перспективных задач анализа и прогнозирования сложных природно-экономических и социальных систем. Основой компьютеризированной системы нечеткого вывода является FIS-структура, которая содержит данные для функционального отображения “входы-выходы”. Обобщенная структура получаемой системы нечеткого логического вывода для моделирования уровня экологической безопасности представлена на рисунке 2.

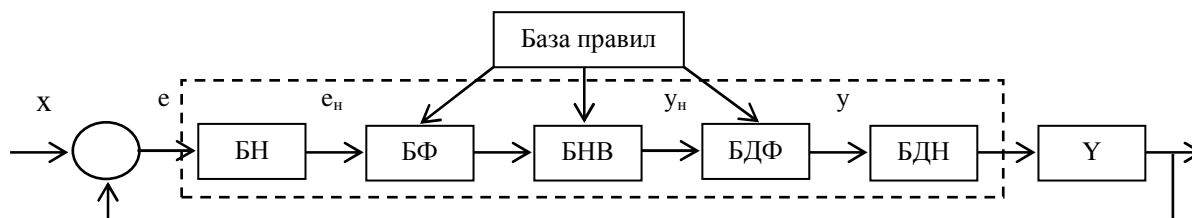


Рис. 2. – Обобщенная структура системы нечеткого логического вывода параметров экологической безопасности:

X – четкий вектор входных параметров; БН – блок нормирования; БФ – блок фазификации, формирующий значение ФП; БНВ – блок нечеткого вывода, формирующий вывод о соответствующем нечетком множестве значений; БДФ, БДН – блоки дефазификации и денормирования реализуют обратные процедуры: по нескольким «усеченным» функциям принадлежности вычисляют четкие значения соответствующего показателя; Y – выходной четкий вектор параметров экологической безопасности

Проведенный обзор специфических угроз загрязнения для сельскохозяйственного производства и математических подходов к их агрегированию позволяет обосновать систему показателей, которые необходимо учитывать при моделировании его экологической безопасности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди множества (порядка нескольких сотен) критериальных показателей оценки состояния сельскохозяйственных экосистем, включающие такие группы, как критерии экологической оценки состояния почв (13 показателей), истощения водных ресурсов (6

показателей), степени химического загрязнения поверхности оросительных вод (10 показателей), деградации наземных с.-х. экосистем (12 показателей), загрязнения атмосферы (4 показателя), биогеохимические критерии (6 показателей) оценки с.-х. территорий [4]. Отметим, что каждый из частных показателей в соответствующей функциональной группе также может подразделяться на компоненты. В частности, среди 13 частных показателей группы критериев экологической оценки состояния почв учитывают, в рамках показателя «Площадь радиоактивного загрязнения» такие его компоненты, как площадь радиоактивного загрязнения цезием-137, стронцием-90 и плутонием (сумма изотопов), параметры которых численно нормированы для случаев ограничения благополучия, экологического бедствия и чрезвычайной экологической ситуации. С учетом значительного количества локальных показателей в каждой из функциональных групп, последние для моделирования и последующего анализа были сведены к трем укрупненным «Почва», «Атмосфера», «Вода».

Следовательно, проблема выбора математического аппарата для адекватного оценивания уровня экологической безопасности сельскохозяйственного производства должна решаться с учетом необходимости учета множества разнородных по физической природе и размерностям показателей.

Приведение к безразмерному виду принципиальных сложностей не представляет, например, нормированием вида

$$f = \frac{f_{\text{измер}} - f_{\text{min}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{измер}}$ – нормируемый показатель;
 $f_{\text{max}}, f_{\text{min}}$ – максимальное и минимальное значение критерия в выборке по нормируемому показателю.

Учет влияния частных показателей внутри перечисленных укрупненных групп, так и внутри каждой из упомянутых групп между собой предлагается с использованием математического аппарата нечеткой логики, широко используемого в системах искусственного интеллекта [8, 12].

В качестве инструментального средства, реализующего используемый нечетко-множественный подход, были проанализированы такие программные средства, как Fuzzy Logic Toolbox системы компьютерного моделирования MATLAB, а также ПС FuzzyTECH, FisPro и др. С учетом функциональных возможностей, мобильности и доступности было выбрано свободно распространяемое программное средство «FisPro version 3.5» (Open source software - IDN.FR00t030u24.000.RP.2u05.0u3.31235. Authors: Serge Guillaume, Bricjrtle Charnomordic, Jean-Luc Lablee), позволяющий в автоматизированном режиме строить моделирующие системы нечеткого логического вывода.

Для построения функций принадлежности (ФП) каждого из частных показателей, определяющих уровень ЭБ по выявленным укрупненным группам, предварительно проводился анализ их изменений за предшествующий период на примере условий Волгоградской области.

В процессе математического моделирования ЭБ вначале определялись уровни лингвистических значений терм-множества с построением функций принадлежности для каждого из учитываемых частных показателей.

В качестве примера на рис. 3 представлены структура и параметры достаточно типичной ФП переменной «meat prod» («уровень экологической безопасности производства мяса») в системе «FisPro v.3.5», терм-множество которой представлено

три лингвистическими значениями («низкий»; «средний»; «высокий»). В частности, были приняты треугольная зависимость типа «trimf» для ФП терма «среднее» (MF2). Для термов «низкий» и «высокий» приняты ФП вида «semi trapezoidal». Аналогично формировались ФП для остальных показателей ПБ на основе анализа прогнозных моделей их динамики.

Представляется обоснованным, что для основных показателей в сфере сельскохозяйственного производства отклонение от «оптимальное» в любую сторону является нежелательным, что учитывалось при формировании базы продукционных правил в окне Rules, фрагмент которой представлен на рис. 4.

На первом уровне нечетко-множественной модели получены значения безразмерных показателей уровней ЭБ по сформированным ранее укрупненным группам.

Значения показателей, рассчитанные на первом уровне, принимались, в качестве входных переменных второго уровня, моделирующего значение $I_{ЭБ}$ – интегрального безразмерного показателя с областью изменения в промежутке $[0, 1]$.

Окно визуализации полученной поверхности отклика интегрального показателя уровня ЭБ позволяет выявить зоны, характеризующие ее высокие ($I_{ЭБ} > 0,7$), средние ($0,5 < I_{ЭБ} < 0,7$) и низкие значения ($I_{ЭБ} < 0,5$). Более строгое графо-аналитическое исследование ее конфигурации и чувствительности к изменению входных переменных удобнее проводить в окне «Inference».

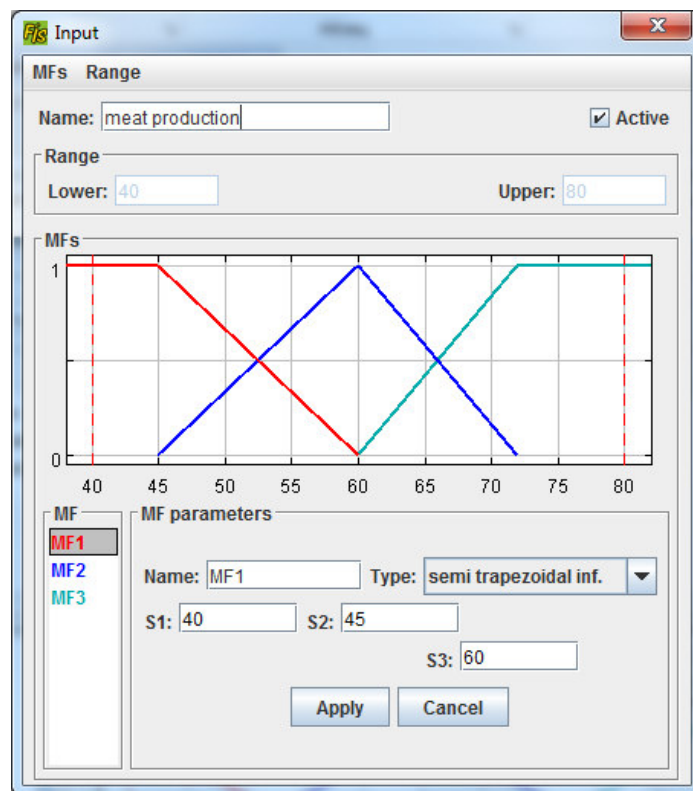


Рис. 3. – Конфигурация и параметры ФП входной переменной «meat prod» первого уровня

Значения интегрального и локальных по укрупненным группам (сферам) показателей ЭБ для условий Волгоградской области составили соответственно $Ind\ ES = 0,54$ при $Sph_1 = 0,51$; $Sph_2 = 0,78$; $Sph_3 = 0,52$.

Rules					
Rules Display					
Rule	Active	IF meat production	AND potato prod...	AND vegetable pr...	THEN production ...
1	☒	MF3	MF3		High
2	☒	MF3	MF2		High
3	☒	MF3	MF1		Middle
4	☒	MF3		MF1	Middle
5	☒	MF2			Middle
6	☒	MF1	MF3		Middle
7	☒	MF1	MF2		Low
8	☒	MF2	MF3	MF3	High

Рис. 4. – Фрагмент базы продукционных правил для выходной переменной первого уровня «ЭБ состояния почв»

Низкие значения уровней экологической безопасности укрупненной группы «Почва» (0,51) и «Вода» (0,52) обусловлены недостаточным экологическим уровнем, загрязненностью и запущенным состоянием (эрозией) части земель сельскохозяйственного назначения.

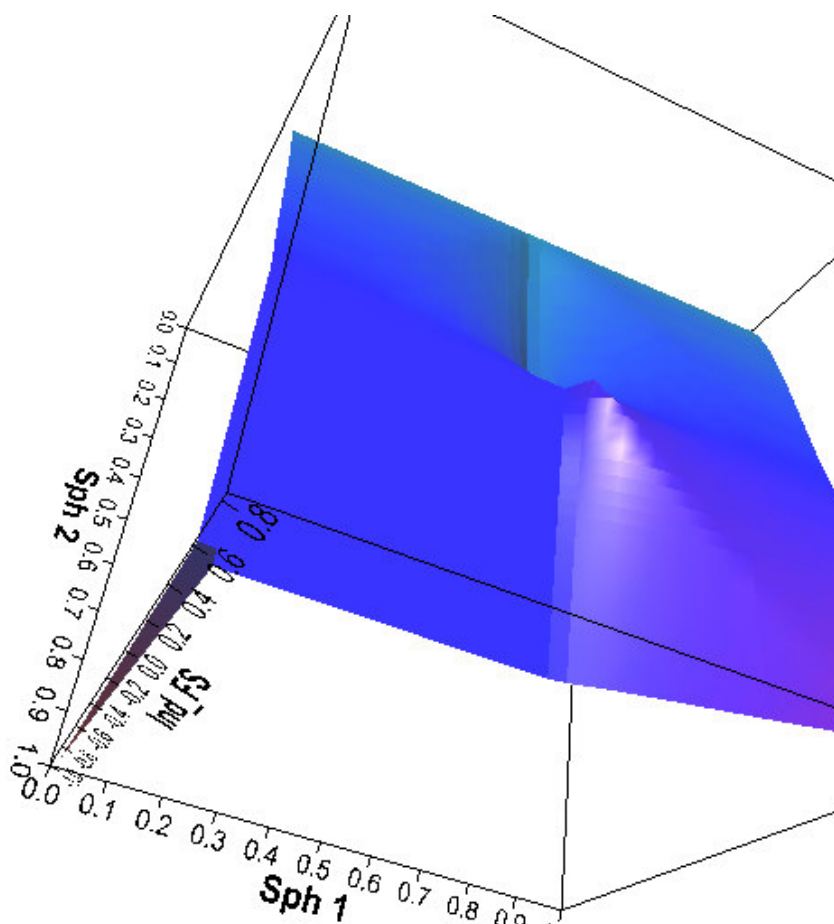


Рис. 5. – Поверхность отклика для выходной переменной второго уровня «Интегральный индекс ЭБ» в координатах укрупненных групп

Прежде всего это относится к отрасли животноводства и кормопроизводства, что определило относительно невысокий уровень интегрального показателя экологической безопасности региона (0,54) и выявило резервы (0,46) его повышения по группам и локальным показателям.

ВЫВОДЫ

Таким образом, обоснована система показателей экологической безопасности аграрного производства с учетом специфических угроз радиационного загрязнения, включающая укрупненные группы, а также характеризующие их локальные показатели для нечетко-множественного моделирования. Построенная на основе алгоритма нечеткого вывода Мамдани двухуровневая модель экологической безопасности, реализованная в среде «FisPro version 3.5», позволяет моделировать и оценивать влияние укрупненных групп системы экологических показателей на уровень экологической безопасности аграрного производства субъектов различного уровня в условиях специфических угроз загрязнения сельскохозяйственных земель. Приоритетным направлением улучшения экологической безопасности аграрного производства Волгоградской области может быть совершенствование культуры земледелия и, прежде всего, поддержание состояния почвенного покрова с учетом региональной системы сухого земледелия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента РФ от 12.05.2009 №537 (ред. от 01.07.2014) «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года» [Текст]. – М., 2009.
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 03.03.2012 № 297-р «Об утверждении Основ государственной политики использования земельного фонда Российской Федерации на 2012–2017 годы» [Текст]. – М., 2012.
3. Доклад о состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2010 году [Текст] / под ред. О.В. Горелова [и др.]. – М.: СМОТРИ, 2011. – 352 с.
4. Зеляковская, В.М. и др. Эколого-экономическое обоснование ущерба от потерь продуктивности сельскохозяйственных земель / В.М. Зеляковская и др. – Волгоград, Изд-во Волгогр. гос. ун-та, 1996. – 56 с.
5. Иванов, П.В. и др. Экономико-математическое моделирование в АПК / П.В. Иванов, И.В. Ткаченко. – Ростов н/Д : Феникс, 2013. – 254 с.
6. Исаев, И.В. и др. Проблемы ранжирования функциональных характеристик интерфейса системы поддержки принятия решений в сфере эколого-экономического менеджмента [Текст] / И.В. Исаев, А.Ф. Рогачев // Фундаментальные исследования. – 2015. – №9–3. – С. 560–564.
7. Орлинский, А.С. и др. Экохозяйственная сбалансированность и устойчивое развитие территорий. Подходы, методы, применение [Текст] / А.С. Орлинский, А.Д. Хаванский. – Саарбрюкен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 262 с.
8. Рогачев, А.Ф. Методические подходы к моделированию эколого-экономической безопасности [Текст] / А.Ф. Рогачев // Экономика и предпринимательство. – 2013. – №12–4(41-4). – С. 107–109.
9. Сельскохозяйственная экология / Под общ. ред. А.В. Голубева, Н.А. Мосиенко. Саратов: Саратов. гос. с.-х. акад., 1997. – 418 с.
10. Шаврак, Е.И. и др. Оценка экологической безопасности территории размещения Ростовской АЭС [Текст] / Е.И. Шаврак, М.В. Гуляев, В.М. Сапельников // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №3(8). – С. 19–25.
11. Skiter Natalia, Rogachev Aleksey F., Mazaeva Tamara I. Modeling Ecological Security of a State. Mediterian Journal of Social Science. 2015, Vol. 6 No. 3 S6 June 2015. pp. 192–195.
12. Rogachev A. Economic and Mathematical Modeling of Food Security Level in View of Import Substitution. Asian Social Science, 2015, Vol. 11, No. 20, pp. 178–184.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ukaz Prezidenta RF ot 12.05.2009 №537 (red. ot 01.07.2014) «O Strategii natsionalnoy bezopasnosti Rossiyskoy Federatsii do 2020 goda» [The decree of the Russian President of 12.05.2009 No. 537 (edition of 01.07.2014) "About Strategy of national security of the Russian Federation till 2020"]. M. 2009. (in Russian)
- [2] Rasporyazhenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 03.03.2012 № 297-r «Ob utverzhdenii Osnov

- gosudarstvennoy politiki ispolzovaniya zemelnogo fonda Rossiyskoy Federatsii na 2012–2017 gody» [The instruction of the Russian Federation Government of 03.03.2012 No. 297-r "About the statement of Bases of a state policy of use of land fund of the Russian Federation for 2012-2017"]. M. 2012. (in Russian)
- [3] Gorelova O.V. etc. Doklad o sostoyanii okruzhayushchey sredy Volgogradskoy oblasti v 2010 godu [The report on a state of Volgograd region environment in 2010]. M. Pub. SMOTRI, 2011. 352 p. (in Russian)
- [4] Zelyakovskaya V.M. etc. Ekologo-ekonomicheskoe obosnovanie ushcherba ot poter produktivnosti sel'skokhozyaystvennykh zemel. Volgograd [Ecological and economic justification of damage from losses of farmland productivity]. Pub. Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta [Publishing house of the Volgograd state university], 1996, ISBN 5-85534-069-4, 56 p. (in Russian)
- [5] Ivanov P.V., Tkachenko I.V. Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie v APK [Economic and mathematical simulation in agrarian and industrial complex]. Rostov-na-Donu [Rostov-in-Don]. Pub. Phenix, 2013, ISBN 978-5-222-21474-9, 254 p. (in Russian)
- [6] Isaev I.V., Rogachev A.F. Problemy ranzhirovaniya funktsionalnykh kharakteristik interfeysa sistemy podderzhki prinyatiya resheniy v sfere ekologo-ekonomicheskogo menedzhmenta [Problems of ranging of the functional characteristics of the interface of decision making support system in the sphere of ecological and economic management]. Fundamentalnye issledovaniya [Basic Research]. 2015, №9–3, ISSN 1812-7339, pp. 560–564. (in Russian)
- [7] Orlinskiy A.S., Khavanskiy A.D. Ekokhozyaystvennaya sbalansirovannost i ustoychivoe razvitie territoriy. Podkhody, metody, primeneniye [Ecoeconomic balance and sustainable development of the territories. Approaches, methods, application]. Saarbruken. Pub. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. ISBN 9783843309462, 262 p. (in Russian)
- [8] Rogachev A.F. Metodicheskie podkhody k modelirovaniyu ekologo-ekonomicheskoy bezopasnosti [Methodical approaches to simulation of ecological and economic safety]. Ekonomika i predprinimatelstvo [Economy and business]. 2013, №12–4(41-4), ISSN 1999-2300, pp. 107–109. (in Russian)
- [9] Selskokhozyaystvennaya ekologiya [Agricultural ecology]. Pod obshechey redaktsiei [Edited by] A.V. Golubeva, N.A. Mosienko. Saratov. Saratovskaya gosudarstvennaya selskokhozyaystvennaya akademiya [Saratov state agricultural academy], 1997, ISBN 5-704-0495-8, 418 p. (in Russian)
- [10] Shavrak E.I., Gulyaev M.V., Sapelnikov V.M. Otsenka ekologicheskoy bezopasnosti territorii razmeshcheniya Rostovskoy AES [Assessment of ecological safety of the territory of placement of the Rostov NPP]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety]. 2013, №3(8), ISSN 2305-414X, pp. 19–25. (in Russian)
- [11] Skiter Natalia, Rogachev Aleksey F., Mazaeva Tamara I. Modeling Ecological Security of a State. Mediterian Journal of Social Science. 2015, Vol. 6 No 3 S6 June 2015, ISSN 2039-9340, DOI: 10.5901/mjss.2015.v6n3s6p185, pp. 192–195. (in English)
- [12] Rogachev A. Economic and Mathematical Modeling of Food Security Level in View of Import Substitution. Asian Social Science, 2015, Vol. 11, No. 20, ISSN 1911-2017, DOI: 10.5539/ass.v11n20p178, pp. 178–184. (in English)

Indistinct and Multiple Simulation and Assessment of Farmland Ecological Safety in Case of Radiation Pollution

A.F. Rogachev*, E.V. Melikhova**

*Volgograd State Agricultural University,
26 Universitetskiy prospect, Volgograd, Volgograd region, Russia 400002
*e-mail: rafr@mail.ru ; **e-mail: mel-v07@mail.ru*

Abstract – BACKGROUND: Development of nuclear power engineering and its influence on all spheres of economy defines importance of reviewing of simulation questions and an assessment of ecological safety level taking into account specific threats for agricultural production within development of agricultural radio ecology. The significant amount of the local factors defining the overall level of ecological and radiation safety requires reasons for system of the modelled indices and tools of their aggregation.

OBJECTIVES: Development of mathematical apparatus and indistinct and multiple model for an integral assessment of agricultural production ecological safety in case of radiation pollution. It is necessary to solve the following problems:

–reasons for system of indices and their integrated groups for simulation of agricultural production ecological safety taking into account specific threats;

–to justify the structure and to realize indistinct and multiple model of ecological safety of regional agrarian production;

–to enable the computer realization of the developed system of an indistinct output with the help of which to reveal the priority directions of enhancement of agrarian production ecological safety of the region on the example of the Volgograd region.

METHODS: Research was conducted with use of freely extended software environment of "FisPro version 3.5", allowing to build the simulating systems of an indistinct logical output in the automated mode, and also statistical data under the terms of agrarian production in the conditions of the Volgograd region.

CONCLUSIONS:

1. The system of ecological safety indices of agrarian production taking into account specific threats of radiation pollution including the integrated groups, and also local indices characterizing them for indistinct and multiple simulation is justified.

2. The two-level model of ecological safety constructed on the basis of algorithm of an indistinct output by Mamdani realized in the environment "FisPro version 3.5" allows to simulate and estimate influence of the integrated groups of ecological indices system on the ecological safety level of agrarian production of different level subjects in the conditions of specific threats of farmland pollution.

3. Enhancement of the farming standard and, first of all, maintenance of soil cover taking into account regional system of dry agriculture can be the priority direction of improving of agrarian production ecological safety of the Volgograd region.

Keywords: mathematical simulation, ecological safety, radiation pollution, system of ecological indices, indistinct and multiple model, farmland state.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.039 : 502.51 : 626.882

**АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ПРОМЫВКИ
ФИЛЬТРУЮЩИХ ПОЛОТЕН РЫБОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ПРОМЫШЛЕННОЙ И
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

© 2016 В.Г. Ткачев, Л.В. Постой

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

Одним из аспектов обеспечения промышленной и экологической безопасности атомных электростанций является недопущение уменьшения объема подаваемой технической воды, поступающей для охлаждения оборудования или превышения в ней концентрации загрязняющих элементов. Снижение количества поступающей воды может быть вызвано уменьшением фильтрационной способности водозаборных устройств, ухудшение ее качества возникает в результате загрязнения биологическими организмами (засорение водорослями, останками рыб). В настоящее время широкое распространение нашли рыбозащитные устройства РЗУ с фильтрующими элементами, которые являются непреодолимым препятствием для молоди рыб и предотвращают ее попадание в систему охлаждения.

В статье проведен анализ научных работ, посвященных исследованию способов промывки фильтрующих полотен рыбозащитных устройств, существующих теоретических методов расчета параметров плоских турбулентных струй, формирующихся вблизи водонепроницаемого экрана.

Выводы:

1. Метод расчета параметров осесимметричной затопленной турбулентной струи, формирующейся вблизи фильтрующей поверхности (водонепроницаемого экрана), не найден.
2. Существующие теоретические методы расчета параметров плоских турбулентных струй, формирующихся вблизи водонепроницаемого экрана, а также ряд положения теории турбулентных струй и методов расчета струй в сносимом потоке могут быть использованы при разработке методики расчета осесимметричной струи, развивающейся вблизи фильтрующей поверхности.
3. В ортогональных координатах связанных с осью струи, параметры струи на участке свободного развития сопоставимы с параметрами обычной затопленной струи.
4. Характеристики затопленной осесимметричной струи на участке свободного ее развития вблизи фильтрующей поверхности (экрана) могут быть определены.
5. Профили скорости в поперечных сечениях свободных водообменных слоев струи можно считать подобными, для их описания возможно использование зависимости с уточненным показателем степени.

Результаты исследований могут представлять интерес при оборудовании водозаборов атомных электростанций специальными рыбозащитными сооружениями.

Ключевые слова: экология, атомные электростанции, рыбозащитные устройства, фильтрующие полотна, флейты, водозаборные сооружения, способы промывки, осесимметричные струи, газонасыщение струи.

Поступила в редакцию 10.03.2016 г.

В настоящее время все более актуальными становятся вопросы обеспечения промышленной и экологической безопасности атомных электростанций, связанные с

возникновением нештатных ситуаций вследствие уменьшения объема технической воды, необходимой для охлаждения оборудования (реактора) атомной электростанции или ее интенсивного загрязнения. Если снижение количества поступающей воды в большей степени связано с уменьшением фильтрационной способности водозаборных устройств, то ухудшение ее качества возникает вследствие загрязнения биологическими организмами. Основным экологическим аспектом нарушения биологического равновесия в окружающей среде является сокращение популяции рыб ценных пород в природных водоемах-охладителях вследствие их массовой гибели в подводящих и отводящих каналах атомных электростанций. [1]

Отсутствие нормативной документации в строительстве препятствует оборудованию водозаборов АЭС на водных объектах специальными рыбозащитными сооружениями. В связи с этим наиболее значимым становится применение специализированного оборудования. В данной работе рассматриваются возможные варианты использования в качестве РЗУ с промывающими рыбозащитными полотнами (флейтами), которые обладают более высокой сберегающей способностью молоди рыб и менее трудозатратными в обслуживании. [2]

Впервые принципы рыбозащиты были описаны в семидесятые годы в монографии Д.С. Павлова, А.М. Пахорукова «Биологические основы защиты рыб от попадания в водозаборные сооружения», однако разработанные рекомендации по охране мигрирующей и туводной молоди рыб не приемлемы для водозаборных сооружений АЭС. В настоящее время широкое распространение нашли рыбозащитные устройства РЗУ с фильтрующими элементами, которые являются непреодолимым препятствием для молоди рыб. Обзор таких конструкций РЗУ представлен в работах В.С. Лапшенкова (1989 г.), П.А.Михеева (1994 г.) и др.. [3]

Наиболее удобным и распространенным фильтрующим элементом является фильтрующее полотно (ФП), которое может быть выполнено в виде сетки или перфорированной поверхности. Опыт эксплуатации РЗУ, в состав которых входит в качестве рыбозаграждающего элемента ФП, позволяет выделить ряд причин, снижающих эффективность работы сооружения. К ним следует отнести:

- недостаточно эффективный способ очистки ФП;
- отсутствие надежного механизма отвода молоди рыб и мусора от внешней (напорной) стороны ФП;
- неоптимальные режим работы и характеристики промывного устройства;
- неравномерность промывки фильтрующих полотен.

В результате анализа механизма работы РЗУ можно выделить следующие основные способы промывки ФП:

- течением в водоеме;
- гидравлическими или водо-воздушными струями;
- различными механическими приспособлениями.

Если для промывки используется энергия движения воды в водоеме, то ФП, как правило, приводится в движение, либо предусматриваются специальные конструктивные элементы, обеспечивающие периодическое возникновение противотока через фильтрующее полотно (Михеев П.А. 1994 г.). В том случае, когда последнее неподвижно, промывки обычно осуществляется струйными ПУ (Шкура В.Н., Михеев П.А. 1996 г.). Как правило, промывка ФП осуществляется гидравлическими струями, направленными нормально к поверхности полотна или под некоторым углом с противоположной (безнапорной) стороны. Очищение полотна осуществляется за счет гидродинамического воздействия струи на мусор и молодь рыб. Получив импульс, частицы удаляются от ФП, преодолевая скорость течения в потоке. Для очистки больших площадей ФП используют многосопловые аппараты, которые

представляют собой отрезок трубы с отверстиями (соплами) вдоль длины, устроенными с определенным шагом и диаметром. Основным недостатком таких конструкций является наличие повторного оседания смытых частиц мусора и МР на ФП, если не осуществлена организация мусорорыбоотвода (МРО).

В работах Ефремкина Л.В., Чистякова А.А. 1988, 1989 гг., предлагается использовать ПУ с водо-воздушными струями (ВВС). Проведенные эксперименты убедительно свидетельствуют о преимуществе ВВС перед гидравлическими при промывке ФП. За счет эффекта дилатации пузырьки воздуха увлекают к поверхности водного потока смытые с поверхности ФП частицы мусора и МР, что в некоторых случаях упрощает процесс их отвода. Помимо этого, ВВС оказывают на рыб отпугивающие действия за счет звуковых и динамических колебаний.

К недостаткам этого устройства следует отнести:

- сложность конструкции струеформирующего насадка, требующая достаточной точности изготовления (например, нарушение соосности отверстий может привести к выходу из строя установки);
- для организации процесса мусорорыбоотвода требуются дополнительные мероприятия;
- газонасыщенность ВВС зависит от глубины погружения насадки, что определяет неравномерность газонасыщения струи в вертикальных многосопловых промывных устройствах.

К следующей группе РЗУ следует отнести устройства, ФП которых очищается гидравлическими осесимметричными струями, которые формируются вблизи внешней поверхности фильтрующего экрана. К таким устройствам относятся рыбозащитный оголовок с потокообразователем, разработанный Волгоградским отделом НИС Гидропроекта и усовершенствованная конструкция РОП-Ж, разработанная в отраслевой лаборатории НИМИ (Михеев П.А. 1994 г.).

Следует отметить, что данные конструкции, согласно исследованиям на водозаборах рек Волга и Дон, обеспечивают достаточно надежную промывку ФП, выполненного из перфорированного экрана, мусорорыбоотвода. Наряду с рыбоотводящими функциями, гидравлические струи являются составной частью механизма защиты МР оголовком. К недостаткам этих устройств следует отнести сравнительно малую пропускную способность.

Анализируя методы расчета затопленных турбулентных струй, формирующихся вблизи экрана, установили, что основными закономерностями изменения параметров, определяющих явления, считаются:

- геометрические границы, за пределами которых отсутствуют промывные качества струи;
- продольные и поперечные скорости течения внутри струи и в ее окрестности, которые характеризуются скоростью на динамической оси и их распределением в пределах границ струи, а также скоростями инжектируемых в струю вторичных течений, возникающих во внешней среде.

Струя, формирующаяся вблизи экрана, принадлежит к разряду сложных пространственных течений. Задача определения параметров такой струи в гидродинамической постановке фактически еще не решена. Искривление траектории струи происходит под действием перепада давления, которое возникает между областями потенциального движения среды, расположенными в свободной части пространства и в той части, которая ограничена экраном. Это явление связано с наличием потенциального течения вне струи, которая сопутствует распространению турбулентных струй. Наличие экрана приводит к увеличению линейного масштаба, характеризующего затухание струи. Это связано с тем, что распространение струи

вблизи экрана в определенной степени аналогично распространению двух струй, удаленных друг от друга на удвоенное значение высоты над экраном. При их слиянии получилась бы струя, эквивалентная струе, распространяющейся из сопла удвоенного размера. Но при распространении струи вблизи экрана не происходит удвоения характерного размера из-за потери импульса вследствие влияния пограничных слоев, работы сил давления и т.п. (Абрамович Г.Н. 1984 г.).

Помимо развития свободной струи вблизи экрана интерес представляет струя, формирующаяся при распространении ее над уступом. В случае осесимметричного течения такая картина возникает при распространении струи из двухконтурного соплового устройства, когда струя наружного контура имеет существенно большую скорость истечения, чем струя внутреннего контура. В этих случаях имеет место образование циркуляционной зоны и значительного разряжения. Наличие этого явления отличает рассматриваемое течение от предыдущего, где изучалось искривление траектории струи под действием слабого перепада давления при распространении свободной струи вблизи экрана.

Одной из основных задач является определение разряжения под струей на торце, знать которое необходимо для вычисления полного импульса струи. Расчет ведется для основного участка струи, параметры которой могут быть вычислены по значениям потоков импульса, расходу в струе и т.д. Для вычисления потока импульса необходимо, наряду с распределением скорости, знать распределение давления. Недостатком материалов, изложенных в указанных работах, является ограниченность данных о распределении давления в приторцевой зоне. Приведенный в названных работах теоретический анализ позволяет приближенно описать характеристики течения. Помимо этого, для адекватного согласия с экспериментом требуется вводить зависимость характеристик турбулентности от геометрических параметров течения.

Как показывают многочисленные опыты одним из основных свойств такой струи, является постоянство статического давления во всей области течения. Часть струи, в которой имеется потенциальное ядро, называется начальным участком. Скорость в потенциальном ядре остается постоянной. Как показывает опыт, ядро ограничено с боков практически прямыми линиями, отделяющими его от турбулентного струйного пограничного слоя. Участок струи, на котором течение приобретает такой же вид, как при истечении из линейного или точечного источника, называется основным участком. На переходном участке завершается формирование аффинных поперечных профилей скорости.

Дальнейшее изучение поведения струи способствует рассмотрению этого вопроса совместно с теорией турбулентности жидкости. Таких основных теорий существует две. Каждая из теорий базируется на той или иной гипотезе процесса турбулентного обмена и устанавливает связь между турбулентными касательными напряжениями и градиентом осредненной скорости. На основании этих теорий разработаны автомодельные решения, позволяющие получить результаты, близкие к опытным данным.

Особое значение имеют геометрические размеры струи и форма внешней ее поверхности для конкретных условий решаемой задачи, хотя такие исследователи, как Павловский В.А., Шкура В.Н., Михеев П.А., Абрамович Г.Н. и т.д., высказывают противоречивые суждения по данной проблеме. В работе Боровской В.П. осуществлена попытка расчета плоской турбулентной струи аналитическими методами, опираясь на полуэмпирическую теорию турбулентности Прандля или теорию пути перемешивания и теорию турбулентных струй.

Как уже отмечалось выше, турбулентная струя, распространяющаяся вблизи экрана, отклоняется в сторону экрана.

Некоторые уточнения и расчет основных параметров осесимметричной струи в сносящем потоке были осуществлены в работах Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А. В них содержится решение для основного участка струи, вытекающей из бесконечно узкой щели под углом к безграничному потоку. В этих работах использовались следующие принципы:

- для течения в искривленной струе, в ортогональных координатах, связанных с ее осью, справедливы уравнения пограничного слоя теории турбулентных струй;
- граничные условия могут задаваться приближенно, и обтекание струи сносящим потоком может рассматриваться как обтекание криволинейной стенки.

В работах Гиршович Т.А. была сделана попытка учета разрежения за струей. Оно вводилось в решение как дополнительная эмпирическая постоянная. В результате согласования расчетной траектории струи с опытом улучшилось. Позже в работе (Абрамович Г.Н.) разрежение за струей в поперечном потоке определяется уже теоретически. Для этого использовались условия сохранения количества движения и поперечного равновесия на срезе сопла.

Некоторое уточнение характеристик плоской струи в рамках описанных выше методик было сделано в работах Бруяцкого Е.В., Купеса В.Б. и Ярина А.П. Следует отметить, что рассмотренные теоретические зависимости для расчета траектории струи преследуют цель, как правило, определить глубину проникновения струи в сносящий поток. Этим объясняется недостаточно корректное аппроксимирование нижней части струи на участке с отрывом.

Построенные траектории струй имеют вид плавно удаляющихся от боковой поверхности (экрана) кривых вниз по течению.

Согласование с экспериментальными данными оценивалось только на участке струи с наиболее сильным ее искривлением. Помимо этого, исследование концевой части затухающей струи связано с определенными трудностями из-за заметного ухудшения ее обзорности (Прудников А.Г., Сагалович В.Н.). Однако, это замечание в большей степени справедливо для поперечных струй. В этих случаях затухание струи может наступить непосредственно на участке с отрывом. С уменьшением угла наклона струи к основному потоку величина застойной области уменьшается (Гиршович Т.А.) и активная часть струи может выходить за пределы участка с отрывом. Очевидно, что при некотором малом угле сопряжения отрыв струи от экрана не будет происходить. Это подтверждается результатами исследований в работах (Боровской В.П.). Так для плановой плоской струи «налипание» струи к боковой стенке (экрану) наблюдалось при углах сопряжения меньше $1/10$ даже при отсутствии спутного течения. Очевидно, что для осесимметричной струи это значение угла будет меньше, так как погашение разрежения вблизи экрана будет более интенсивным за счет подтекания жидкости из внешней среды, в обход тела струи, в область с пониженным давлением.

Выполненный обзор и анализ научных работ по данной теме позволяет сделать следующие выводы:

- метод расчета параметров осесимметричной затопленной турбулентной струи, формирующейся вблизи фильтрующей поверхности (водопроницаемого экрана), не найден;
- существующие теоретические методы расчета параметров плоских турбулентных струй, формирующихся вблизи водонепроницаемого экрана, а также ряд положения теории турбулентных струй и методов расчета струй в сносящем потоке могут быть использованы при разработке методики расчета осесимметричной струи, развивающейся вблизи фильтрующей поверхности;
- в ортогональных координатах связанных с осью струи, параметры струи на участке свободного развития сопоставимы с параметрами обычной затопленной струи;

- характеристики затопленной осесимметричной струи на участке свободного ее развития вблизи фильтрующей поверхности (экрана) могут быть определены;
- профили скорости в поперечных сечениях свободных водообменных слоев струи можно считать подобными, для их описания возможно использование зависимости с уточненным показателем степени.

Все это приводит нас к заключению, что:

Промывное устройство РЗУ является одним из наиболее важных элементов РЗУ, посредством которого обеспечивается промывка фильтрующего элемента с последующей организацией мусорорыбоотвода за пределы зоны влияния устройства.

Несмотря на большое количество построенных РЗУ, вопросы рациональной организации промывки ФП изучены недостаточно. В частности, отсутствуют рекомендации по проектированию устройств, обеспечивающих промывку ФП с его внешней (напорной) стороны, которые являются наиболее удобными для организации управления процессом мусорорыбоотвода.

Для повышения эффективности промывки ФП в конкретных случаях целесообразно использовать промывное устройство с водовоздушными струями.

Имеющиеся в настоящее время методики построения объемного поля скоростей для затопленной струи, формирующейся вблизи экрана, не позволяют с достаточной степенью точности определить геометрические и скоростные характеристики осесимметричной струи, распространяющейся вблизи водопроницаемого экрана (ФП).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бахарев, С.А. Обеспечение промышленной и экологической безопасности объектов энергетического комплекса [Текст] / С.А. Бахарев. – Германия: Изд-во "LAP LAMBERT Academic Publishing", 2012. – 375 с.
2. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения: СНиП 2.06.07-87 СП 101.13330.2012. / [Текст]. – М.: Стройиздат, 2012.
3. Павлов, Д.С. и др. Биологические основы защиты рыб от попадания в водозаборные сооружения [Текст] / Д.С. Павлов, А.М. Пахоруков. – М.: Издательство «Пищевая промышленность», 1973. – 208 с.
4. О животном мире: Федеральный закон от 24.04.1995 №52-ФЗ (ред. от 13.07.2015) (с изменениями на 15 июля 2015 года) Статья 22. / [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6542/ – 10.03.2016.
5. Орлова, З.П. Рыбохозяйственная гидротехника [Текст] / З. П. Орлова. – М., 1988. – 279 с.
6. Малеванчик, Б.С. и др. Рыбопропускные и рыбозащитные сооружения [Текст] / Б.С. Малеванчик, И.В. Никоноров. – М., 1984. – 150 с.

REFERENCES

- [1] Bakharev S.A. Obespechenie promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti ob'ektov energeticheskogo kompleksa [Providing industrial and environmental safety of the energy complex]. Germaniya [Germany]: Pub. "LAP LAMBERT Academic Publishing", 2012, 375 p. (in Russian)
- [2] Podpornye steny, sudokhodnye shlyuzy, rybopropusknye i rybozashchitnye sooruzheniya: SNiP 2.06.07-87 SP 101.13330.2012 [Retaining walls, navigation locks, fish-and fish protection facilities: SN 2.06.07-87 JV 101.13330.2012.]. M. Pub. Stroyizdat [Stroyizdat], 2012. (in Russian)
- [3] Pavlov D.S., Pakhorukov A.M. Biologicheskie osnovy zashchity ryb ot popadaniya v vodozabornye sooruzheniya [Biological basis of protecting the fish from falling into the water intake facilities]. M. Pub. «Pishchevaya promyshlennost» ["Food processing industry"], 1973, 208 p. (in Russian)
- [4] O zhivotnom mire: Federalnyy zakon ot 24.04.1995 №52-FZ (red. ot 13.07.2015) (s izmeneniyami na 15 iyulya 2015 goda) Statya 22. [Animal world: the Federal law from 24.04.1995 №52-FZ (amended on 13.07.2015.) (amended July 15, 2015) Article 22]. 2015. Avaliable at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_6542/ (in Russian)
- [5] Orlova Z.P. Rybokhozyaystvennaya gidrotehnika [Fishery hydro equipment]. M. 1988. 279 p. (in Russian)

[6] Malevanchik B.S., Nikonorov I.V. Rybopropusknye i rybozashchitnye sooruzheniya [Fish ladders and fish protection facilities]. M. 1984. 150 p. (in Russian)

The Analysis of Existing Methods for Washing the Filter Cloths of the Fish Protection Devices, Designed to Ensure Industrial and Environmental Safety of Nuclear Power Plants

V.G. Tkachev, L.V. Postoj

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

** e-mail: VGTkachev@mephi.ru ; ** e-mail: LVPostoj@mephi.ru*

Abstract – One of the aspects of ensuring industrial and environmental safety of nuclear power plants is the prevention of reduction of volume of industrial water supplied for cooling of equipment or exceeding the concentration of pollutants. Reducing the amount of incoming water can be caused by a decrease in the filtration capacity of the intake device, the quality degradation occurs as a result of contamination by biological organisms (clogging algae, remains of fish). At present, widely found FPS fish protection device with filter elements, which are an insurmountable obstacle for young fish and prevent it from entering the cooling system.

The article analyzes the scientific papers on the study of ways to wash the filter cloths of fish protection devices, the existing theoretical methods for calculating the parameters of plane turbulent jets formed near the waterproof screen.

Conclusions:

1. Method of parameter calculation of submerged turbulent axisymmetric jets formed near the filter surface (permeable screen) was not found.
2. Existing theoretical methods of parameter calculation of planar turbulent jets, emerging close to waterproof screen, and some of the theory of turbulent jets and methods for calculating jets in a drifting thread can be used in the development of methods of calculation of axisymmetric jet developing near the filter surface.
3. Jet parameters in the free development of the site are comparable with the parameters of a conventional submerged jet in the orthogonal coordinates associated with the jet axis.
4. Characteristics of a submerged axisymmetric jet on the site free of development near the filtering surface (screen) can be determined.
5. Velocity profiles in cross sections of free jet water-exchange layers can be similar, dependence with the refined exponent can be used for their description.

The research results can be important in the equipment of nuclear power plant intakes with special fish protection structures.

Keywords: ecology, nuclear power plant, fish protection device, filter cloth, flutes, intake structures, methods of washing, axisymmetric jet, gassing jets.

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

УДК 004.414.2

**ПРЕДПРОЕКТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ
АТОМНЫХ СТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ¹**

© 2016 А.Е. Колоденкова

Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

В статье подчеркивается, что для обеспечения безопасности и функционирования информационно-управляющих систем для атомных станций (ИУС АС) в процессе эксплуатации необходимо на ранних этапах создания систем проводить предпроектные исследования. Предлагается структурная схема системы управления процессом предпроектных исследований. Рассматривается когнитивный подход для моделирования безопасности функционирования ИУС АС. Приведены результаты импульсного моделирования сценариев возможного развития ситуации при создании ИУС АС.

Ключевые слова: предпроектные исследования, системный подход, знаковый ориентированный граф, безопасность, АЭС.

Поступила в редакцию 25.01.2016 г.

В современном мире существует большое количество отраслей промышленности, обладающих своей спецификой, возможными проблемами и перспективами развития. Однако атомная отрасль является одной из самых ключевых и стратегически важных отраслей отечественной экономики, требующая создания и внедрения новых сложных ИУС, назначением которых в процессе эксплуатации является автоматизированный контроль и управление основными и вспомогательными технологическими процессами, к которым предъявляются чрезвычайно жесткие как российские, так и международные нормы и требования по безопасности и эффективности их функционирования [1-3].

В связи с этим необходимо на начальных этапах жизненного цикла (ЖЦ) ИУС АС проводить предпроектные исследования, и, в частности, оценку реализуемости проекта ИУС АС в условиях неопределенности для безопасности ИУС.

**1. ПРЕДПРОЕКТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ – КЛЮЧ К БЕЗОПАСНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИУС АС**

При создании ИУС важных для безопасности АС, большую роль играют предпроектные исследования, направленные на выявление возможных слабых мест в проекте при создании; на недопущение его провала; на перспективные управленческие решения по улучшению ИУС в трудно формализуемых условиях; на гарантированные достижения выполнения всех требований технического задания (ТЗ) и контракта [4].

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-06129.

Предпроектные исследования заключаются в изучении предметной области, в сборе информации о предстоящем создании ИУС, в оценке реализуемости проекта по созданию ИУС с учетом имеющихся ресурсов (материальных, финансовых, трудовых и др.), а также в выработке рекомендаций для принятия управленческих решений руководителем проекта.

Необходимость данных исследований обусловлена тем, что созданная ИУС без предпроектных исследований может привести к ситуации, когда на этапе эксплуатации придется столкнуться с тем, что поведение системы не будет отвечать заявленным целям и требованиям к ИУС, что в свою очередь приведет к необходимости срочной адаптации уже внедренной ИУС.

На рисунке 1 представлена обобщенная схема процесса предпроектных исследований по созданию ИУС АС, состоящего из четырех этапов. Особое внимание уделено этапу «Анализ реализуемости проекта ИУС», поскольку именно он позволяет спрогнозировать успешность проекта по созданию ИУС еще на раннем этапе ЖЦ ИУС, т.е. выбрать наиболее приемлемый вариант создания ИУС, удовлетворяющий требованиям заказчика и имеющимся ресурсам (материальных, финансовых, трудовых).

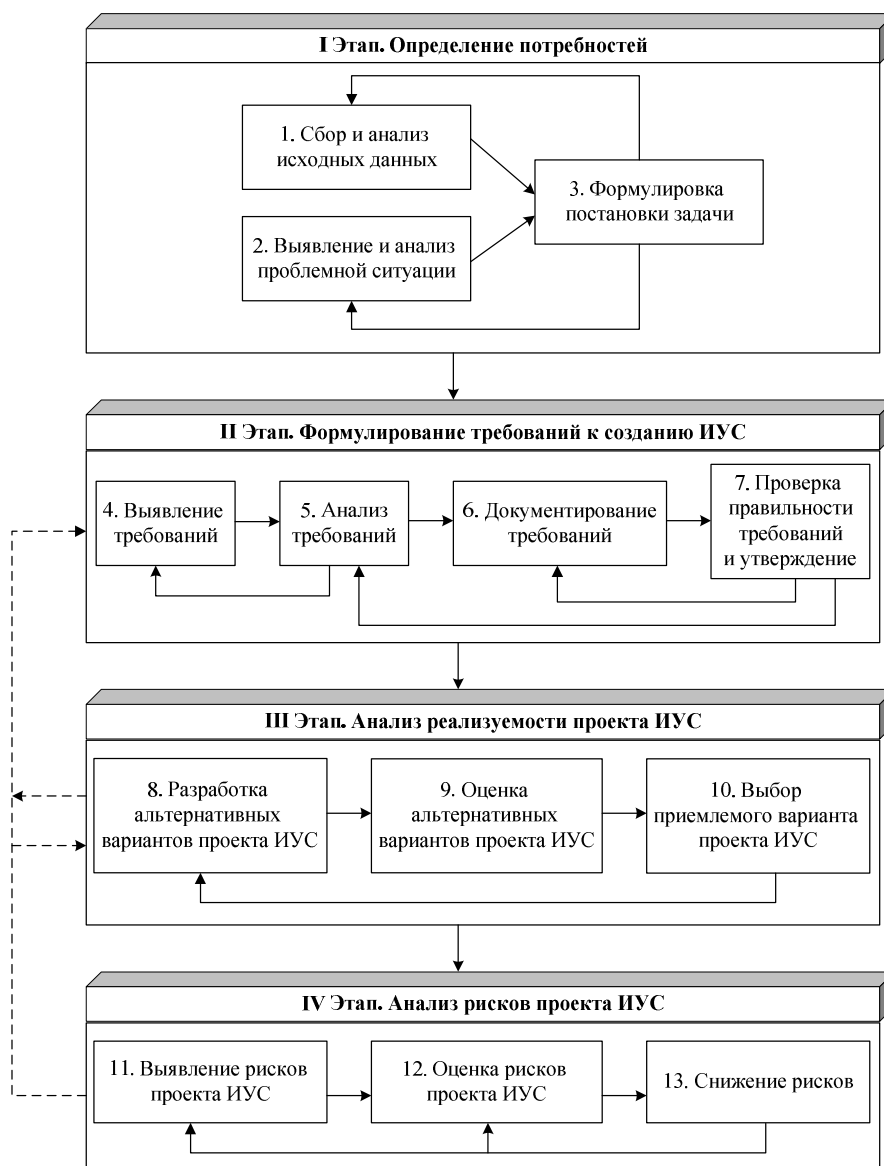


Рис. 1. – Обобщенная схема процесса предпроектных исследований по созданию ИУС АС

Под оценкой реализуемости проекта ИУС понимается наличие необходимых ресурсов для осуществления и условий для реализации проекта.

На рисунке 2 представлена обобщенная схема анализа реализуемости проекта ИУС АС. База данных содержит всю необходимую информацию о предпроектном исследовании по созданию ИУС, в результате чего осуществляется доступ к информации, необходимой руководителям проекта для принятия решений.

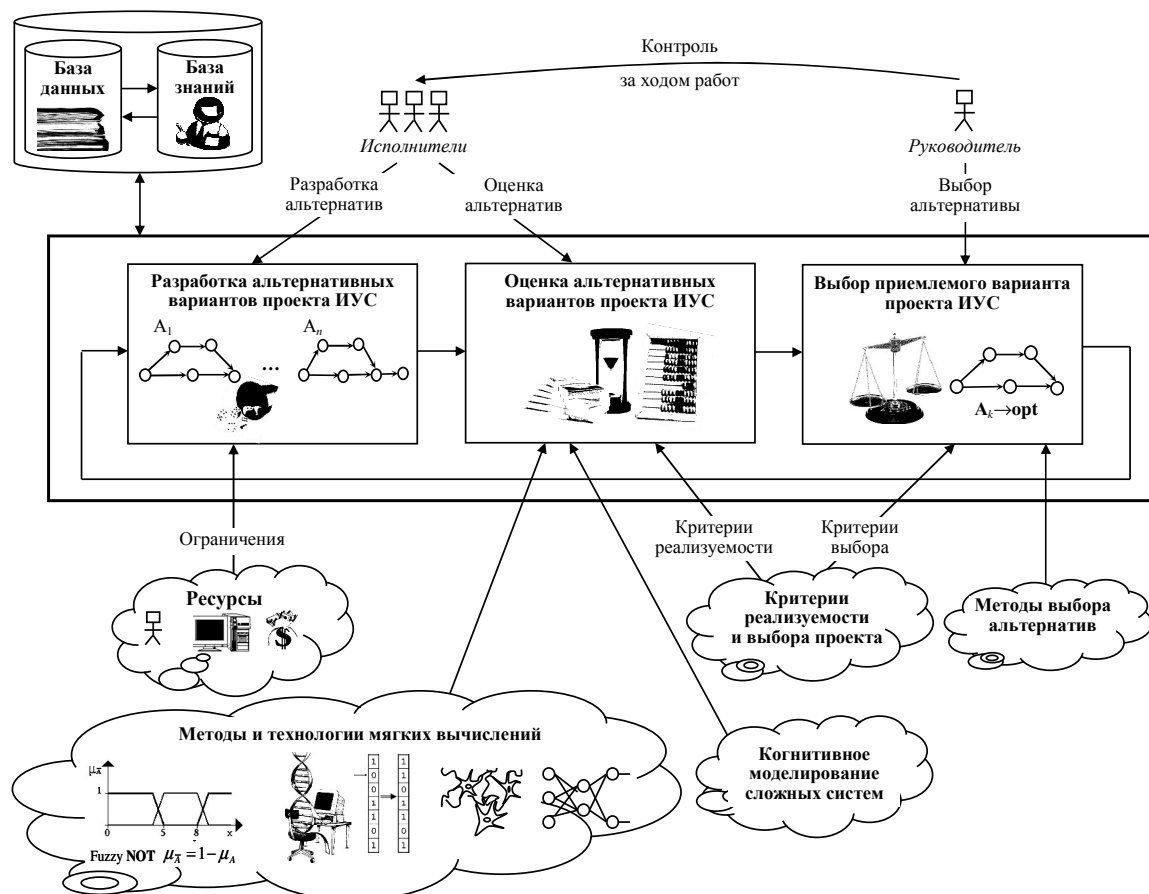


Рис. 2. – Обобщенная схема анализа реализуемости проекта ИУС АС

Знания, используемые при предпроектных исследованиях, получаются от исполнителей в специальной формализованной форме (например, в виде правил), которые в совокупности создают базу знаний.

2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ПРОЦЕССОМ ПРЕДПРОЕКТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ ИУС АС

В целях выявления на начальных этапах ЖЦ ИУС АС возможных слабых мест в проекте при создании ИУС, недопущения провала проекта и гарантированного достижения выполнения всех требований заказчика, возрастает необходимость в применении системного подхода к управлению процессом предпроектных исследований по созданию ИУС.

На рисунке 3 представлена структурная схема системы управления процессом предпроектных исследований по созданию ИУС АС с учетом наличия требований заказчика.

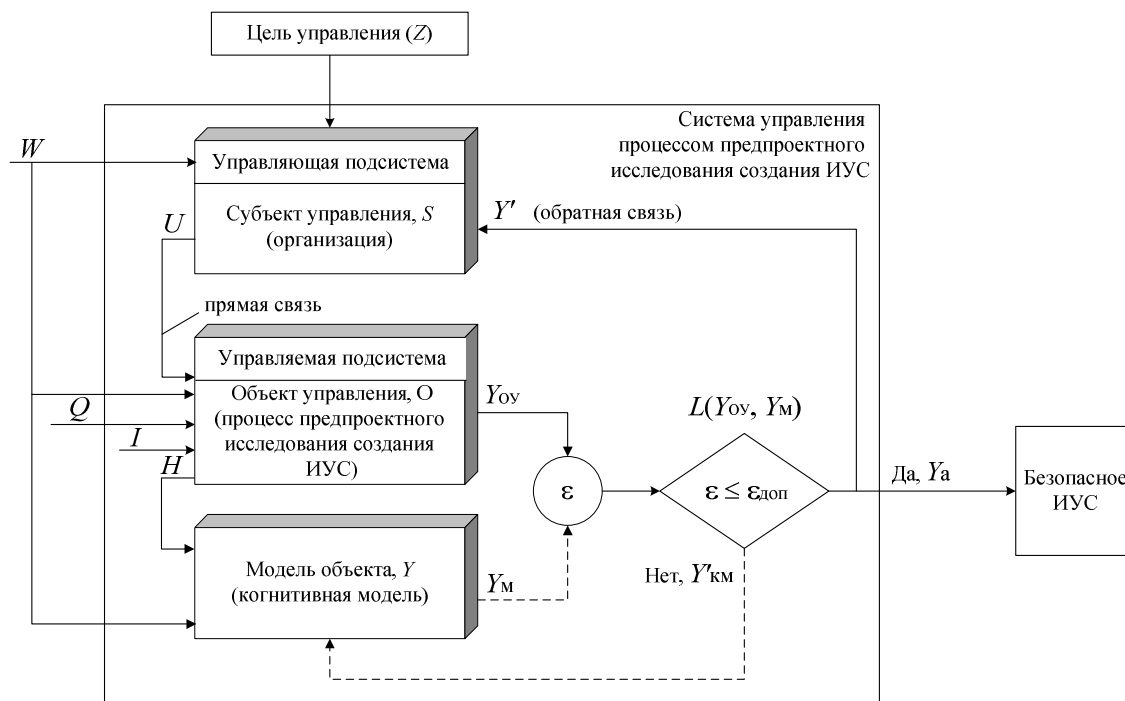


Рис. 3. – Структурная схема системы управления процессом предпроектных исследований по созданию ИУС АС

С точки зрения системного подхода систему управления процессом предпроектных исследований по созданию ИУС предлагается разделить на следующие укрупненные элементы:

- 1) управляющую подсистему (субъект управления, S);
- 2) управляемую подсистему (объект управления, O);
- 3) модель объекта (когнитивная модель, Y).

Под *управляющей подсистемой* рассматривается организация, в которой разрабатывается ИУС и которая осуществляет управляющие воздействия на объект управления, направленные на обеспечение организации и координации разработки и выполнения ИУС на всех этапах разработки в соответствии с ЖЦ ИУС.

В качестве *управляемой подсистемы* рассматривается совокупность объектов управления (исполнители, а также процесс предпроектного исследования, протекающий на предприятии и в его подразделениях), на которые направлены управленческие воздействия. Под *объектом* понимается объект, имеющий сложную архитектуру с множеством взаимосвязей.

Под *моделью объекта* понимается разработка когнитивных моделей безопасности функционирования ИУС, построенные с помощью процедур когнитивного моделирования.

На схеме: W – внешняя информация, т.е. информация поступающая из внешней среды и объединяющая все то, что непосредственно не входит в систему (заказчик, Ростехнадзор, эксплуатирующая организация, соисполнители, нормативные документы (МАГАТЭ, ISO, МЭК, ГОСТ); Q – ресурсы (материальные, финансовые, трудовые), поступающие в объект управления, необходимые для выполнения работ; I – внутренняя информация, поступающая в объект управления (например, квалификация исполнителей, производительность исполнителей, объем работ) и используемая как первичная информация для реализации задач управления; H – внутренняя информация,

поступающая от объекта управления к модели объекта в режиме реального времени, необходимая для построения когнитивных моделей; U – управляющее воздействие (управляющая информация, принятие управленческих решений, команды управления) (прямая связь); Y_{OY} – выходная информация (фактические данные, параметры, показатели), характеризующая состояние объекта управления; Y_m – выходные параметры модели (желаемые, ожидаемые параметры); ε – ошибка (рассогласование); $\varepsilon_{\text{доп}}$ – дополнительное (фиксированное, предельное) заданное значение; $L(Y_{OY}, Y_m)$ – проверка соответствия данных, полученных на основе модели, реальному объекту, для описания которого она строится; Y' – информация о состоянии объекта (внесение каких-либо изменений в модель) (обратная связь); $Y'_{\text{км}}$ – корректировка модели (корректировка параметров); Y_a – выход – адекватная модель объекта управления, т.е. отвечает требованиям заказчика и контракта, особенно в части надежности и безопасности ИУС.

Субъект управления на основе информации, поступившей из внешней среды W , и располагая целью управления, требованиями к созданию ИУС и регламентом от заказчика, вырабатывает управляющее воздействие U .

Ресурсы Q , внутренняя информация I , а также принятие управленческих решений U дает управляющую информацию, которая доводится до исполнителей (управляемая подсистема) в форме планов, заданий, нормативов и т.д., и является для них импульсом к целенаправленным и скоординированным действиям по созданию ИУС.

Для синтеза системы управления на основе W , Q , I разрабатываются модели объекта управления с использованием когнитивного моделирования, позволяющего предсказывать поведение объекта, отражать проблемы системы в упрощенном виде (в модели), исследовать и анализировать возможные сценарии возникновения аварийных ситуаций при создании ИУС, а также находить пути их разрешения в модельной ситуации.

Если фактические результаты, характеризующие состояние объекта управления Y_{OY} не отвечают ожидаемым Y_m , т.е. выходит за установленные пределы (условие $\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{доп}}$ не выполняется), то управляющая подсистема вносит коррективы в модель объекта $Y_{\text{км}}$. Если же условие $\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{доп}}$ выполняется, то модель объекта управления считается адекватной Y_a . В результате адекватной модели предоставляется возможность безошибочного предсказания поведения объекта тем самым достичь высокой надежности и функциональной безопасности ИУС при создании.

Отметим, что управление реализуется с использованием принципа *обратной связи* Y' . Субъект управления воспринимает информацию (внесение каких-либо изменений в модель) от объекта управления Y' и информацию о внешней среде W , обрабатывает ее, сопоставляет ее с желаемыми характеристиками объекта управления и на ее основании принимает новое решение и вырабатывает следующее управляющее воздействие U . И так далее.

В общем виде система управления процессом предпроектных исследований по созданию ИУС ($S_{\text{упр}}$) может быть представлена в виде кортежа:

$$S_{\text{упр}} = \langle S, O, Y, Z, W, Q, Y_a, D \rangle,$$

где Z – цель управления;

$D = \langle I, H, U, Y_{OY}, Y_m, Y', Y'_{\text{км}} \rangle$ – внутренняя среда системы управления $S_{\text{упр}}$;

$Y = \langle W, H, Y_m \rangle$ – модель объекта, результатом Y_m которого является четкая либо нечеткая когнитивная модель, представленная в виде параметрического векторного функционального графа.

$$Y_M = \langle \langle V, E \rangle, X, F, \theta \rangle,$$

где $G = \langle V, E \rangle$ – знаковый ориентированный граф;

V – вершины графа, $V = \{v_i\}$, $v_i \in V$, $i = \overline{1, k}$ (k – количество вершин);

E – дуги графа, $E = \{e_i\}$, $e_i \in E$, $i = \overline{1, k}$, отражающие влияние вершины v_i на вершину v_j (сплошные линии и символ «+1» обозначают положительную связь между вершинами v_i и v_j , т.е. увеличение (уменьшение) влияния вершины v_i вызывает увеличение (уменьшение) в вершине v_j , штрихпунктирные линии и символ «-1» означают отрицательную связь между v_i и v_j , т.е. увеличение (уменьшение) влияния вершины v_i вызывает уменьшение (увеличение) в вершине v_j);

$X = \{x_i\}$ – множество параметров вершин;

$F = f(v_i, v_j, e_{ij})$ – функция связи между вершинами;

θ – пространство параметров вершин.

3. КОГНИТИВНАЯ КАРТА «БЕЗОПАСНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИУС АС»

Для построения общей когнитивной карты, характеризующей безопасность функционирования ИУС АС сначала были выделены блоки факторов, влияющих на безопасность функционирования ИУС АС (Блок 1 – Внешняя среда (V), Блок 2 – Входная информация (I), Блок 3 – Выходная информация (O), а затем построены блоки когнитивных моделей, на основании которых был проведен синтез их в общую когнитивную модель по схеме «снизу» (рис. 4).

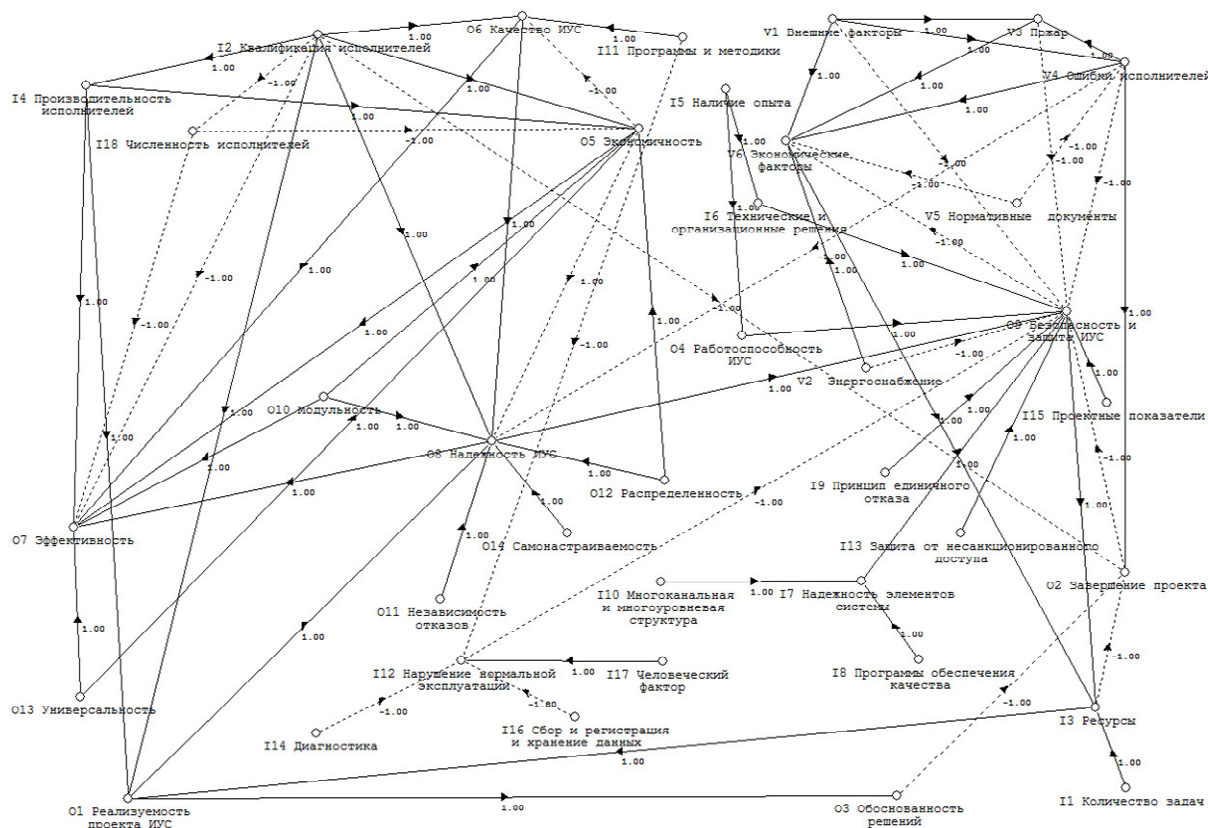


Рис. 4. – Когнитивная карта «Безопасность функционирования ИУС АС»

После разработки когнитивной карты был проведен ее анализ. Анализ

структурной устойчивости показал, что структура системы устойчива, так как среди 6 циклов когнитивной карты имеется нечетное число циклов отрицательной обратной связи – 3 цикла [5]. Для того чтобы проанализировать возможные сценарии развития ситуаций при создании ИУС АС, отображенной когнитивной картой «Безопасность функционирования ИУС АС», было проведено их импульсное моделирование.

На рисунке 5 представлен один из сценариев развития ситуации, связанной с созданием ИУС АС. Здесь по оси абсцисс (OX) отмечены такты моделирования, по оси ординат (OY) – величины импульсов, генерируемых в вершинах под влиянием анализируемых возмущающих воздействий. *Сценарий.* Моделирование ситуации «Что будет при уменьшении надежности ИУС $q_{T7} = -1$ и увеличении пожаров $q_{B3} = +1$?».

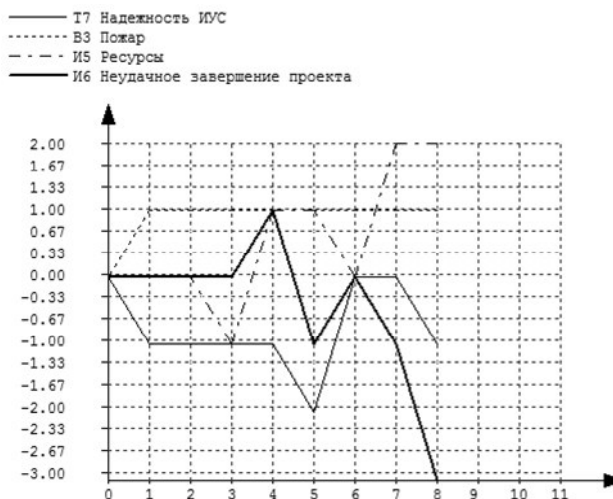


Рис. 5. – Сценарий 1: уменьшение надежности ИУС и увеличении пожаров

Из рисунка 5 видно, что при уменьшении надежности ИУС и увеличении пожаров наблюдается тенденция роста возможности неудачного завершения проекта по созданию ИУС. Однако при резком увеличении ресурсов наблюдается тенденция быстрого снижения возможности неудачного завершения проекта.

4. ВЫВОД

Таким образом, исключение возможных аварийных ситуаций, провала проекта, а также минимизация возможных последствий отказов ИУС АС в процессе эксплуатации, может быть максимально достигнута на начальных этапах ЖЦ ИУС АС, если проводились предпроектные исследования по созданию ИУС. Результатом предпроектных исследований является система моделей (четкие и нечеткие когнитивные модели), позволяющая повысить обоснованность принятия управленческих и технических решений руководителем проекта в быстроизменяющейся обстановке при создании ИУС. Применение системного подхода к управлению созданием ИУС, является одной из важнейших характеристик стратегического управления, поскольку он позволяет выделять подсистемы и разрабатывать подстратегию для каждой из них, а также рассматривать в качестве объекта управления всю систему в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность атомных электростанций: проектирование: требования № NS-R-1 [Текст] // Серия

- норм МАГАТЭ по безопасности. Вена: МАГАТЭ, 2003. – 92 с.
2. *Каляев, И.А.* и др. Методы и средства повышения безопасности и сокращения времени операций с ядерным топливом на АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 [Текст] / И.А. Каляев, В.В. Коробкин, Э.В. Мельник, М.А. Хисамутдинов: монография. – Ростов на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2014. – 208 с.
 3. *Липаев, В.В.* Техничко-экономическое обоснование проектов сложных программных средств [Текст] / В.В. Липаев. – М.: СИНТЕГ, 2004. – 284 с.
 4. *Коробкин, В.В.* и др. Один из подходов к оценке безопасности и рисков информационно-управляющих систем для атомных станций [Электронный ресурс] / В.В. Коробкин, А.Е. Колоденкова // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – 2014. – Режим доступа: URL: <http://vspu2014.ipu.ru/node/8581.pdf> – 10.12.16.
 5. *Робертс, Ф.С.* Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам [Текст] / Ф.С. Робертс. – М.: Наука, 1986. – 496 с.

REFERENCES

- [1] Bezopasnost atomnih ilektrostantsii: proektirovanie: trebovaniy № NS-R-1 [Safety of nuclear power plants: design: requirements № NS-R-1]. Seriy norm MAGATE pobezopasnosti [Standards IAEA safety series]. Vienna: MAGATE, 2003. – 92 p. (in English).
- [2] Kaliaev I.A., Korobkin V.V., Melnik E.V., Khisamutdinov M.A. Metodi i sredstva povisheniy bezopasnosti i sokraceniy vremeni operatsii s yadernim toplivom na AIS s reaktorom tipa VVER-1000 [The methods and means to improve safety and reduce the time of operation of nuclear fuel in nuclear power plant WWER-1000 reactor]: monographia [monograph]. – Rostov-on-Don: Pub. Izdat. Uzhnogo Federalnogo universiteta [Southern Federal University Publishing House], 2014. 208 p. (in Russian).
- [3] Lipaev V.V. Tehniko-ikonomiceskoe obosnovanie proektov slozhnih programmnih sredstv [Feasibility study of software facility projects]. M. Pub. SINTEG [SINTEG], 2004. – 284 p. (in Russian).
- [4] Korobkin V.V., Kolodenkova A.E. Odin iz podhodov k ocenke bezopasnosti I riskov informacionno-upravlyucih system dly atomnih stancii [One of the approaches to the estimation of safety and risk information and control systems for nuclear power plants] // XII Vserossiiskoe sovecanie po problemam upravleniy VSPU-2014 [XII All-Russian conference on governance VSPU 2014] Available at: <http://vspu2014.ipu.ru/node/8581.pdf> (in Russian).
- [5] Roberts F.S. Diskretnie matematicheskie modeli s prilozheniyami k socialnim, biologicheskimi i ekologicheskimi zadacham [Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems]. M. Pub. Nauka [Science], 1986. 496 p. (in English).

Exploratory Researches in Information and Control System Creating for Nuclear Power Plants under Uncertainty

A.E. Kolodenkova

*Ufa State Aviation Technical University,
12 Karl Marks St., Ufa, Bashkortostan, Russia 450025
e-mail: anna82_42@mail.ru*

Abstract – It is emphasized that for safety and functioning of information and control systems for nuclear power plants it is necessary to conduct exploratory researches at early stages of system creation. The structural scheme of process control system of exploratory researches is offered. We consider the cognitive approach to information and control system safety modeling for nuclear power plants. Some results of impulse modeling possible scenarios of the situation when creating information-control systems for nuclear power plants are given.

Keywords: exploratory research, system approach, symbolic directed graph, safety, NPP.

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

УДК 621.791.725

**ЛАЗЕРНАЯ И ГИБРИДНАЯ ЛАЗЕРНО-ДУГОВАЯ СВАРКА
ХЛАДОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ С СОДЕРЖАНИЕМ НИКЕЛЯ ДО 9%**

© 2016 С.Э. Гоок*, А.В. Гуменюк***, М. Ретмайер***, А.М. Эль-Батаги***

** Общество Фраунгофера,*

Институт производственных систем и технологий конструирования ИПК, Берлин, Германия

*** Федеральное ведомство по исследованию и испытаниям материалов БАМ, Берлин, Германия*

**** Центральный металлургический научно-исследовательский институт, Хелуан, Египет*

Термообработанные конструкционные хладостойкие стали с содержанием никеля до 9% считаются наиболее подходящим по своим стоимостным показателям материалом для изготовления элементов криогенных систем в различных сегментах энергетического машиностроения. Данный тип сталей характеризуется высокими прочностными показателями в сочетании с высокими значениями ударной вязкости при температурах эксплуатации до -196°C . Для сварки хладостойких никельсодержащих сталей рекомендованы, и в настоящее время широко используются присадочные материалы на основе никеля. Основной проблемой этого выбора является снижение предела текучести металла сварного шва, которое компенсируется за счет увеличения толщины стенки изделия. Присадочные материалы на никелевой основе относительно дороги и необходимы в большом количестве для заполнения разделок под многопроходную сварку. Эти факторы значительно увеличивают затраты при изготовлении крупногабаритных толстостенных изделий, как например резервуаров для хранения сжиженного природного газа. По этим причинам, освоение новых сварочных технологий представляет большой экономический интерес. Значительный потенциал предлагают методы сварки, основанные на применении современных высокомошных оптоволоконных лазеров. Лазерный луч приводит к возникновению гораздо меньшей зоны плавления по сравнению с традиционными, дуговыми процессами. При этом уменьшается тепловая нагрузка на основной металл. Металл шва по своему химическому составу и прочностным свойствам приближается к основному металлу. Форма разделки под лазерную сварку толстостенных изделий подразумевает наличие высокого притупления проплавляемого за один проход, что позволяет значительно сократить количество присадочного материала, необходимого для заполнения разделки. До настоящего времени подробные исследования относительно применения лазерных технологий для сварки хладостойкой никельсодержащей стали не были проведены.

В настоящей работе рассмотрены особенности формирования сварного шва при лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварке листов хладостойкой никельсодержащей стали толщиной 11,5 мм. Рекомендованы параметры процесса, обеспечивающие стабильное проплавление стыка и равномерное формирование корня шва. С помощью электронно-зондового микроанализа определена глубина проникновения и исследован характер распределения присадочной проволоки в узком гибридном лазерно-дуговом шве. Испытания на разрыв не выявили снижения прочностных свойств как лазерных, так и гибридных лазерно-дуговых швов. Разрушение испытанных образцов происходит по основному металлу вдали от сварного шва.

Ключевые слова: хладостойкие стали, никельсодержащие стали, лазерная сварка, перемешивание, предел прочности.

Поступила в редакцию 18.03.2016 г.

INTRODUCTION

As the world searches for cleaner energy sources, one that shows great promise now and in the years to come is natural gas. Burning cleaner than oil, and much cleaner than coal as well as being abundant, natural gas is an obvious choice to meet the world's increasing energy needs while meeting increasingly tight restrictions on CO₂ [1, 2, 3]. Natural gas resources are typically located away from the areas of consumption, making transportation and storage of large quantities of natural gas necessary. Storage and transportation of natural gas can be done more efficiently when it is cooled below -165°C and liquefied. The reason for this step is LNG takes up 1/600th the volume compared to natural gas at room temperature.

LNG is stored in large, specifically designed underground or aboveground cryogenic storage containers. The aboveground, flat-bottomed, cylindrical LNG tank design is more commonly used throughout the world [4, 5]. The typical cryogenic storage containers are comprised of an inner and an outer shell. The inner shell, so-called primary container, is made from cryogenic steel enclosed in the outer shell, made either from carbon steel or pre-stressed concrete.

Over the last 20 years aboveground storage tank capacities have grown in size by a factor of two. With capacities of 80.000 m³ in the 80's the capacities of 140.000-160.000 m³ are now common, and trending to capacities up to 200.000 m³. The inner shell of such large tank has a diameter of 84 m and a height of 38 m and is constructed from many 9%Ni steel sheets that are welded together. To reach this tank capacity, plates that are 50 mm thick are required. The length of welds totals to roughly 3200 m.

Heat treated 9%Ni steel exhibits superior mechanical properties at operating temperatures at a reasonable price and is commonly used for the construction of inner shells of LNG storage tanks. The excellent low temperature impact toughness of tempered 9%Ni steel is the result of a fine grained structure of tough nickel-ferrite with small amounts of stable austenite formed by tempering [6, 7]. Ni based welding consumables is the preferred filler material of choice in LNG tank construction [6, 8, 9].

Currently most welds during the construction of LNG tanks are preformed using conventional arc welding processes, i.e. shielded metal arc welding (SMAW), gas metal arc welding (GMAW), gas tungsten arc welding (GTAW) and submerged arc welding (SAW) [10]. Ni based filler materials have great resistance to brittle failure at operating temperature (-165 °C) and hence have provided excellent safety record for LNG tanks. The high resistance to brittle failure results in a filler metal with lower strength than the base metal (BM). The design codes compensate for this lack of strength by increasing the thickness of the tank wall to ensure the welds do not fail.

Typical groove configuration for SMAW, GTAW and SAW used for joining 9%Ni steel plates is double sided groove with an beveling angle at about 60°. The filling of such welds using conventional welding methods is time consuming and requires a large amount of expensive filler material. Industry has expressed interest in looking for ways to increase the speed of production and reduce the amount of material needed for the construction of LNG tanks. Some obvious places to start looking to reduce the cost/time of production are in the welds. Options include creating stronger welds to increase the maximum allowable stress in the wall material, utilizing less expensive filler material, creating joint geometry that requires less filler material and less welding passes and using faster joining processes. For these reasons new welding technologies are the focus of interest. Big potential can be seen in laser based welding techniques.

Autogenous laser welding provides deep penetrating welds. It is much faster than manual arc techniques and can be easily automated. However, laser welding is not without drawbacks; one of them is the need for near perfect part fit-up which is not always possible.

This limitation arises due to the small diameter of laser beam, which is (depending on laser source and focusing optic) about 0.4 – 0.5 mm in the focal plane. Gap sizes above this limit are difficult to bridge. Lack of fusion is a typical weld imperfection in oversized gaps. High precision in the positioning of the laser beam to the joint is needed. The second drawback of autogenous laser welding is the short thermal cycle and the associated high cooling rate. For high strength steels, which include cryogenic 9%Ni steel and others that are common to the oil and gas industry, these fast cooling rates can lead to the formation of unfavorable hard and brittle martensitic microstructure. Martensite has detrimental effects on the mechanical properties of the steel; reducing ductility, fatigue life and fracture toughness.

A solution to this issue of tight tolerances on part fit up can be slightly alleviated by the addition of filler material. Welding wire can be added to the molten pool either with an arc or in a cold wire configuration. Hybrid laser-arc welding (HLAW) and laser cold wire welding are quite well known welding processes. They are robust and therefore worth considering for the welding of thick walled constructions, for example LNG tanks.

A certain concentration of filler material in the fusion zone (FZ) is needed in order to improve the mechanical properties of the weld joint. Laser welds have a thin deep FZ profile. The transportation of filler material in the depth of these thin laser welds is a technical challenge. Recent studies have shown that the maximum penetration depth of filler material by hybrid laser-arc welding is limited to 13 ... 15 mm [11, 12]. It has to be mentioned that the distribution of the wire feeding elements becomes very inhomogeneous starting at roughly 4 mm from the top side of the weld. It is unclear if such distribution of alloying elements is adequate to aid in the recovery of mechanical properties in the weld joint. The question regarding the necessary percentage of Ni to achieve the required toughness for LNG tanks is of a big practical interest.

In the frame of this study trials of HLAW and laser cold-wire welds were compared to laser only welds. Peculiarities of welding process stability and weld formation were documented and analyzed. The focus of welding trials was also the maximizing the filler wire penetration depth without causing cracks. Using EPMA of %Ni, hardness mapping and optical microscopy the effectiveness of hybrid versus cold-wire laser welding regarding the achievable mechanical characteristics of the welds was determined.

1. EXPERIMENTAL

A fiber laser YLR-20000 (IPG) with max power output of 20 kW and beam parameter product (BPP) of 11.5 mm x mrad supplied the laser power through a fiber optic cable with a core diameter of 200 μm . Laser optics BIMO-HP (HIGHYAG) was used to focus the beam to a spot size of 0.5 mm with a focal length of 350 mm. The arc and filler wire was supplied via a Qineo Pulse 600 (CLOOS) power supply. Welding process arrangements are shown in Figure 1.

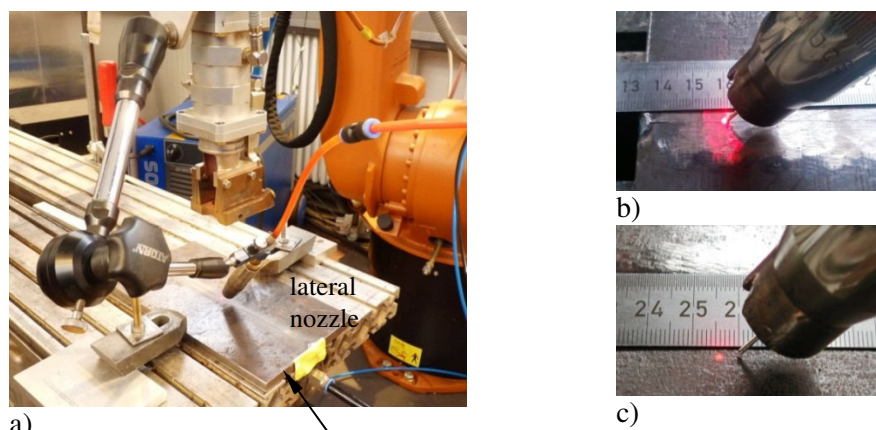


Figure 1 – Welding process arrangements; laser welding (a); laser cold wire welding (b); hybrid laser-arc welding (c)

Top side shielding gas was adjusted from pure Ar in laser only and laser cold wire welding, to Ar+30%He for hybrid laser-arc welding to help with arc stability. In the case of laser welding the shielding gas has been supplied through the lateral nozzle (Figure 1a). A GMA-torch was mounted on the optics to provide hybrid as well as cold wire process. The angle between GMA-Torch and laser beam axis was 25°. The distance between laser beam and wire tip for the laser cold wire was zero (Figure 1b) and for the hybrid process it was between 4 mm and 5 mm (Figure 1c). The HLAW process was performed in leading arc configuration.

European Standard EN10028-4 was followed for the selection of the materials for these experiments. The base material was X8Ni9, its exact composition was determined by Optical Emission Spectrometer (OES) and is displayed in Table 1. Notably the Ni content for the selected base metal falls within the standards acceptable range of 8.5-10.0 wt%. The filler material has been chosen according to recommendation DVS 0955 [9]. The composition of Ni-based filler wire Thermanit 625 (ERNiCrMo-3) is also in Table 1. The filler wire and base metal have very similar mechanical properties (Table 2). However one notable difference is the higher tensile strength of the filler wire, achieved through alloying of Molybdenum and Chromium.

Table 1 – Composition of materials used, shown in wt%

Material / Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	Fe
X8Ni9											
(BAM analysis)	0.05	0.22	0.52	0.006	0.002	0.02	8.8	0.05	0.01	0.01	>90
Thermanit 625	0.03	0.25	0.2	-	-	22.0	bal.	-	9.0	3.6	<1.0

Table 2 Mechanical properties of materials used (reference values)

Material	Yield strength in MPa (min)	Tensile strength in MPa (min)	Charpy value at -196°C in J	
			Transverse	Longitudinal
X8Ni9 (normalized base metal)	490	640	40	50
Thermanit 625	460	740	40	

Welding specimen preparation included cutting the base material to 80 mm x 250 mm x 11.5 mm sheets with mille edges. The plates were then tacked with no gap nor misalignment. The root side was shielded with pure Ar and a focus position Δz of 3 mm below plate surface was used for all welds preformed. Welding parameters can be seen in Table 3.

Table 3 Welding parameters

Welding parameter / Process	Laser	Laser cold wire	Laser hybrid
Laser power in kW	12.7 ... 13.8	13 ... 15	11 ... 13
Welding speed in m/min	1.5 ... 2	2	1.8 ... 3
Peak arc current in A	-	-	365
Peak arc voltage in V	-	-	35
Wire feed speed in m/min	-	2 ... 2.5	5 ... 12
Wire diameter in mm	-	1.2	1.2

2. RESULTS AND DISCUSSION

Series of welds have been performed with all three welding techniques. Parameter variation in the ranges given in Table 3 was used to achieve stable and reproducible welds with the best surface and root quality possible. Selected welds have been subjected to extensive metallographic examinations and mechanical-technological tests. X-ray examinations were made on most welds. No crack-like defects could be detected within the range of X-ray resolution.

2.1 Weld seam formation and microstructure

Autogenous laser welding

Recommended parameters for autogenous laser beam welding for 11.5 mm thick X8Ni9 is a laser power at 13.8 kW with welding speed of 2 m/min. The result is the crack free weld with about 1 mm undercutting on the top side due to the material vaporization and spattering. The narrow FZ (~1–2 mm wide) is characteristic for such deep penetrated autogenous laser welds operating in keyhole mode. A macrograph of a laser only weld cross section is displayed in Figure 2a. The heat affected zone (HAZ) is also very narrow due to the high energy density of this welding process. Figure 2b shows the fusion boundary. Figure 2c is the FZ at higher magnification. The rolling direction is visible up to the fusion boundary where the weld metal (WM) microstructure becomes present, as seen in part b) of Figure 2. Weld metal microstructure of the autogenous laser weld is comprised of mostly untempered martensite with some ferrite throughout.

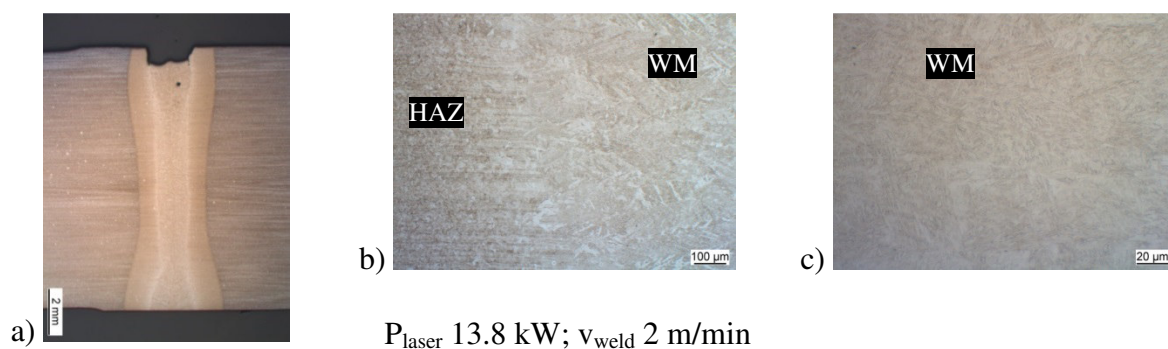


Figure 2 – Autogenous laser weld (a), varying magnifications of the same weld with focus on the fusion boundary (b) and weld metal (c)

Laser cold wire welding

The welding process has been adjusted so that the feeding wire was fed into the laser beam about 1 mm above the specimen surface and melted, then the molten wire metal was moved down to the keyhole under the force of gravity (Figure 3). The result was a well-shaped weld with minimal undercutting on the top-side and the excess weld material on the root-side (Figure 4a). Recommended parameters for laser cold wire welding is a laser power at 14 kW, welding speed of 2 m/min with a wire feeding speed of 2 m/min as well. An increasing of the wire feeding speed up to 2.5 m/min resulted in unstable wire melt-off due to the increase in relative speed between wire and specimen surface. The angle between the wire axis and specimen surface was 75°, what is quite steep. The rather unfavorable wire feeding angle in combination with the higher relative speed caused the wire to stumble on the cold specimen surface and deflected out of the laser beam path. Un-melted pieces of welding wire were frozen on the top of the weld and could be observed on the weld surface (red ovals in

Figure 4b).

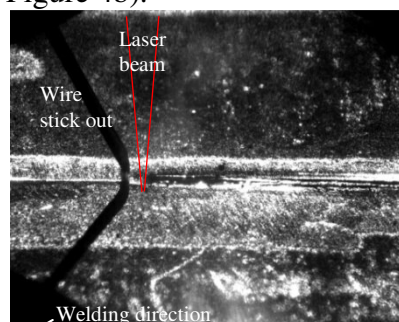
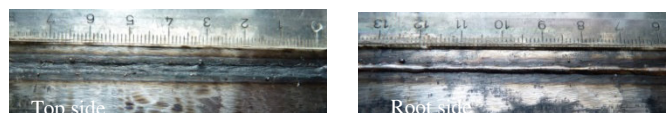


Figure 3 – Laser cold wire welding process observed with high speed camera



a) P_{laser} 14 kW; v_{weld} 2 m/min; v_{wire} 2 m/min



b) P_{laser} 14 kW; v_{weld} 2 m/min; v_{wire} 2.5 m/min

Figure 4 – Outer appearance of laser cold wire welds; with 2 m/min wire feeding speed (a); with 2.5 m/min wire feeding speed (b)

In the macrograph (Figure 5a) the general shape and dimensions of the laser cold wire weld are comparable to the laser only weld (Figure 2a). A more careful analysis will reveal the Ni rich filler material (white regions) to be penetrating to a depth of ~6 mm from the top of the weld, although the character of the dilution is very inhomogeneous.

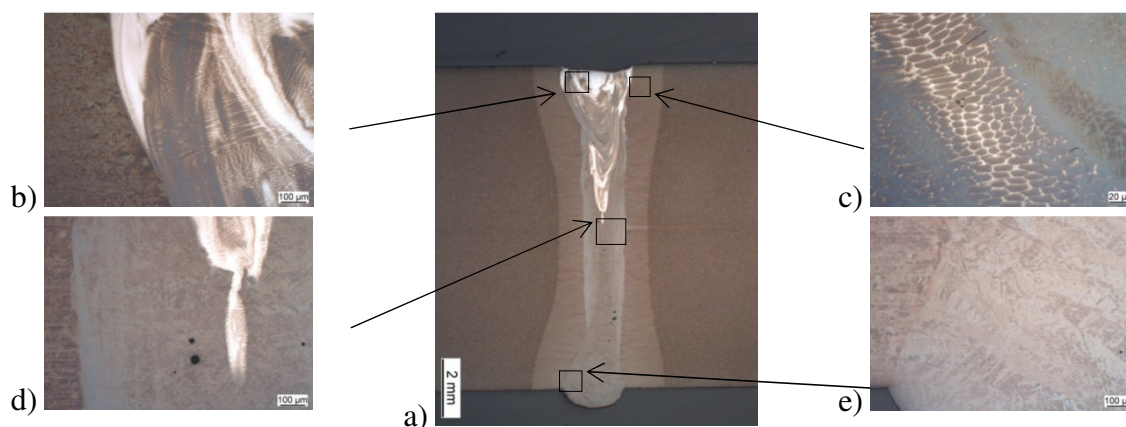


Figure 5 – Cold wire laser weld (P_{laser} 14 kW; v_{weld} 2 m/min; v_{wire} 2 m/min), varying magnifications with focus on the fusion boundary and FZ: general shape (a); top part (b, c); middle (d) and root part (e)

The fusion boundary of the top side is shown (Figure 5b). There are noticeable Ni rich areas of mixing. These areas are band-like in morphology and give evidence to the turbulent movement of the molten metal in the weld pool during the welding. Figure 5c displays the cellular dendritic solidification of the Ni rich areas. Austenitic structure is quite prominent in the top part of the weld. The penetration pattern becomes narrow and stops abruptly at the middle of the plate thickness (Figure 5d). Some porosity with a maximum pore diameter 50 μm is visible. Such discontinuities are subcritical and acceptable in the welding code for LNG tanks. The presence of filler material at the bottom side of the weld could not be detected by visual observation. The microstructure at the root side of the weld is martensite and ferrite (Figure 5e). Further quantifying details to the distribution of feeding wire alloying elements in the weld cross section will be given in the next section.

Hybrid laser-arc weld

The main problem at the hybrid laser arc welding of the 9%Ni steel was the formation of the excessive root with frozen droplets, so called root humping (Figure 6a). This phenomenon occurs due to the higher viscosity of molten Ni based wire used. The options for influencing the root humping were to reduce the arc pressure on the molten pool or to increase the traveling speed to avoid droplets formation. An appropriate weld root could be achieved at quite low wire feeding speed 5 m/min, welding speed 2.0 m/min and laser power 12.6 kW. The slight arc pressure on the top side of the weld in this case was not able to press the molten

metal out of the weld root. The result was a stable weld without excessive root droplets (Figure 6b). However, it is questionable if this technique is robust enough to be used in practice. The wire feeding speed was too low, not enough filler material was feed into the process and the arc transfer mode tended to be globular. A better way to stabilize the process was an increase of welding speed from 2 m/min to about 3 m/min and increasing laser power from 12.6 kW to about 14 kW. The wire feeding speed was held at 12 m/min, a typical speed for HLAW. Subsequently it was possible to produce a series of welds with an appropriate root quality. An example for the weld with increased welding speed is shown in Figure 6c.

- a) $P_{\text{laser}} = 12.6 \text{ kW}$,
 $v_{\text{weld}} = 2.0 \text{ m/min}$,
 $v_{\text{wire}} = 12 \text{ m/min}$,
 $I = 330 \text{ A}$, $U = 33 \text{ V}$
- b) $P_{\text{laser}} = 12.6 \text{ kW}$,
 $v_{\text{weld}} = 2.0 \text{ m/min}$,
 $v_{\text{wire}} = 5 \text{ m/min}$,
 $I = 141 \text{ A}$, $U = 26 \text{ V}$
- c) $P_{\text{laser}} = 13.8 \text{ kW}$,
 $v_{\text{weld}} = 3.0 \text{ m/min}$,
 $v_{\text{wire}} = 12 \text{ m/min}$,
 $I = 330 \text{ A}$, $U = 33 \text{ V}$

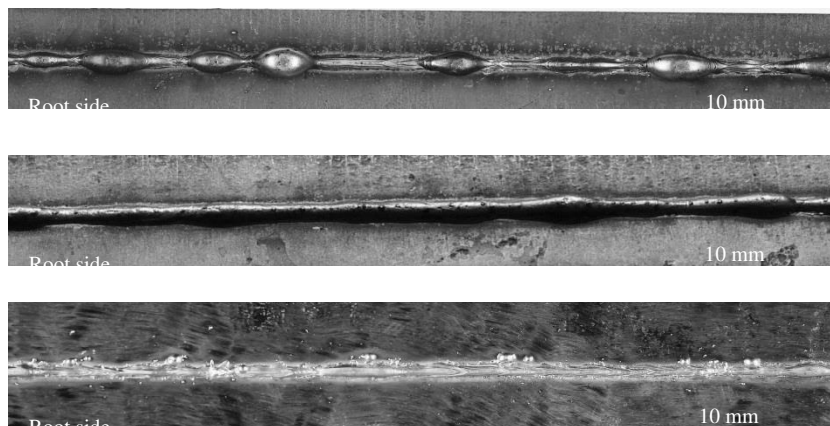


Figure 6 – Outer appearances of hybrid laser-arc welds (root side) performed with different welding parameters; weld without parameter adaptation (a); decreased welding wire feeding speed (b); increased welding speed and laser power (c)

Figure 7a shows the general view of the cross section for the HLAW weld performed with optimized parameters. The first noticeable difference from the laser and cold-wire welds is the shape of the FZ. Two distinct zones can be recognized: the wide FZ at the top of the weld and the narrow deep zone that penetrates material to underside. They can be defined as an arc dominated and a laser dominated zones. There are differences in the microstructure between the two zones. The arc dominated zone reaches about 4 mm in the depth and consists predominantly of austenite due to the austenitic filler material (Figure 7b and 7c). The filler material can be visually seen mixing to a weld depth of roughly 5 mm. After this depth level the dilution becomes extremely inhomogeneous. At 6 mm from the top (Figure 7d) solidification cracking is shown in the “islands” with high filler wire concentration. No presence of the filler material could be found by optical observation in the root of the weld. The microstructure of the weld root is ferritic-martensitic (Figure 7e).

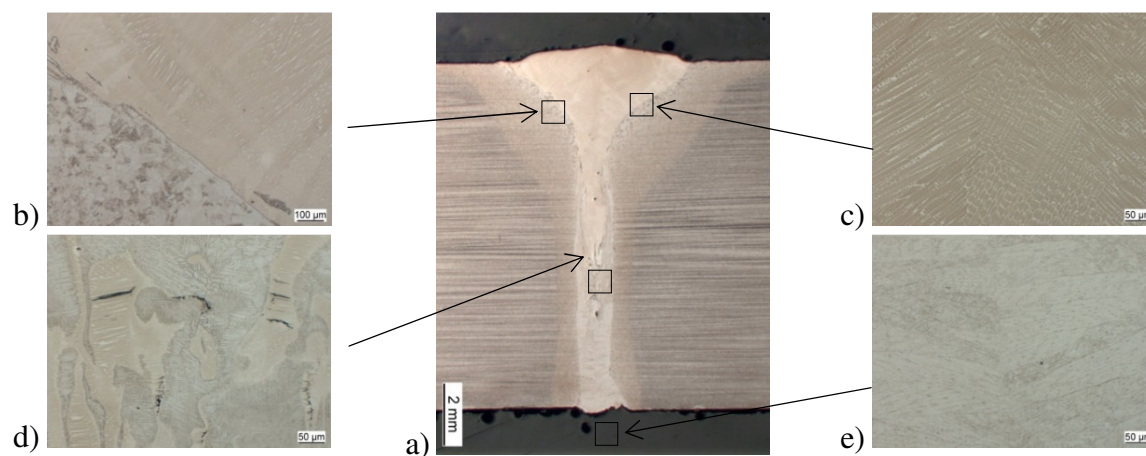


Figure 7 Hybrid laser-arc weld ($P_{\text{laser}} = 13.8 \text{ kW}$, $v_{\text{weld}} = 3.0 \text{ m/min}$, $v_{\text{wire}} = 12 \text{ m/min}$, $I = 330 \text{ A}$, $U = 33 \text{ V}$), varying magnifications of the same weld with focus on the fusion boundary and FZ:

general shape (a); top part (b, c); middle (d) and root part (e)

2.2 Distribution of filler wire in the FZ

In the welds performed with filler material EPMA has been done to obtain quantitative information about distribution of the alloying element Ni. The reason for such analysis is that alloying elements have a very direct influence on the mechanical properties of the weld joint. The key factors are adequate concentration and homogenous distribution through the FZ. Understanding these factors will help to optimize the welding process parameters for achieving required weld properties in particular impact toughness.

Figure 8 and Figure 9 show monochrome and color mapping of the Ni concentration profile in the cross section of a laser cold wire weld and a HLAW weld respectively. Results presented for laser cold wire weld show that distribution of filler material is very inhomogeneous starting from the weld upper surface. The average dilution of Ni near the upper surface is about 18%...20%. It is also evident that distribution of filler material is affected by the metal flow in the key hole. Parts of the molten filler material were carried by the melt flow to weld depths reaching $\frac{1}{2}$ of the plate thickness. The maximum concentration was about 17% in the weld center at that depth. It can be interpreted from the color Ni mapping in Figure 8, that only a minor part of filler material reaches a depth of $\frac{1}{2}$ of the plate thickness. The average dilution of Ni in the middle of plate thickness stays at 10%...11%. It is to worth noting that the filler material tends to accumulate along the fusion boundary to a depth of 9 to 10 mm from the top-side of the weld with a concentration of 13%...14% Ni in these thin regions. At the bottom near the root Ni concentration was about 9% which corresponds to the Ni content in the base material.

In general, it can be stated that filler material made up only a slight part of the FZ in the laser cold wire welds. One of the main reasons for this was the modest amount of filler wire that was fed into the weld pool. In other words an adequate welding wire feeding speed should be taken into account. At a filler wire speed of 2 m/min and welding speed of 2 m/min the fraction of the FZ compromised of the filler material was about 5.8% (Figure 8). This value was calculated by taking into consideration the actual geometrical shape of the FZ. A width of 1.7 mm, and a height of 11.5 mm was used in the calculations, along with 1.2 mm for the wire diameter. An increase of the wire feeding speed to 12 m/min would increase the fraction of filler material in the FZ to about 35%.

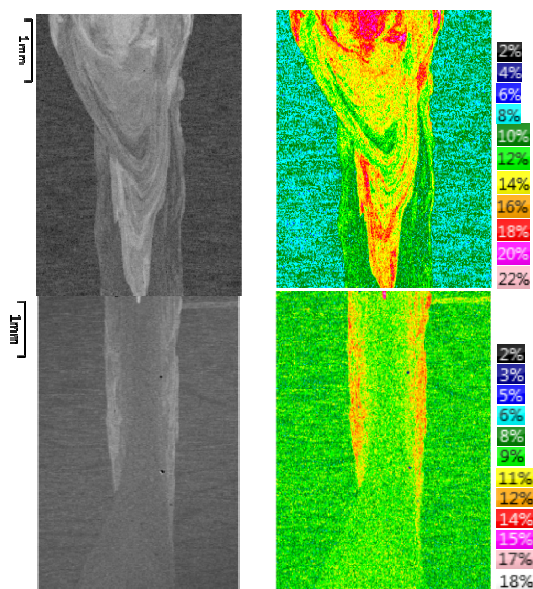


Figure 8 – Ni concentration profiles in cross section of the cold wire laser weld; monochrome profile (left) and color element map (right)

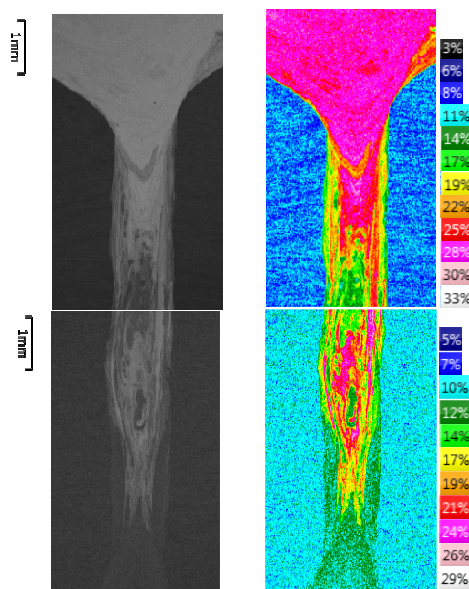


Figure 9 – Ni concentration profiles in cross section of the HLAW weld; monochrome profile (left) and color element map (right)

Based on the experience gained with respect to the laser cold wire welding process, it is proposed that wire feeding angle has to be 45° or more. Having the wire flatter to the specimen surface will help to avoid the stumbling of the wire tip against the cold welding pool edges and reach much higher wire feeding rates which is desirable for laser cold wire welding in LNG applications.

Wire feeding speeds of 12 m/min and higher are common for HLAW of thick walled constructions. Accordingly, it is expected that the mechanical properties of the weld can be positively influenced by a proper amount of filler material in the FZ. The uniform distribution of filler wire in the FZ is a necessary precondition. The measurements however show that the main volume of the filler material is concentrated in the top part of the weld in the arc dominated zone. The dilution here is homogeneous with the maximum concentration of Ni at about 30% (Figure 9). The mixing between the base and filler metal create Ni-poor and Ni-enriched “islands” which contain about 10% and 30% Ni respectively. These island like formations can be recognized as the inhomogeneous area, which starts from about 5 mm from the top side and reaches a depth of about 10 mm. It is remarkable that the filler material reaches the root side. The maximum Ni concentration here is about 12% which is 3% higher than Ni content is in base material.

The inhomogeneous mixing which is visible in the middle of the weld is undesirable, since it has areas with different physical properties such as thermal expansion. As a result, solidification cracks can occur in this area (Figure 7d).

The current state of results shows that further welding trials are necessary to achieve better homogeneity of weld metal in FZ. It is indicated in [13], that the HLAW process has a more homogeneous distribution of alloying elements with leading laser as compared to leading arc. In this research work it is also pointed out that almost homogeneous distribution of alloying elements can be attained when the shielding gas contained more than 2% O_2 .

2.3 Hardness measurements and tensile tests

Hardness measurements HV0.5 and tensile tests were carried out to characterize the achieved mechanical properties of the welds. The Vickers hardness testing machines had been calibrated according to DIN EN ISO 6507-3. The maximum deviation of the hardness measurements HV0.5 was $\pm 3\%$. The representative measuring results for the Vickers hardness for autogenous laser weld and HLAW are illustrated in Figure 10 and Figure 11 respectively.

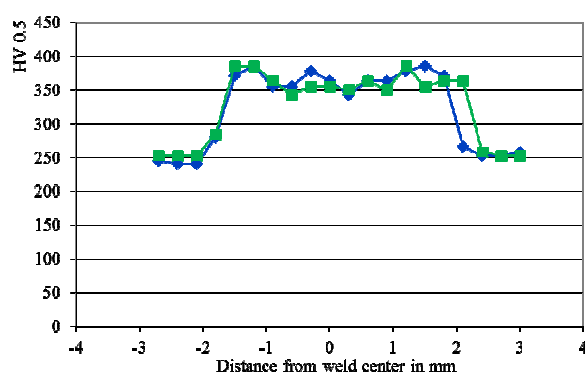


Figure 10 – The hardness HV0.5 profile for autogenous laser weld (blue is top side, green is root side)

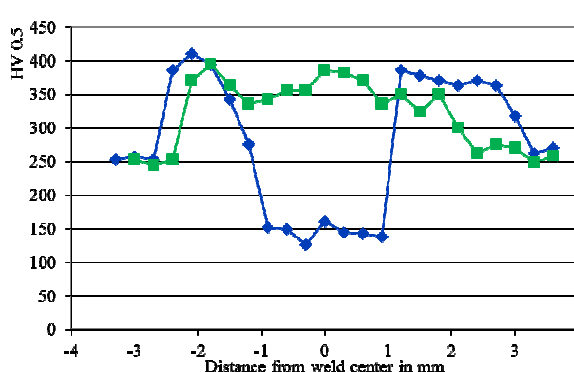


Figure 11 – The hardness HV0.5 profile for HLAW (blue is top side, green is root side)

The comparison shows that the peak hardness level for autogenous laser weld measured in both top and root side was 390 HV0.5 and exceeds the hardness of the base metal 250

HV0.5 by about 60% (Figure 10). This hardness level is quite high and can lead to reduced toughness of the weld joint at cryogenic temperatures. An unusual hardness profile can be observed at the laser hybrid weld (Figure 11). The hardness profile on the top side of the weld is characterized by the increased hardness in the HAZ from the base metal 250 HV0.5 up to 410 HV0.5 and then abruptly dropping down to 150 HV0.5 in the FZ. The drop in hardness of the top side FZ is explained by the high concentration of the Ni based filler material which is softer than the base metal. Only a nominal amount of filler material reaches the root side of the weld. Subsequently, the hardness level on the root side of the laser hybrid weld is high, similar to the autogenous laser weld.

Tensile tests were carried out according to DIN EN ISO 4136 using flat specimens at room temperature. Three specimens were tested for both laser welds and HLAW. The strength of the weld metal for all welds was always much higher than that of the base metal. The fracture location for all specimens tested was in the base metal (Figure 12).

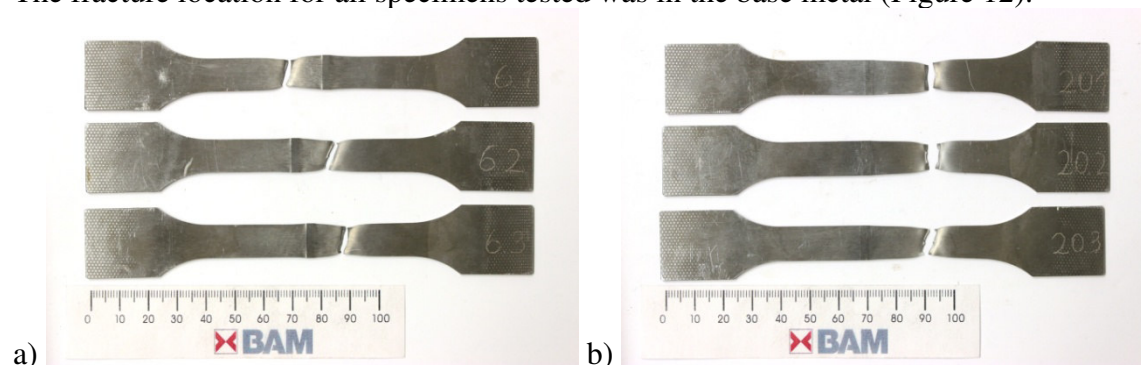


Figure 12 – Tensile test samples with fracture location in the base metal: autogenous laser weld (a); HLAW (b)

The average obtained failure stress was 768 ± 2.5 MPa. The requirements of DIN EN 10028-4 for cryogenic steel X8Ni9 (Table 2) are definitely fulfilled with the obtained failure stresses.

In order to correlate the distribution of the filler wire in the weld to toughness, Charpy impact testing will be performed as the next step of this research work.

3. CONCLUSIONS

Plates made from cryogenic 9%Ni steel with thickness of 11.5 mm were butt joint welded in a single pass using three welding techniques; autogenous laser welding, laser cold wire welding and hybrid laser-arc welding process. The aim of these welding trials was to contribute to an understanding of how the welding process parameters affect the process stability, weld seam formation and mechanical properties of the welds. The findings of the study can be summarized as follows:

- (1) A stable and reproducible welding process with a sound weld seam formation could be obtained for all three welding techniques tested, although the HLAW process needs an increased welding speed of about 3 m/min to avoid the droplet formation on the root side of the welds;
- (2) The distribution of Ni base filler material is very inhomogeneous in laser cold wire welds starting from the weld upper surface. The element mapping shows that only a minor part of filler material reaches a depth of $\frac{1}{2}$ of the plate thickness. No filler material could be detected at the bottom near the root of the laser cold wire welds;
- (3) The homogenous distribution of the filler material up to weld depth of roughly 6 mm could be stated for the HLAW process. The Ni content of up to 30% is characteristically for this arc dominated part of the weld. The inhomogeneous

mixing between the Ni-poor and Ni-enriched formations with Ni content of about 10% and 30% respectively can be recognized in the plate middle. The maximum Ni concentration at the root side of the HLAW welds reaches about 12% which is 3% higher than Ni content is in base material;

- (4) The peak hardness for the laser welds was 390 HV0.5 and exceeds the hardness of the base metal by about 60%. This hardness level is quite high and can lead to reduced toughness of the weld joint at cryogenic temperatures. The hardness profile for HLAW welds varies from 410 HV0.5 to 150 HV0.5 depending on local distribution of the filler material through the cross section of the weld.
- (5) The strength of the weld metal for both laser welds and HLAW welds was much higher than that of the base metal. The fracture location for all tested welds was in the base metal.
- (6) The correlation between the distribution of the filler wire in the weld and the toughness will be examined by Charpy impact testing. The comparative Charpy tests at cryogenic temperature of 196°C will be done as the next step of this research work.

Acknowledgement

The welding experiments were carried out within the joint innovative project (support code of DLR Project Management Agency, Germany 01DH14012) between Central Metallurgical Research and Development Institute (CMRDI) of Egypt and Fraunhofer IPK of Germany. The project is supported by the Science and Technology Development Fund (STDF) of the Arab Republic of Egypt and the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) of the Federal Republic of Germany.

REFERENCES

- [1] "Liquefied Natural Gas: Understanding the Basic Facts", August 2005, DOE/FE-0489. Available at: http://energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/LNG_primerupd.pdf (in English)
- [2] "World LNG Report – 2015 Edition". Available at: http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/IGU-World%20LNG%20Report-2015%20Edition.pdf (in English)
- [3] R. Götz., „Der künftige Erdgasbedarf Europas“, Diskussionspapier. Available at: http://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/arbeitspapiere/Der_Erdgasbedarf_der_EU_11_05_1_ks.pdf, FG 5 2007/08, Mai 2007 (in German)
- [4] J. Thierçault, C. Egels, "Cryogenic Above Ground Storage Tanks: Full Containment and Membrane Comparison of Technologies", Proc. on "LNG 17 International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas", Houston, Texas, USA, 16-19 April 2013, ISBN 978-1-62993-533-1, pp. 122–130. (in English)
- [5] Y.M. Yang, J.H. Kim, H.S. Seo "Development Of The World's Largest Above-Ground Full Containment LNG Storage Tank", Proc. On "23rd World Gas Conference", Amsterdam 2006, Korea Gas Corporation, Korea. (in English)
- [6] M. Hoshino, et al., Development of Super-9%Ni Steel Plates with Superior Low-temperature Toughness for LNG Storage Tanks, Nippon Steel Technical Report, No. 90 (July 2004), pp. 20–24. (in English)
- [7] Welding liquid natural gas tanks and vessels in 5% and 9% nickel steels. Available at: https://www-off-axis.fnal.gov/flare/technical_papers/welding_tanks.pdf (in English)
- [8] Kobelco's Welding Consumables for LNG Storage Tanks Made of 9% Ni Steel, KOBELCO Welding Today, Vol. 14 (2011), No. 2. (in English)
- [9] Welding-based processing of nickel-alloyed steels for low temperature applications, Guidelines DVS 0955. (in English)
- [10] R. Sakamoto, et al. "Development of Vertical Submerged Arc Welding Method for Aboveground LNG Storage Tank Construction." IHI Eng. Rev. 43.2 (2010): 55–62. (in English)
- [11] S. Gook, A. Gumenyuk, and M. Rethmeier. "Hybrid laser arc welding of X80 and X120 steel grade." Science and Technology of Welding and Joining 19.1 (2014): 15–24. ISSN 1362-1718 (in English)
- [12] M. Karhu, V. Kujanpää, A. Gumenyuk, M. Lammers, Study of Filler Metal Mixing and its

- Implication on Weld Homogeneity of Laser-Hybrid and Laser Cold-Wire Welded Thick Austenitic Stainless Steel Joints, 32nd Int. Congress on Lasers and Electro-Optics (ICALEO2013), Oct. 6-10, 2013, Miami, FL, U.S.A., Paper ID: 906, pp. 252–261. (in English)
- [13] L. Zhao, et al., Influence of Welding Parameters on distribution of Feeding Elements in CO₂ Laser GMA Hybrid Welding, Science and Technology of Welding and Joining (2009), Vol. 14, No. 5, pp. 457–467. (in English)

Laser and Hybrid Laser-Arc Welding of Cryogenic 9%Ni Steel

S. Gook^{*1}, A. Gumenyuk^{***2}, M. Rethmeier^{***3}, A.M. El-Batahgy^{***4}

** Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology IPK,
Pascalstraße 8-9, Berlin 10587*

¹e-mail: sergej.gook@ipk.fraunhofer.de

*** Federal Institute for Materials Research and Testing BAM,
Unter den Eichen 87 Berlin 12205*

²e-mail: andrey.gumenyuk@bam.de ; ³e-mail: michael.rethmeier@bam.de

**** Central Metallurgical R&D Institute, Manufact Technology Dept., Helwan,
P.O. Box 87, Helwan, Cairo, Egypt 11421*

⁴e-mail: elbatahgy@yahoo.com

Abstract – Heat treated 9%Ni steel is considered the most suitable and economic material for construction of large-size liquefied natural gas (LNG) storage tanks which operate at cryogenic temperatures (-196°C). Strength above 700 MPa as well as a minimum impact value of 60 J are required to ensure reliable operation of the LNG tanks at operating temperature. Conventional arc welding processes, including shielded metal arc welding, gas metal arc welding, gas tungsten arc welding and submerged arc welding, are currently used in construction of LNG tanks. Ni based filler wire is the preferred filler metal of choice in LNG tank construction. The main problem with this choice is the lower mechanical properties, particularly tensile strength of the weld metal. To compensate, the wall thickness needs to be excessively thick to ensure the strength of the welded structures. Ni based filler material is expensive and a large quantity is needed to fill the multi-pass weld grooves. These factors significantly add to the cost in the fabrication of LNG storage tanks. For these reasons, exploration of new welding technologies is a priority. A big potential can be seen in laser based welding techniques. Laser beam welding results in much smaller fusion zone with chemical composition and mechanical properties similar to that of the base material. Laser welding is a much faster process and allows for a joint geometry which requires less filler material and fewer welding passes. The advantages of laser welding can help to overcome the problems pointed out above.

Trials of autogenous laser welding, laser cold-wire welding and hybrid laser-arc welding conducted on the 9%Ni steel are presented in this paper. Chemical composition of the weld metal as well as effects of welding parameters on the weld formation, microstructure and tensile strength is discussed. Filler wire penetration depth as well as character of its distribution in the narrow laser welds was examined using EPMA - electron probe microanalysis.

Keywords: cryogenic steel, laser welding, microstructure, hardness, tensile strength.

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

УДК 621.791

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ,
ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДАМИ ГАЗОПОРОШКОВОЙ И
СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ**

© 2016 Т.А. Литвинова, А.А. Мецлер, Р.В. Пирожков

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

Данная работа является продолжением исследований защитных покрытий, выполненных методом газопорошковой наплавки и сверхзвуковой газопорошковой наплавки с целью изучения способности материала сопротивляться воздействию абразивных частиц. Для этого были выполнены сравнительные исследования наплавленных сплавов на сопротивление механическому изнашиванию. Образцы с наплавленным покрытием вырезались, согласно требованиям, прямоугольной формы размером 4 x 5 x 10 мм, с материалом наплавки толщиной $h_{1,2}=1,0-1,2$ мм и $h_{3,4}=1,5-1,7$ мм на торце. Эталонные образцы – предварительно закаленные по стандартной методике (нагрев до 850 °С, выдержка 2 мин, охлаждение; твердость при закалке в воде HRC 62, в масле HRC 54).

Статическая нагрузка на образец с данной площадью составляла 8,75 кг/см². Величина весового износа ΔU определялась взвешиванием до и после испытаний на лабораторных аналитических весах с точностью $2 \cdot 10^{-4}$ г (тип ВЛР-200). После каждого испытания образцы снимали, промывали, сушили. Испытания проводили при постоянной нагрузке $P = 400$ г.

При прочих равных условиях проведения испытаний образцы с предварительно проведенной сверхзвуковой газопорошковой наплавкой, обладают наилучшим сопротивлением абразивному износу, как результат, потеря массы образца в 3 раза меньше, чем в образце газопорошковой наплавки.

Исследования износостойкости в наплавленном покрытии, выполненные методами газопорошковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки выявили, что предпочтительным методом, изготовления образцов является сверхзвуковая газопорошковая наплавка.

Ключевые слова: сверхзвуковая газопорошковая наплавка, износостойкость, защитные покрытия, дозвуковая газопорошковая наплавка, абразивные частицы, оборудования атомных станций.

Поступила в редакцию 10.03.2016 г.

Условия эксплуатации технологического оборудования атомных станций характеризуются высокими тепловыми и механическими нагрузками, сопровождающимися воздействием агрессивных сред и приводящими к интенсивному износу рабочих поверхностей деталей, что, несомненно, является фактором повышенного риска возникновения техногенных катастроф. Поверхностные дефекты, вызванные абразивным износом или действием агрессивной рабочей среды, приводят к потере работоспособности деталей и выходу из строя оборудования в целом. Таким образом, качественное состояние поверхностного слоя деталей является

одним из превалирующих показателей надёжности и долговечности работы оборудования.

Наряду с традиционными методами восстановления деталей, такими как плазменная и электродуговая наплавки, в последнее время всё более активно развивается газопорошковая (ГПН) и сверхзвуковая газопорошковая (СГПН) наплавки, успешная применимость и экономическая эффективность которых показаны в [1, 2].

В работах [3-4] рассмотрены комплексные металлографические исследования структуры и свойств защитных покрытий, выполненных методом газопорошковой наплавки (ГПН) и сверхзвуковой газопорошковой наплавки (СГПН). Данная работа является продолжением исследований с целью изучения способности материала сопротивляться воздействию абразивных частиц. Для этого были выполнены сравнительные испытания наплавленных сплавов на сопротивление механическому изнашиванию.

Для исследований была подготовлена серия образцов, состоящих из основного материала и покрытий с различной толщиной ($h = 1,0-1,2$ мм; $h = 1,5-1,7$ мм), выполненные методами газопорошковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки [5].

В качестве основного материала использовали порошковую сталь, полученную методом электроконтактного уплотнения (ЭКУ). Методика проведения ЭКУ и лабораторная установка описаны в [6-10]. Наплавочный материал у образцов использовался самофлюсующийся сплав ПГ-СРЗ.

Испытания образцов на износостойкость проводились согласно ГОСТ 17367-71. Для исследования износостойкости наплавленных покрытий была выбрана схема изнашивания неподвижно-закрепленными частицами.

В качестве абразивного материала использовалась абразивная шкурка 6-Н 14А ГОСТ 13344-79. Для оценки характеристик покрытия, использовалась универсальная установка МИ-1М.

Образцы с наплавленным покрытием вырезались, согласно требованиям, прямоугольной формы размером 4 x 5 x 10 мм, с материалом наплавки толщиной $h_{1,2} = 1,0-1,2$ мм, $h_{3,4} = 1,5-1,7$ мм на торце. Эталонные образцы, предварительно закаленные по стандартной методике (нагрев до 850 °С, выдержка 2 мин, охлаждение; твердость при закалке в воде HRC 62, в масле HRC 54).

Статическая нагрузка на образец с данной площадью должна составлять 8,75 кг/см².

Величина весового износа ΔU определялась взвешиванием до и после испытаний на лабораторных аналитических весах с точностью $2 \cdot 10^{-4}$ г (тип ВЛР-200). После каждого испытания образцы снимали, промывали, сушили.

Исследовали износостойкость дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавки. Испытания проводили при постоянной нагрузке $P = 400$ г.

Результаты исследований представлены на графики зависимостей износа металла от времени.

Из графика зависимости износа металла от времени, видно, что при равных условиях испытания о жестко закрепленные абразивные частицы образец сверхзвуковой газопорошковой наплавки, обладает наилучшими характеристиками износостойкости, поэтому потеря массы образца СГПН в 3 раза меньше потери массы образца ГПН.

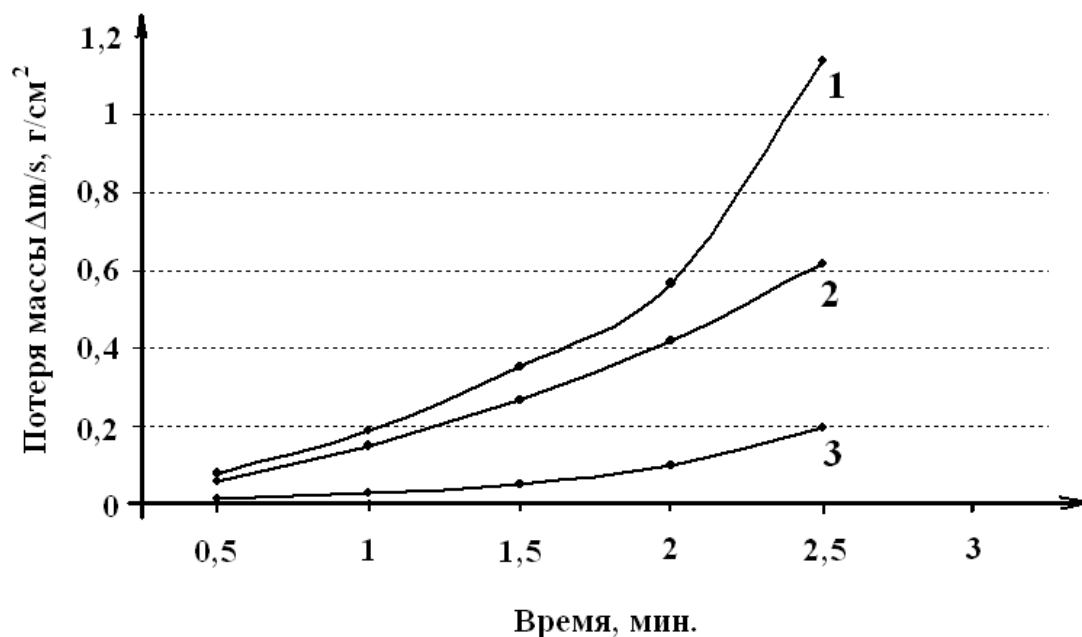


Рис. 1. — Графики зависимости износа металла от времени:
1 — сталь 45; 2 — ГПН; 3 — СППН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц, А.Г. и др. Технологические процессы лазерной обработки [Текст] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров : учеб. пособие для вузов. Под ред. А.Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. — 664 с.
2. Киселев, В.С. Повышение износостойкости наплавленных покрытий путём выбора рациональных технологических параметров на основе диагностики сверхзвуковых газопорошковых струй : автореф. дис. канд. техн. наук [Текст] / В.С. Киселев. — Барнаул: Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова, 2009. — 21 с.
3. Литвинова, Т.А. и др. Металлографические исследования структуры защитных покрытий, выполненных методом газопорошковой наплавки [Электронный ресурс] / Т.А. Литвинова, Д.В. Могилевский, Н.Н. Подрезов, С.Н. Егоров, Р.В. Пирожков // Инженерный вестник Дона : сетевой журн. — 2014. — №3. — Режим доступа: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2454 — 10.03.2016.
4. Литвинова, Т.А. и др. Исследование структуры защитных покрытий, выполненных методом сверхзвуковой газопорошковой наплавки [Текст] / Т.А. Литвинова, Д.В. Могилевский, Е.И. Колоколов, А.А. Мецлер, Н.Н. Подрезов // Глобальная ядерная безопасность. — 2014. — №3(12). — С. 61–64.
5. Литвинова Т.А., Постой Л.В., Мецлер А.А., Могилевский Д.В. Определение карбидной составляющей защитных покрытий, выполненных дозвуковой и сверхзвуковой газопорошковой наплавкой [Электронный ресурс] / Т.А. Литвинова, Л.В. Постой, А.А. Мецлер, Д.В. Могилевский // Инженерный вестник Дона. — 2015. — №2. — Ч. 2. — Режим доступа: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2873 — 10.03.2016.
6. Литвинова, Т.А. и др. Закономерности уплотнения и гомогенизации порошковой стали при ее формировании методом электроконтактного уплотнения [Электронный ресурс] / Т.А. Литвинова, С.Н. Егоров, Г.А. Шуваев, Х.К. Ризаев // Инженерный вестник Дона. — 2015. — №1. — Режим доступа: URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2792 — 10.03.2016.
7. Litvinova T.A., Egorov S.N. The influence of production modes of the electrocontact compaction on the porosity of the powder steel. Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2011, Vol. 52, №1, ISSN: 1067-8212, DOI: 10.3103/S1067821211010135, pp. 101–102.
8. Litvinova T.A., Egorov S.N. Features of powder steel formation with electric-contact compaction // Metallurgist. 2013, Vol. 57, №3–4, ISSN 0026-0894, DOI: 10.1007/s11015-013-9735-8, pp. 342–345.
9. Litvinova T.A., Egorov S.N. Mechanical properties of powder steel prepared by electrical contact compaction // Metallurgist. 2010, Vol. 54, №1–2, ISSN 0026-0894, DOI: 10.1007/s11015-010-9254-9, pp. 57–61.

10. Litvinova T.A., Egorov S.N. Effect of Iron Powder Preparation Method on Powder Steel Compact Formation During Electric-Contact Compaction // *Metallurgist*. 2015, Vol. 59, №1, ISSN 0026-0894, DOI: 10.1007/s11015-015-0090-9, pp. 57-60.

REFERENCES

- [1] Grigoryants A.G., Shiganov I.N., Misyurov A.I. Tekhnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki [Process laser machining processes]: uchebnoe posobie dlya vuzov [Textbook for High Schools]. Pod redaktsiei A.G. Grigoryantsa [Edited by A.G. Grigoryants]. M. Pub. MGTU im. N.E. Baumana [Publishing house of the Bauman MSTU], 2006, ISBN 5-7038-2701-9, 664 p. (in Russian)
- [2] Kiselev V.S. Povyshenie iznosostoykosti naplavlennykh pokrytiy putem vybora ratsionalnykh tekhnologicheskikh parametrov na osnove diagnostiki sverkhzvukovykh gazoporoshkovykh struy [Increased wear resistance of coatings deposited by a choice of rational technological parameters on the basis of diagnostics of supersonic jets of gas-powder]: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [PhD thesis abstract in Engineering]. Barnaul. Pub. Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet imeni I.I. Polzunova [Polzunov Altai State Technical University], 2009, 21 p. (in Russian)
- [3] Litvinova T.A., Mogilevskiy D.V., Podrezov N.N., Egorov S.N., Pirozhkov R.V. Metallograficheskie issledovaniya struktury zashchitnykh pokrytiy, vpolnennykh metodom gazoporoshkovoy naplavki [Metallurgical studies of the structure of protective coatings made by the method of gas-powder cladding] // *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering bulletin of Don], 2014, №3, ISSN 2073-8633. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2454> (in Russian)
- [4] Litvinova T.A., Mogilevskiy D.V., Kolokolov E.I., Metsler A.A., Podrezov N.N. Issledovanie struktury zashchitnykh pokrytiy, vpolnennykh metodom sverkhzvukovoy gazoporoshkovoy naplavki [Investigation of the structure of protective coatings, performed by the supersonic gas-powder cladding]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global nuclear safety]. 2014, №3(12), ISSN 2305-414X, pp. 61–64. (in Russian)
- [5] Litvinova T.A., Postoy L.V., Metsler A.A., Mogilevskiy D.V. Opredelenie karbidnoy sostavlyayushchey zashchitnykh pokrytiy, vpolnennykh dozvukovoy i sverkhzvukovoy gazoporoshkovoy naplavkoy [Determination of the carbide component coatings made subsonic and supersonic gas-powder surfacing]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering bulletin of Don]. 2015, №2, Chast 2 [Part 2], ISSN 2073-8633, Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/2873> (in Russian)
- [6] Litvinova T.A., Egorov S.N., Shuvaev G.A., Rizaev Kh.K. Zakonomernosti uplotneniya i gomogenizatsii poroshkovoy stali pri ee formirovaniy metodom elektrokontaktного uplotneniya [Laws of consolidation and homogenization of powder steel at its formation by electric-seal]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering bulletin of Don]. 2015, №1, ISSN 2073-8633, Available at: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2792> (in Russian)
- [7] Litvinova T.A., Egorov S.N. The influence of production modes of the electrocontact compaction on the porosity of the powder steel. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2011, Vol. 52, №1, ISSN 1067-8212, DOI: 10.3103/S1067821211010135, pp. 101–102. (in English)
- [8] Litvinova T.A., Egorov S.N. Features of powder steel formation with electric-contact compaction // *Metallurgist*. 2013, Vol. 57, №3–4, ISSN 0026-0894, DOI: 10.1007/s11015-013-9735-8, pp. 342–345. (in English)
- [9] Litvinova T.A., Egorov S.N. Mechanical properties of powder steel prepared by electrical contact compaction // *Metallurgist*. 2010, Vol. 54, №1–2, ISSN 0026-0894, DOI: 10.1007/s11015-010-9254-9, pp. 57–61. (in English)
- [10] Litvinova T.A., Egorov S.N. Effect of Iron Powder Preparation Method on Powder Steel Compact Formation During Electric-Contact Compaction // *Metallurgist*. 2015, Vol. 59, №1, ISSN 0026-0894, DOI: 10.1007/s11015-015-0090-9, pp. 57–60. (in English)

Study of Wear-Resistance Coatings Obtained by Means of Supersonic Gas-powder and Gas-powder Surfacing

T.A. Litvinova, A.A. Metsler, R.V. Pirozhkov

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

* e-mail: bratsk_tanja@mail.ru ; ** e-mail: razvitie@zao-grant.ru ;

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

Abstract – This work is continuation of researches of coatings made by the method of gas-powder surfacing and a supersonic gas-powder surfacing for the purpose of studying the ability of a material to resist the impact of abrasive particles. For this purpose there were performed a comparative study of weld alloys, the resistance to mechanical wear. Deposited coating samples were cut, according to the requirements, of rectangular shape measuring 4 x 5 x 10 mm, with a surfacing material of a thickness $h_{1,2}=1,0-1,2$ mm, and $h_{3,4}=1,5-1,7$ mm at the end. Reference samples were pre-seasoned by the standard method (heating to 850 ° C, exposure time 2 min, cooling; hardness during quenching HRC 62 in water, in oil HRC 54).

The static load on a sample of this size was 8,75 kg/cm². The value of ΔU wear weight was determined by weighing before and after tests on a laboratory analytical balance with an accuracy of $2 \cdot 10^{-4}$ g (type VLR-200). After each test the samples were removed, washed, dried. Tests were carried out at constant load $P = 400$ g.

Under other equal conditions of testing samples from previously conducted a supersonic gas-powder surfacing, have the best resistance to abrasive wear, as a result, the weight loss of the sample is 3 times less than in the sample of gas-powder surfacing.

Study of wear-resistance in the weld coating methods and powder supersonic gas-powder surfacing has revealed that the preferred method, producing samples is a supersonic gas-powder surfacing.

Keywords: supersonic gas-powder surfacing, wear-resistance, protective coatings, subsonic gas-powder surfacing, abrasive particles, equipment of nuclear power plants.

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

УДК 624.04:624.014

**К ВОПРОСУ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ СБОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

© 2016 С.А. Ращепкина

** Балаковский инженерно-технологический институт – филиал ФГАОУ ВПО
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Балаково, Саратовская обл., Россия*

В работе предлагается емкость из стержневых элементов полого поперечного сечения предназначенная для хранения различных веществ АЭС. Рассмотрена устойчивость стержневого элемента на центральное сжатие. Получены выражения для определения критических напряжений стержневых элементов. Показано, что изменение критических напряжений происходит при увеличении коэффициента деформирования полосовых заготовок в процессе создания полого элемента. При этом критические напряжения относительно оси x увеличиваются с увеличением коэффициента раздутья, а критические напряжения относительно оси y заметно уменьшаются. Приводится номограмма показывающая изменение критических напряжений в направлении центральных осей.

Ключевые слова: реконструкция АЭС, металл, ребристая оболочка, полый элемент, расчет, устойчивость.

Поступила в редакцию 10.02.2016 г.

1. ПРЕДПОСЫЛКИ РАСЧЕТА

При проектировании и реконструкции объектов АЭС возникает необходимость в строительстве эффективных металлических цилиндрических емкостей для различных веществ. Известные конструктивные решения емкостей обладают рядом недостатков, поэтому существует потребность в разработке новых конструктивных решений безопасных, надежных и недорогих емкостей. К специфике предлагаемой конструкции цилиндрической емкости следует отнести – сборка ее из полых элементов. В основе создания полого элемента лежит деформация предварительно сваренных между собой по продольным и поперечным кромкам двух полос требуемой ширины и длины. Деформацию полос производят сжатым воздухом, подаваемым через штуцер в пространство между полосами. За счет пластических свойств и конечной изгибной жесткостью стали полосы остаются в деформированном состоянии и после снятия избыточного давления. В результате из плоских заготовок образуется стержневой элемент полого поперечного сечения (рис.1) [1, 2, 4-6].

При действии на цилиндрическую емкость вертикальной сжимающей нагрузки в стержневых полых элементах возникают значительные сжимающие напряжения, которые в сочетании с начальным моментным возмущением и возможными несовершенствами поверхности емкости могут существенно понизить критические сжимающие напряжения, вызвав потерю ее устойчивости. Поэтому для более надёжного проектирования емкостей из полых стержневых элементов методы их расчета нуждаются в совершенствовании. В работе рассматривается расчет и анализ

работы полых элементов на осевое сжатие. Ребристую оболочку емкости можно рассматривать как составную систему, образуемую из отдельно стоящих стержневых полых элементов, закрепленных шарнирно сверху и внизу (рис.1). Здесь t_s – толщина стенки металлического элемента; h_1 и h_2 – соответственно высота и ширина элемента; H (ℓ_s) – длина элемента.

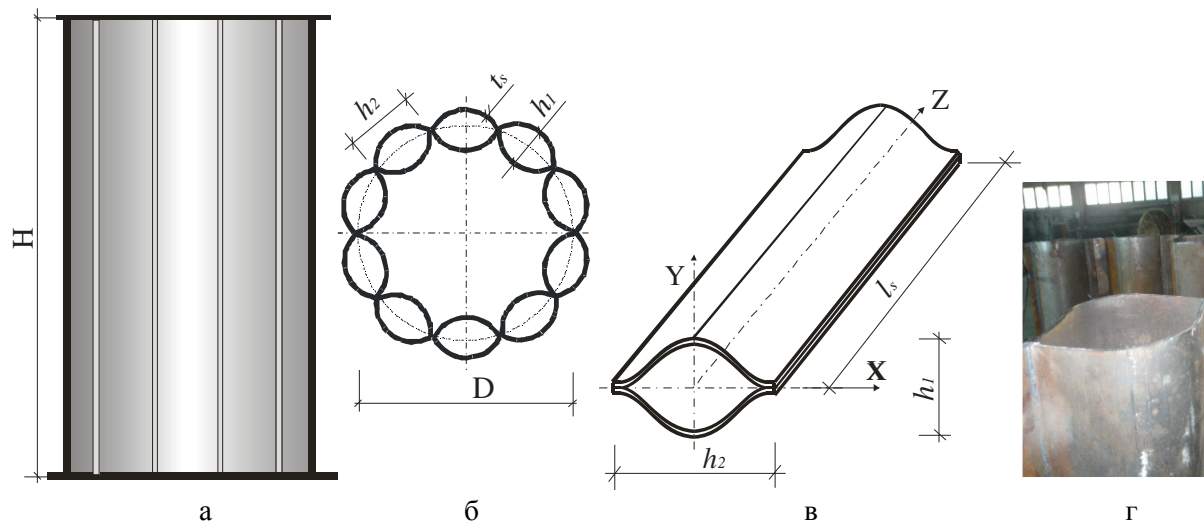


Рис. 1. – Цилиндрическая емкость из сборных полых элементов:
а – общий вид; б – поперечное сечение; в – полый элемент; г – натурный фрагмент

Для длинных оболочек должны соблюдаться условия:

$$\frac{t_s}{h_2} \leq 0,1; \quad \frac{h_2}{\ell_s} \leq 0,1.$$

где ℓ_s – длина полого элемента;

h_1 – высота полого элемента,

$$h_1 = 2k_p h_s / \pi \quad \text{или} \quad h_1 = 2r(1 - \cos \frac{\alpha}{2});$$

$$h_2 \text{ – ширина полого элемента, } h_2 = k_c h_s \quad \text{или} \quad h_2 = 2r \sin \frac{\alpha}{2};$$

α – половина угла раскрытия полого элемента;

h_s – ширина заготовки, из которой сформирован полый элемент;

r – радиус полого элемента;

k_p, k_c – коэффициенты раздутья и сжатия, которыми задаются в зависимости от требуемых размеров полого элемента, $k_p = h_1 \pi / h_s$; $k_c = h_2 / h_s$.

При $t_s = 1 \dots 6$ мм; $h_2 = 300 \dots 15000$ мм; $\ell_s = 6000 \dots 12000$ мм имеем:

$$\frac{t_s}{h_2} = 0,067 \dots 0,02 \ll 0,1; \quad \frac{h_2}{\ell_s} = 0,05 \dots 0,025 \ll 0,1.$$

Таким образом, полые элементы можно отнести к длинным цилиндрическим оболочкам. Рассмотрим устойчивость стержневого полого элемента на центральное сжатие при отсутствии воздействия содержимого (полые элементы и емкость порожние).

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОБЩУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Согласно [3], если задано поперечное сечение тонкостенного стержня, то можно составить выражения для компонентов приведенных нагрузок:

$$\left. \begin{aligned} EI_y \xi^{IV} + P \xi'' + (M_x + a_y P) \theta'' &= 0, \\ EI_x \eta^{IV} + P \eta'' + (M_y - a_x P) \theta'' &= 0, \\ (M_x + a_y P) \xi'' + (M_y - a_x P) \eta'' + EI_y \theta^{IV} + (r^3 P + 2\beta_x M_y - 2\beta_y M_x - GI_d) \theta'' &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\xi = Ae^{kz}$, $\eta = Be^{kz}$, $\theta = Ce^{kz}$;

E – модуль упругости;

G – модуль упругости 2-го рода (модуль сдвига);

I_x и I_y – моменты инерции соответственно относительно осей x и y ;

I_ω – бимомент; для стержней-оболочек, $I_\omega = \int_A x^2 y^2 dA$;

I_d – момент инерции при чистом кручении, $I_d = bt_s^3 / 3$;

r – геометрическая характеристика, $r^2 = a_x^2 + a_y^2 + \frac{I_x + I_y}{A}$.

Рассмотрим случай когда концы стержня имеют шарнирные концы (при этом, концевые сечения закреплены от перемещений в плоскости поперечного сечения и свободны от нормальных напряжений). Для такого стержня граничные условия представляются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } z=0 \quad \xi=\eta=\theta, \quad \xi''=\eta''=\theta''; \\ \text{при } z=\ell_s \quad \xi=\eta=\theta, \quad \xi''=\eta''=\theta'', \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При граничных условиях (2) решение уравнений (1), будет в виде:

$$\xi = A \sin \frac{n\pi z}{\ell_s}, \quad \eta = B \sin \frac{n\pi z}{\ell_s}, \quad \theta = C \sin \frac{n\pi z}{\ell_s}, \quad (3)$$

где A, B, C – постоянные коэффициенты, ($n=1, 2, 3, \dots$).

Если поперечное сечение стержня имеет две симметрии (рис.1,б), то в этом случае центр изгиба совпадает с центром тяжести. Для координат центра изгиба имеем: $a_x = a_y = 0$. Система уравнений (1) распадается на три независимых дифференциальных уравнения:

$$\left. \begin{aligned} EI_y \xi^{IV} + P \xi'' &= 0, \\ EI_x \eta^{IV} + P \eta'' &= 0, \\ EI_\omega \theta^{IV} + (r^2 P - GI_d) \theta'' &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Решение запишется в виде:

$$(P_x - P)(P_y - P)(P_\omega - P) \cdot r^2 = 0.$$

Отсюда для трех критических сил P_1, P_2, P_3 получаем выражения:

$$P_1 = P_x; P_2 = P_y; P_3 = P_\omega. \quad (5)$$

Первые две критические силы совпадают с эйлеровыми силами, третья – соответствует крутильной форме потери устойчивости с центром кручения, совпадающим с центром тяжести сечения. Расчеты и анализ проведенные автором показал, что критические силы кручения P_ω очень велики по сравнению с P_x и P_y , поэтому ими можно пренебречь, так как решающими являются силы изгиба. Если пренебречь кручением, то имеем только эйлеровые критические силы.

Рассматривая симметричное полое поперечное сечение (рис.1,в) используем эйлеровую формулу, причем относительно оси x - x , где жесткость будет меньшей, при этом вводя, поправочные коэффициенты, полученные на основе эксперимента, найдем критическую силу общей устойчивости стержневого полого элемента:

$$P_x = N_{cr} = k_1 k \pi^2 \frac{EI_x}{\ell_s^2}, \quad (6)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от размеров полого элемента;

k – коэффициент, зависящий от длины и вида концов полого стержневого элемента.

Учитывая, что напряжения при центральном сжатии:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A},$$

критические напряжения в безразмерном виде можно представить в виде:

$$\bar{\sigma}_{cr} = \eta \pi^2 \frac{E}{R_y} \cdot \frac{I_x}{\ell_s^2 A}. \quad (7)$$

где $\eta = k_1 \cdot k$ – коэффициент изменения формы полого элемента; согласно экспериментальным данным [4] для практических расчетов можно принять $k_1=0,56$ и $k=0,99$ (при отсутствии плоских концов, когда создание полого элемента выполняется в специальном кондукторе) [5];

R_y – расчетное сопротивление металла по пределу текучести для полого элемента;

I_x – момент инерции сечения стержня полого поперечного сечения, который можно определить по формуле [4]:

$$I_x = n_1 \beta_1 t_s h_s^3. \quad (8)$$

где n_1 и β_1 – коэффициенты, принимаемые по номограмме (рис. 2) составленной автором в зависимости от величины давления сжатого воздуха необходимого для создания полого элемента заданных размеров.

С учетом (8) после преобразований получим:

$$\bar{\sigma}_{cr} = 0,5 \cdot \eta \cdot n_1 \cdot \beta_1 \left(\frac{h_s}{\ell_s} \right)^2 \frac{E}{R_y}. \quad (9)$$

Проведем численный эксперимент с целью выявления влияния геометрических параметров полого элемента и величины давления сжатого воздуха на критические напряжения общей устойчивости (рис.1).

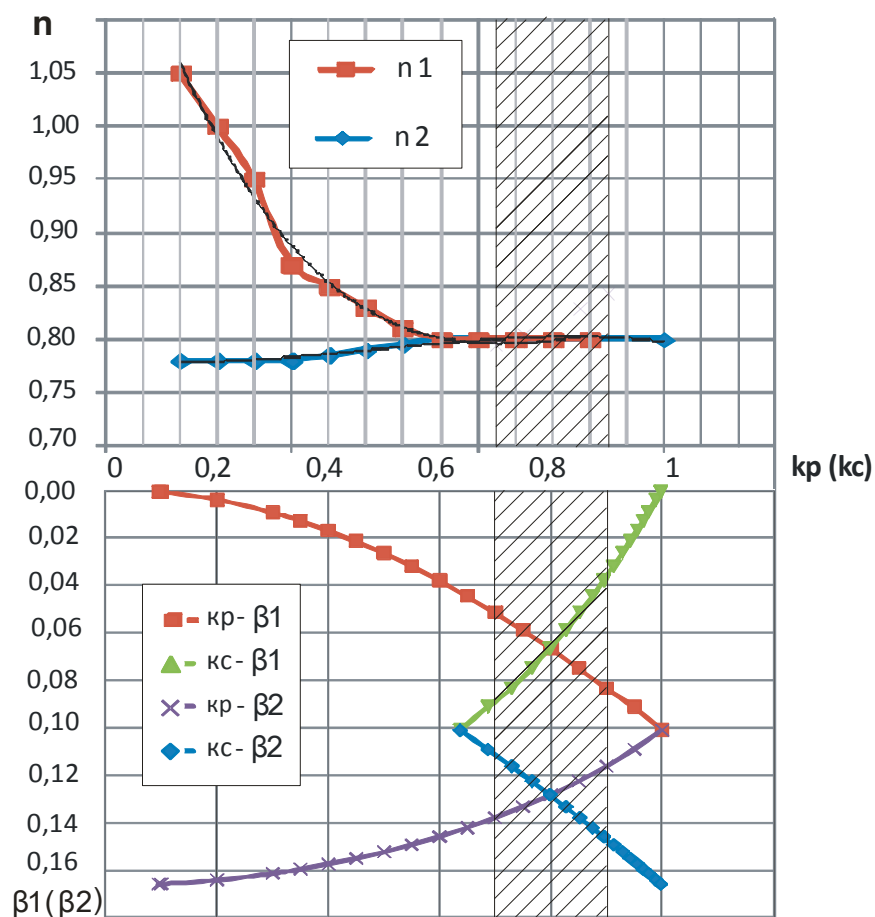


Рис. 2. – Зависимость « $k_p - n - \beta$ »

3. УСТАНОВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВНОЙ ШИРИНЫ ПОЛОС НА КРИТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Пример 1. Требуется найти критические напряжения при следующих исходных данных: модуль упругости стали $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; толщина стенки полого элемента $t_s = 3$ мм; $R_y = 230$ МПа; коэффициент раздутia полого элемента $k_p = 0,8$; условная ширина полос $\bar{h}_s = h_s / \ell_s = 0,01 \dots 0,1$.

Анализ кривых (рис. 3) показал, что с уменьшением $\bar{h}_s$ критические напряжения $\bar{\sigma}_{cr,x}$ заметно увеличиваются, что благоприятно сказывается на работе полого элемента; например, при $k_p = 0,8$ и значениях $\bar{h}_s = 0,04$ и $\bar{h}_s = 0,06$ напряжения соответственно будут: $\bar{\sigma}_{cr,x} = 0,2051$; $\bar{\sigma}_{cr,x} = 0,4613$. Разница составляет 55%.

Полученное уравнение регрессии рекомендуется использовать при определении критических напряжений при заданном соотношении $\bar{h}_s$.

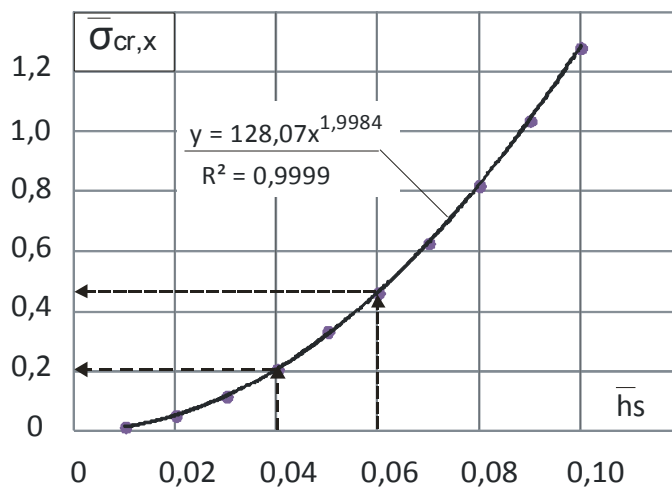


Рис. 3. – Зависимость « $\bar{h}_s - \bar{\sigma}_{cr,x}$ »

По данному графику можно анализировать изменение напряжений в зависимости от соотношения ширины и длины полос, из которых формируется стержневой полый элемент.

4. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЕВОГО ЭЛЕМЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Пример 2. Требуется найти критические напряжения при переменном коэффициенте формообразования (раздутия) $k_p = 0,1 \dots 1,0$ и при $\bar{h}_s = 0,01 - 0,1$. Исходные данные см. пример 1.

Анализ графиков (рис.4) показал:

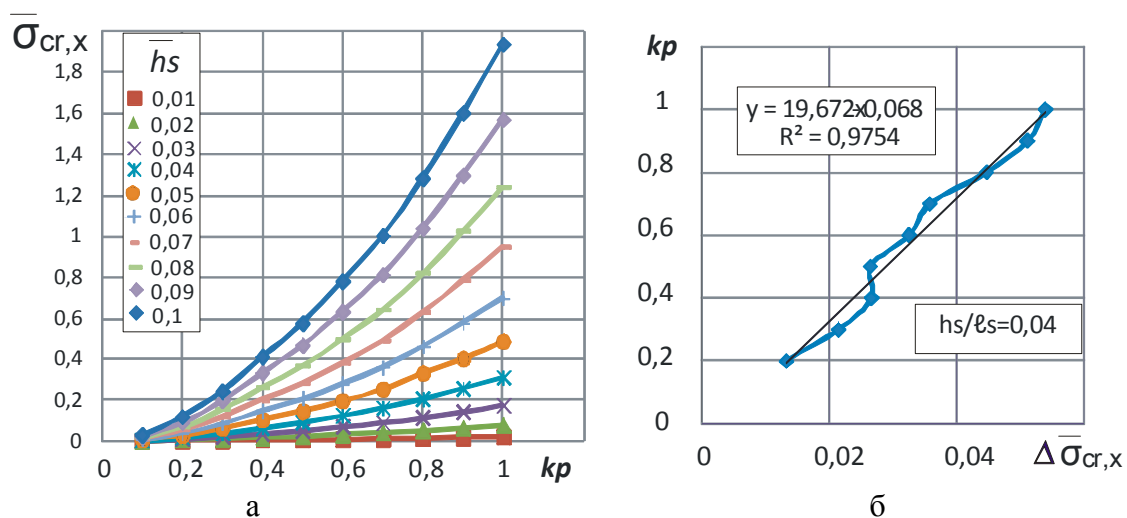


Рис. 4. – Зависимость « $k_p - \bar{\sigma}_{cr,x}$ »

– с увеличением условной ширины стальных полос $\bar{h}_s$ при всех коэффициентах

раздутья критические напряжения $\bar{\sigma}_{cr,x}$ увеличиваются, что свидетельствует о повышении устойчивости стержневого элемента относительно оси x - x ;

– приращения напряжений $\Delta \bar{\sigma}_{cr,x}$ с увеличением коэффициента раздутья возрастают; все графики имеют степенную зависимость с высокой степенью точности (0,99); причем все приращения изменяются по линейной зависимости, например при $\bar{h}_s = 0,04$.

5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСЕЙ x И y

Пример 3. Требуется провести анализ изменения критических напряжений относительно осей x - x и y - y . Исходные данные см. пример 1. Коэффициент раздутья стержневого элемента $k_p = 0,1 \dots 1$.

На рисунке 5 представлены результаты расчета критических напряжений относительно осей x - x и y - y ; расчет велся по программе ВЕТА; из составленной номограммы четко видно:

– с увеличением коэффициента раздутья критические напряжения относительно оси x - x увеличиваются, а критические напряжения относительно оси y - y заметно уменьшаются;

– с увеличением размеров полого элемента наблюдается перераспределение напряжений; при $k_p = 0,9-1$ напряжения оси x и оси y сильно сближаются; как показал натурный эксперимент [5] прочный и устойчивый полый элемент образуется при $k_p = 0,7-0,9$; при этом $h_2 > h_1$; критические напряжения относительно оси y - y всегда будут большими, чем относительно оси x - x , что подтверждают данные графиков.

– при коэффициенте раздутья $k_p = 0,8$ напряжения $\bar{\sigma}_{cr,y}$ в 1,5-2 раза больше, чем $\bar{\sigma}_{cr,x}$ при всех значениях k_p и $\bar{h}_s$.

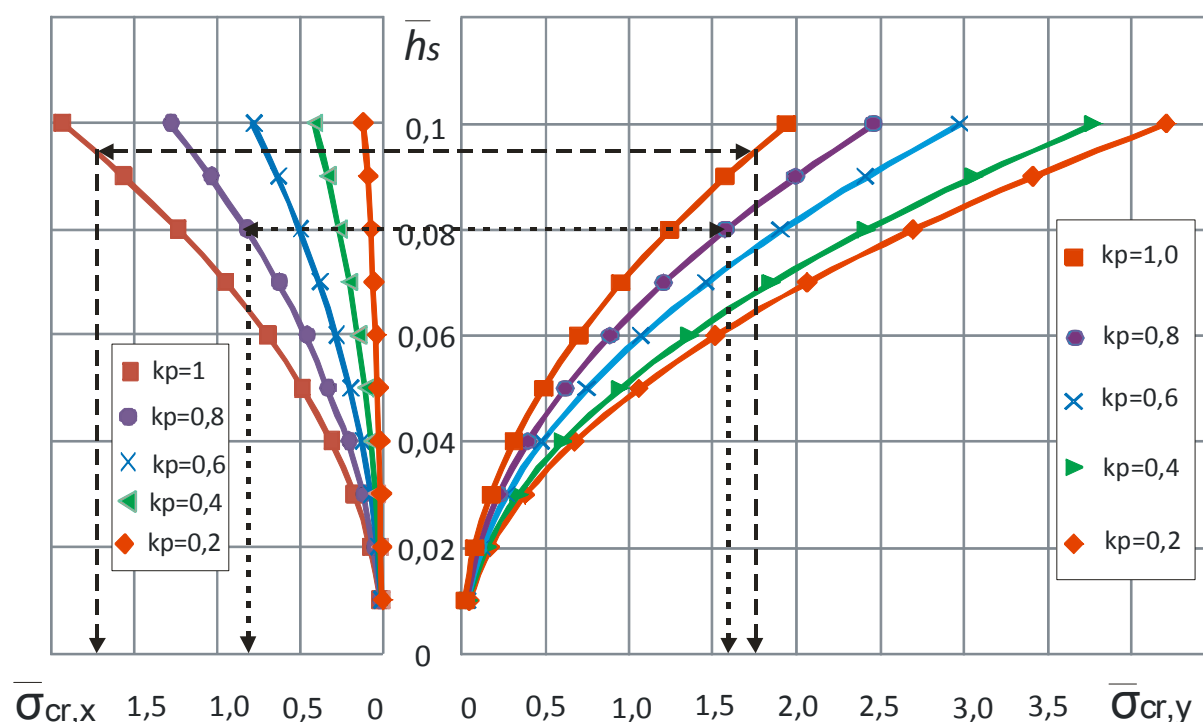


Рис. 5. – Зависимость « $\overline{h_s}$ - $\overline{\sigma}_{cr,x}$ - $\overline{\sigma}_{cr,y}$ »

Представленная номограмма позволяет сравнить величины критических напряжений относительно двух осей при разных коэффициентах раздутия и при различных размерах (ширине и длине) полос из которых создается стержневой элемент.

ВЫВОДЫ

В статье рассмотрена устойчивость стержневого элемента полого поперечного сечения на центральное сжатие. Получены выражения для определения критических напряжений стержневых элементов, из которых собирается сборная цилиндрическая емкость, предназначенная для хранения различных веществ объектов атомной энергетики. Анализ выполненных автором расчетов показал:

– с увеличением условной ширины стальных полос $\overline{h_s}$ при всех коэффициентах раздутия k_p критические напряжения $\overline{\sigma}_{cr,x}$ увеличиваются, то есть устойчивость полого стержневого элемента существенно повышается;

– изменение критических напряжений происходит при увеличении коэффициента раздутия; при этом критические напряжения относительно оси $x-x$ увеличиваются с увеличением коэффициента раздутия, а критические напряжения относительно оси $y-y$ заметно уменьшаются; при коэффициенте раздутия $k_p = 1$ напряжения равны при всех значениях $\overline{h_s}$.

– представленная номограмма позволяет провести анализ устойчивости стержневого элемента при различных его конструктивных параметрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ращепкина, С.А. К вопросу технологии производства новых металлических конструкций [Текст] / С.А. Ращепкина // Вестник МГСУ. – 2009. – Спецвыпуск. – №3. – С. 147–150.
2. Ращепкина, С.А. К вопросу определения параметров формообразования мини-оболочек металлических емкостей [Текст] / С.А. Ращепкина // Вестник гражданских инженеров. – Санкт-Петербург, 2010. – №2. – С. 54–60.
3. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни. Принципы построения технической теории оболочек. Избранные труды. Т. 3. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 507 с.
4. Ращепкина, С.А. и др. Малогабаритные элеваторы из легких металлических конструкций повышенной транспортабельности [Текст] / С.А. Ращепкина, А.П. Денисова. – Саратов: СГТУ, 2002. – 196 с.
5. Ращепкина, С.А. и др. Инновационная технология XXI века – создание и монтаж металлических ребристых емкостей [Текст] / С.А. Ращепкина, А.С. Артемьева, О.А. Борисенк. Коллективная монография: Книга 2. "Архитектура. Строительство. Инженерные системы". – Новосибирск: ООО «СИБПРИНТ», 2012. – Гл.6. – С. 148–172.
6. Ращепкина, С.А. и др. Распределение напряжений в ребристой емкости для хранения различных веществ АЭС [Текст] / С.А. Ращепкина, Л.В. Ботова // Материалы X Международной науч.-практ. конф. «Безопасность ядерной энергетики». – Волгоград: ВИТИ НИЯУ МИФИ. 2014. – С. 30-32.

REFERENCES

- [1] Rashchepkina S.A. K voprosu tekhnologii proizvodstva novykh metallicheskih konstruktсий [Technology of production of new metal structures]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009, Spetsvypusk [Special issue], №3, ISSN 1997-0935, pp. 147–150 (in Russian).
- [2] Rashchepkina S.A. K voprosu opredeleniya parametrov formoobrazovaniya mini-obolochek

- metallicheskikh emkostey [To the question of determining the parameters forming a shell of metal containers]. Bulletin of civil engineers. St. Petersburg, 2010, No. 2, ISSN 1999-5571, pp. 54-60 (in Russian).
- [3] Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie sterzhni. Printsipy postroeniya tekhnicheskoy teorii obolochek [Thin-walled elastic rods. Principles of the technical theory of shells]. Izbrannyye trudy [Selected works]. Vol. 3. M. Pub. Izdatel'svo AN SSSR [USSR Academy of Sciences Publishing House]. 1963, 507 p. (in Russian).
- [4] Rashchepkina S.A., Denisova A.P. Malogabaritnye elevatory iz legkikh metallicheskikh konstruktsiy povyshennoy transportabelnosti [Small elevators made of light metal constructions increased transportability]. Saratov. Pub. SGTU [SSTU], 2002, ISBN 5-7433-1012-2, 196 p. (in Russian).
- [5] Rashchepkina S.A., Artemiev A.S., Borisenko A.O. etc. Innovatsionnaya tekhnologiya XXI veka – sozdanie i montazh metallicheskikh rebristyykh emkostey [The Innovative technology of the XXI century – the creation and installation of ribbed metal containers]. Kniga 2 [Book 2]. Arkhitektura. Stroitel'stvo. Inzhenernyye sistemy [Architecture. Construction. Engineering systems]. Novosibirsk. Pub. OOO "SIBPRINT" [LLC "SIB PRINT"], 2012, Glava 6 [Chapter 6], ISBN 978-5-94301-352-2, pp. 148–172 (in Russian).
- [6] Rashchepkina S.A., Botova L.V. Raspredelenie napryazheniy v rebristoy emkosti dlya khraneniya razlichnykh veshchestv AES [The stress Distribution in corrugated containers for storage of various substances NPP]. Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Bezopasnost yadernoy energetiki» [Mater. X Intern. scientific.-practical. conf. "Nuclear energy safety"]. Volgogradsk. Pub. VITI NIYAU MIPHI [VETI NRNU MEPhI], 2014, ISBN 978-5-9905145-3-9, pp. 30–32 (in Russian).

Stability of Steel Cylindrical Shell Made of Prefabricated Elements

S.A. Rashchepkina

*Balakovo engineering and technological institute the branch of Federal state autonomous educational institution of higher professional education "National Research Nuclear University "MEPhI",
140 Chapaeva St., Balakovo, Saratov region, Russia, 413800
e-mail: Rashh2008@mail.ru*

Abstract – The paper proposes a capacity of a full cross-section of core elements is intended for of various nuclear material storage. The stability of the bar element to a central compression is considered. Expressions to determine the critical stress beam elements are obtained. It is shown that the variation of the critical stress occurs when the coefficient of deformation of strip blanks during the creation of the hollow member is increased. Thus the critical voltages relative to the x-axis increase with the blow-up ratio, the critical voltages relative to the y-axis significantly reduce. Nomogram showing the variation of the critical stress in the direction of the central axes is provided.

Keywords: NPP reconstruction, metal, ribbed shell, the hollow element, calculation, stability.

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

УДК 533.77

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО КИПЕНИЯ С НЕДОГРЕВОМ
НА СОСТОЯНИЕ КИПАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

© 2016 П.А. Пономаренко, М.А. Фролова, Н.Н. Ленивенко

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Крым, Россия

В статье представлены результаты изучения явления пузырькового кипения с недогревом на состояние теплоотдающей поверхности тепловыделяющей элемента в процессе работы реакторной установки с помощью специальной установки. Установка позволяла непрерывно измерять плотность потока тепла от пластин, выполненных из различных материалов к теплоносителю, величину недогрева в ядре потока и пульсации температуры кипящей поверхности.

Ключевые слова: тепловыделяющий элемент, теплоносители, пузырьковое кипение с недогревом, радиоэкологическая безопасность.

Поступила в редакцию 10.02.2016 г.

Самой главной характеристикой атомной энергетической установки является её безопасность и, особенно, радиоэкологическая безопасность. Эта безопасность является функцией надежности и долговечности барьеров на пути распространения радиоактивных веществ от ядерной энергетической установки в целом в окружающую среду. Главным элементом ядерной энергетической установки, генерирующим проникающую радиацию (нейтронное и гамма излучение) и радиоактивные вещества, является активная зона реактора, а в ней ядерное топливо и продукты его деления.

Первым барьером на пути распространения продуктов деления ядерного топлива в окружающую среду является матрица топливной композиции. Вторым и главным барьером на этом пути являются оболочки тепловыделяющих элементов, которые подвергаются воздействию огромного количества физических и химических факторов в процессе работы ядерного реактора, снижающих надежность и долговечность этих оболочек. Оболочки должны сохранить герметичность в течение всей их работы. Третьим барьером на этом пути является контур первичного теплоносителя, состоящий из реактора, парогенератора и трубопроводов, связывающих эти два главных элемента, а также целый ряд систем, подсистем и их элементов, обеспечивающих нормальную безопасную работу первого контура и его составляющих. Главным качеством этого барьера является его герметичность. И четвертым главным барьером является гермозона и её герметичность в целом, а также герметичность её элементов в отдельности.

Настоящая статья посвящена экспериментальным исследованиям одного из физических явлений, которое испытывает оболочка тепловыделяющего элемента в процессе работы реакторной установки, явлению теплопередачи от оболочки к теплоносителю и некоторыми особенностями этого процесса.

В многочисленной литературе указано, что теплопередача от теплопередающей поверхности к теплоносителю (воде) может осуществляться путем кипения на этой

поверхности и без него. При этом замечено, что, если подогрев теплоносителя (вода) в активной зоне не превышает 20°C , кипение на поверхности тепловыделяющих элементов отсутствует, если подогрев теплоносителя превышает 30°C , поверхностное пузырьковое кипение с недогревом в ядре потока, как правило, имеет место. Кроме того, продолжительность работы оболочек без их разгерметизации в первом случае превышает 12000 часов, во втором – не превышает ≈ 7500 часов [1]. Этот факт наводит на мысль о неблагоприятном влиянии пузырькового кипения с недогревом на состояние теплоотдающей поверхности.

В Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности была создана экспериментальная установка (рисунок 1) для изучения именно этого влияния.

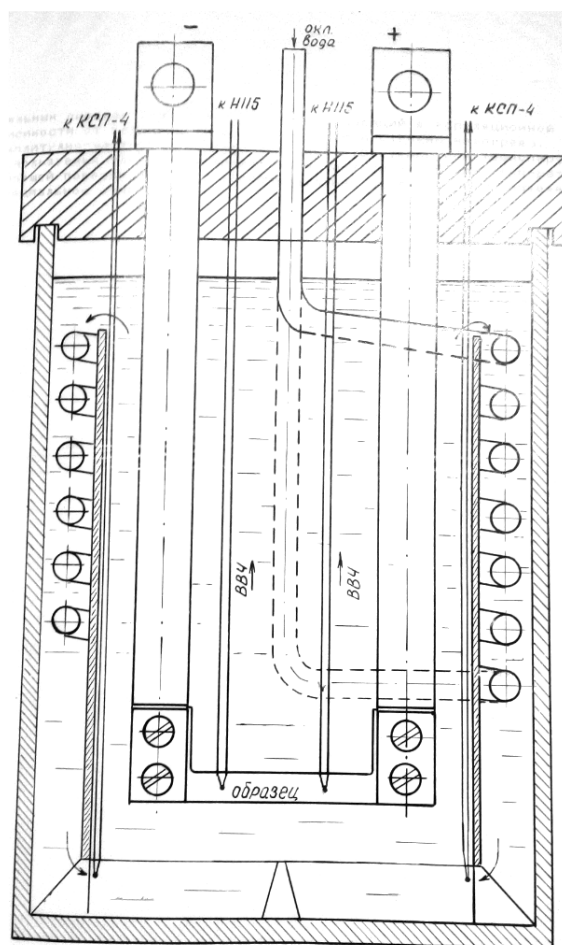


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка размещена в специальном шкафу. Она состоит из цилиндрического стеклянного сосуда, выполненного из кварцевого стекла. Внутри этого сосуда на крестовине из титанового сплава помещается обечайка из кварцевого стекла. В кольцевом зазоре между стенками сосуда и внутренней обечайкой помещен змеевик – холодильник, изготовленный из красномедной трубки. Концы трубок змеевика проходят через стеклотекстолитовую крышку, которой закрывается наружный сосуд. К трубкам змеевика шлангами подсоединяются напорный водопровод и слив. Внутри обечайки помещен образец из стали, на котором организуется поверхностное пузырьковое кипение. К образцу по медным тоководам, закрепленным в стеклотекстолитовой крышке, подводится постоянный электрический ток. В установку

наливается вода высокой чистоты, циркуляция которой осуществляется за счет естественной циркуляции: внутри обечайки вода поднимается вверх до перелива через ее верхний срез, омывая горизонтально расположенный образец, на котором организовано кипение. В верхней части кольцевого зазора, соприкасаясь со змеевиком, вода охлаждается и опускается вниз. Через пространство, образованное между днищем сосуда и нижним срезом обечайки с помощью крестовины, вода поступает во внутреннюю полость обечайки. Далее цикл повторяется.

Установка позволяла при атмосферном давлении организовать пузырьковое кипение с различным по величине недогревом на пластинчатых образцах из различных материалов, которые могут быть использованы и уже используются для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов. Это были нержавеющие стали марок 18 Н10Т, Х16Н15МЗБ, Х16Н15МЗТ.

Нагрев пластин осуществлялся постоянным током. Система позволяла измерять непрерывно плотность потока тепла от пластины к теплоносителю, величину недогрева в ядре потока и пульсации температуры кипящей поверхности. Поверхность кипения перед началом обследовалась экспертом - металловедом под металловедческим микроскопом с 160 кратным увеличением. После 30-часового режима кипения воды высокой чистоты (сухой остаток не более 1 мг/л), поверхность кипения обследовалась повторно при том же увеличении. Некоторые результаты проведенных экспериментов и их анализ приводятся ниже в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты экспериментов изменения кипящей поверхности сталей

Образец из стали Х18Н10Т									
Исходное состояние поверхности: рельеф из мелких язвочек и редких рисок				Состояние поверхности после кипения при $q=150\text{кВт/м}^2$, время кипения 30часов, рельеф язвочек и рисок, появление ореола в виде концентрических колец вокруг язвочек, рельефность ореола 2-4мкм					
Размер язвочек - диаметр, мкм	Глубина самых больших язвочек, мкм	Плотность язвочек, шт/см ²	Микротер-дость металла	Размер язвочек - диаметр, мкм	Глубина самых больших язвочек, мкм	Плотность язвочек, шт/см ²	Плотность язвочек с ореолом, шт/см ²	Микротвердость	
								Основной материал	В ямке (язвочке)
3-5	5-7	≈400	196	3-120	5-10	≈2000	130	206	221
Образец из стали Х16Н15МЗБ									
Исходное состояние поверхности: рельеф из мелких язвочек и редких рисок				Состояние поверхности после кипения при $q=150\text{кВт/м}^2$, время кипения 30часов, рельеф язвочек и рисок, большинство язвочек кратерообразной формы					
Размер язвочек в плане – диаметр, мкм	Глубина самых больших язвочек, мкм	Плотность язвочек, шт/см ²	Микротердосьть металла	Размер язвочек – диаметр, мкм	Глубина самых больших кратеров, мкм	Плотность кратеров, шт/см ²	Микротвердость		
							Основной материал	Дно кратера	
3-25	3-5	≈300	145	3-60	5-10	≈400	204	253	
Образец из стали Х16Н15МЗТ									
Исходное состояние поверхности: рельеф из язвочек и остроконечных бугорков от выпавших включений						Состояние поверхности после кипения при $q=190\text{кВт/м}^2$, $t=32$ часа, рельеф канавок и бугорков			
Размер язвочек – диаметр, мкм	Плотность язвочек, шт/см ²	Диаметр бугорков у основания, мкм	Плотность бугорков, шт/см ²	Микротердосьть металла	Диаметр бугорков у основания, мкм	Плотность бугорков, шт/см ²	Микротвердость основного металла		
15	45	10	≈1000	160	45	450	194		

Анализ процесса пузырькового кипения с недогревом в ядре потока:

1) Образование межфазной поверхности на поверхности кипения носит взрывной характер и сопровождается микроударными волнами гидравлического характера, то есть имеют место процессы аналогичные кавитационным [3-7].

2) В центре ножки пузыря имеет место всплеск температуры поверхности кипения по сравнению с поверхностью в контакте с водой, после отрыва пузырька пара температура поверхности под ножкой пузырька падает и снова поднимается или на этом месте снова образуется пузырек пара с ножкой [2].

3) Температура кипящей поверхности носит пульсирующий (колебательный) характер [2], следовательно, поверхность подвергается температурным напряжениям колебательного характера, что может привести к температурной усталости кипящей поверхности и появлению на ней в защитной окисной пленке трещин (рисунок 2). Частота и амплитуда колебаний температуры поверхности зависит от тепловой нагрузки поверхности.

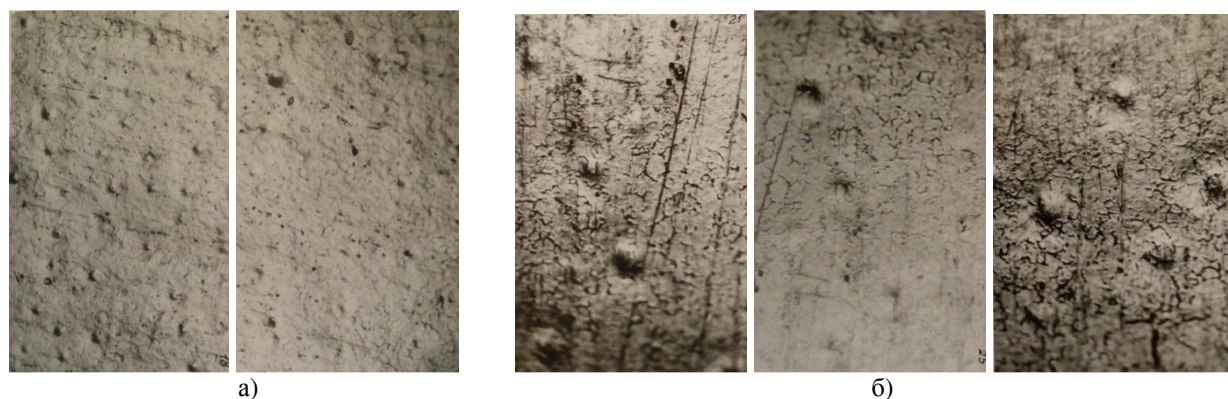


Рис. 2. – Состояние образца исходное (а) и повреждаемость после испытаний (б)

4) Отрыв парового пузыря от поверхности кипения сопровождается гидравлическим ударом в точке-центре ножки оторвавшегося пузыря, появление твердости на дне образовавшегося кратера тому доказательство [8-11].

5) Конденсация парового пузыря в недогретом ядре потока жидкости сопровождается гидравлическим ударом в точке, ударная волна которого по-видимому сферической формы распространяется в кипящей среде, приводит к раннему схлопыванию других паровых пузырьков и в конечном счете, повышая твердость всей поверхности кипения (явление наклепа) [12-14].

ВЫВОДЫ

1) Во всех случаях приведенных примеров повышается микротвердость кипящей поверхности и основного металла, и дна кратера, и ямки.

2) Плотность образования ямок и кратеров на кипящей поверхности растет от времени кипения и величины недогрева.

3) Размеры ямок и кратеров на кипящей поверхности увеличиваются от длительности кипения.

4) Появление ореола вокруг ямок в виде концентрических колец можно в первом приближении объяснить изменениями в кристаллической решетке металла или окисной пленки, которые связаны с микрогидроударами и нестационарной пульсацией температуры на кипящей поверхности под ножкой пузыря и после его отрыва.

5) Плотность бугорков на кипящей поверхности снижается, а их диаметр у

основания растет.

6) Плотность дефектных образований растет при увеличении тепловой нагрузки, величины недогрева и времени кипения.

7) Плотность возникающих неоднородностей поверхности кипения и их величина способствуют возникновению коррозионных процессов электрохимического характера, что вместе с особенностями тепловых и гидравлических процессов отрицательно влияет на долговечность и надежность самой поверхности кипения. Эти явления приобретают особую значимость, если они имеют место на оболочках тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, так как способствуют более раннему растрескиванию (потере герметичности) оболочек, и выходу высокорadioактивных осколков – продуктов деления ядерного топлива в контур первичного теплоносителя, значительно увеличивая его удельную активность, что, в конечном счете, может привести к невозможности эксплуатации ядерной энергетической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головизнин, А.М. и др. Судовые ядерные энергетические установки [Текст] / А.М. Головизнин, В.А. Кузнецов, Б.Г. Пологих, А.К. Следзюк, Н.С. Хлопкин, Л.С. Циганков – М.: Атомиздат, 1976. – 375 с.
2. Исаченко, В.П. и др. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сухомел. – М.-Л.: Издательство «Энергия», 1965. – 423 с.
3. Rayleigh, Lord (Strutt J.W.) On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *Phil. Mag.*, 1917, Vol. 34, pp. 94–98.
4. Cook S. Erosion by water hammer. *Proc. Roy. Soc.*, 1928, Vol. 119A.
5. Silver R.S. Theory of stress due to collapse of vapourbubbles in a liquid. *Engineering*, 1942, Vol. 154, p. 501.
6. Trilling L. The collapse and rebound of a gas bubble. “*Journ. Appl. Phys.*”, 1950, Vol. 23, pp. 14–17.
7. Рождественский В.В. Кавитация [Текст] / В. В. Рождественский. – Л.: «Судостроение», 1977. – 247 с.
8. Poritaky H. The collapse or growth of spherical bubble or cavity in a viscous fluid. *Proc. First U.S. Natl. Congr. Appl. Mech. (ASME)*, 1952, pp. 813–821.
9. Harrison M. An experimental study of single bubble cavitation noise. *DTMB Rept 815*, 1952.
10. Cutton G.W. Photoelastic study of strain waves caused by cavitation. *Calif. Inst. of Tech. Hydrodyn. Lab. Rept 21-21*, 1955.
11. Shulter N.D., Mesler R.B. A photographic study of the dynamics and damage capabilities of bubble collapsing near solid boundaries. “*Trans. Am. Soc. Mech. Engrs Journ. Basic Engng*”. 1961, Vol. 83, p. 648.
12. Benjamin T.B., Ellis A.T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries, *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 1966, vol. 260, p. 221.
13. Gibson D.C. Cavitation adjacent to plane boundaries. *Conf. on Inst. Engrs, Australia, on Hydraulics and Fluid Mechanics*, 1968, p. 210.
14. Brunton J.H. The deformation of solids by cavitation and drop impingement // Неустановившиеся течения воды с большими скоростями. Труды Международного симпозиума в Ленинграде 22-26 июня 1971 г. – М.: «Наука», 1973. – С. 139–151.

REFERENCES

- [1] Goloviznin A.M., Kuznecov V.A., Pologih B.G., Sledzjuk A.K., Hlopkin N.S., Cigankov L.S. *Sudovye jadernye jenergeticheskie ustanovki* [Ship nuclear power plants]. M. Pub. Atomizdat [Atomizdat], 1976. – 375 p. (in Russian)
- [2] Isachenko V.P., Osipova V.A., Suhomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. M. Leningrad. Pub «Jenergija» [Energy], 1965. – 423 p. (in Russian)
- [3] Rayleigh, Lord (Strutt J.W.) On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *Phil. Mag.*, 1917, Vol. 34, pp. 94–98. (in English)
- [4] Cook S. Erosion by water hammer. “*Proc. Roy. Soc.*”, 1928, Vol. 119A. (in English)
- [5] Silver R.S. Theory of stress due to collapse of vapourbubbles in a liquid, *Engineering*, 1942, Vol. 154, p. 501. (in English)

- [6] Trilling L. The collapse and rebound of a gas bubble. "Journ. Appl. Phys.", 1950, Vol. 23, pp. 14–17. (in English)
- [7] Rozhdestvenskij V.V. Kavitacija [Cavitation]. – Leningrad. Pub. «Sudostroenie» [Shipbuilding], 1977, 247 p. (in Russian)
- [8] Poritaky H. The collapse or growth of spherical bubble or cavity in a viscous fluid. Proc. First U.S. Natl. Congr. Appl. Mech. (ASME), 1952, pp. 813–821. (in English)
- [9] Harrison M. An experimental study of single bubble cavitation noise. DTMB Rept 815, 1952. (in English)
- [10] Cutton G.W. Photoelastic study of strain waves caused by cavitation. Calif. Inst. of Tech. Hydrodyn. Lab. Rept 21–21, 1955. (in English)
- [11] Shulter N.D., Mesler R.B. A photographic study of the dynamics and damage capabilities of bubble collapsing near solid boundaries. "Trans. Am. Soc. Mech. Engrs Journ. Basic Engng". 1961, Vol. 83, p. 648. (in English)
- [12] Benjamin T.B., Ellis A.T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries, Phil. Trans. Roy. Soc. A, 1966, Vol. 260, p. 221. (in English)
- [13] Gibson D.C. Cavitation adjacent to plane boundaries. Conf. on Inst. Engrs, Australia, on Hydraulics and Fluid Mechanics, 1968, p. 210. (in English)
- [14] Brunton J.H. The deformation of solids by cavitation and drop impingement. Neustanovivshiesja techenija vody s bolshimi skorostjami [Unsteady flow of water at high speeds]. Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma v Leningrade 22-26 ijunja 1971 g. [Materials of the International Symposium in Leningrad, 22-26 June 1971] M. Pub. «Nauka» [Science], 1973, pp. 139–151. (in Russian)

Influence of Surface Boiling at Underheating on Boiling Area State

P.A. Ponomarenko, M.A. Frolova, N.N. Lenivenko

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

Abstract – Results of study of nucleate boiling phenomenon with underheating on a status of the heatgiving surface of the heat-generating part of an element during reactor installation by means of special apparatus are provided. The apparatus allowed to measure heat flux density continuously from the plates made from different materials to the heat carrier, value of underheating in flow core and temperature pulsation of the boiling surface.

Keywords: the heat-generating element, heat carriers, underheating nucleate boiling with, radio ecological safety.

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

УДК 621.791.1

**АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ
ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

© 2016 А.М. Тупицын* **, Э.А. Гладков**, А.В. Чернов***

** ООО «СВАРБИ», Москва, Россия*

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

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

В статье проведен анализ технологических возможностей современных способов автоматической сварки крупногабаритных тонкостенных изделий ответственного назначения из алюминиевых сплавов.

Рассмотрены виды, достоинства и недостатки, типы дефектов, которые появляются при использовании дуговых, фрикционных, лазерных и гибридных методов.

По результатам анализа выбран наиболее оптимальный и рациональный способ сварки.

Ключевые слова: автоматическая сварка, сварка алюминия, сварка крупногабаритных тонкостенных изделий, дуговая сварка, фрикционная сварка, лазерная сварка, гибридная сварка.

Поступила в редакцию 02.02.2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

Алюминиевые сплавы относятся к трудносвариваемым материалам. Высокая теплопроводность, теплоемкость и скорость охлаждения, склонность к образованию пор и горячих трещин [1], наличие оксидной пленки усложняют процесс получения качественных соединений.

Тем не менее, алюминиевые сплавы применяются во многих отраслях промышленности: авиационной, авиакосмической, транспортной и др., так как имеют весьма малую плотность, практически сравнимы по удельной прочности с другими конструкционными сталями и сплавами, обладают высокой коррозионной стойкостью и жаропрочностью [2].

При изготовлении ответственных конструкций из алюминиевых сплавов (особенно крупногабаритных) важно уделить внимание к выбору оптимального способа сварки, способного компенсировать негативные свойства алюминиевых сплавов, а также обеспечить получение прочного бездефектного соединения с сохранением геометрии конструкции.

Помимо этого, необходимо оценить возможность и простоту механизации и автоматизации процесса, так как обеспечение высокой производительности в большинстве случаев является важным критерием при выборе способа, а снижение

влияния человеческого фактора в сварочном процессе позволит уменьшить вероятность появления дефектов.

Изучение литературных источников показало, что существует множество способов сварки алюминиевых сплавов: дуговые, фрикционные (трением), лазерные, гибридные, которые могут быть использованы при сварке различных конструкций из алюминиевых сплавов (Рис. 1).

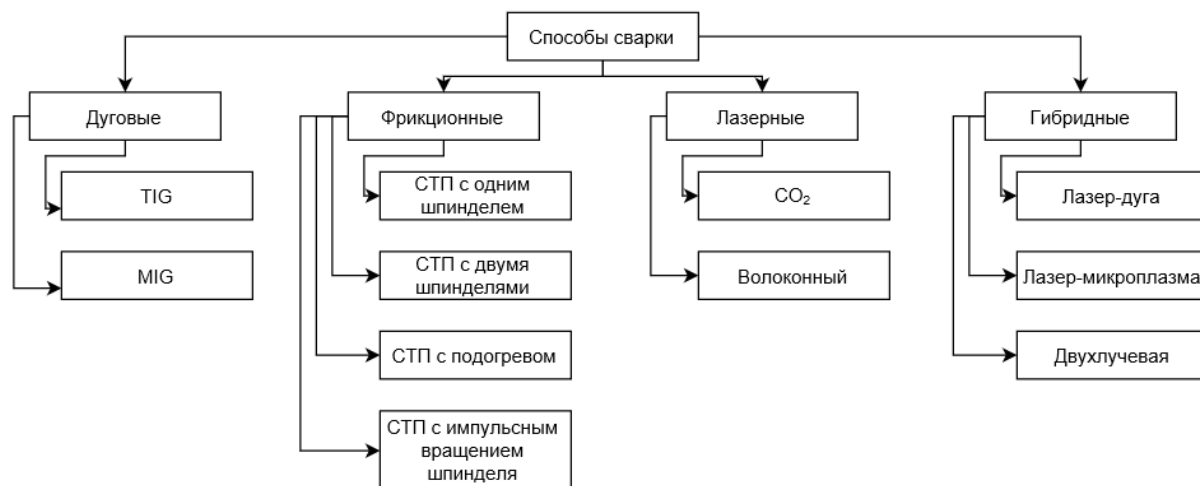


Рис. 1. – Способы сварки алюминия

1 ФРИКЦИОННЫЕ СПОСОБЫ

Фрикционная сварка – это сварка за счет выделения тепла при трении рабочего инструмента и детали.

1.1 Виды

Разновидностью фрикционных способов является сварка трением с перемешиванием СТП (Friction Stir Welding). Сварка происходит за счет нагрева быстро вращающегося шпинделя со штырем в центре, который погружается в стык двух деталей и движется вдоль линии стыка.

Помимо стандартной СТП существуют модернизированные способы [3,4], которые позволяют компенсировать некоторые недостатки:

СТП с двумя шпинделями (Self-reacting или SR-FSW). Это способ, в котором вместо жестко фиксированной подкладки используется еще один шпиндель, находящийся на противоположной стороне от рабочего шпинделя. Способ позволяет получить более симметричный шов [4], а осевое усилие, возникающее в обычной СТП, отсутствует, что позволяет уменьшить размер и сложность приспособлений.

СТП с подогревом (Assisted FCW). В данном способе осуществляется прогрев изделия с помощью TIG сварки, лазерной сварки или системы индукционного нагрева [3]. Происходит снижение напряжения в шпинделе, что приводит к уменьшению износа инструмента.

СТП с импульсным вращением шпинделя (Pulsed FCW). В данном способе используется импульсно изменяющаяся скорость вращения и/или перемещения. Шпиндель вращается в режиме полного реверса. Эксперименты позволили получить симметричную микроструктуру в зоне сварочного шва. При этом швы имели более высокий предел прочности и относительное удлинение [3].

1.2 Достоинства и недостатки

СТП легко автоматизировать, тепловложение минимально, так как отсутствует расплавление сварочной ванны, нет выгорания легирующих элементов, не требуется дополнительная термическая обработка шва, способ позволяет обеспечить высокую производительность сварки, что особенно актуально при сварке крупногабаритных конструкций.

Процесс не требует использования проволок, прутков, флюсов, защитных газов, что значительно снижает себестоимость конструкции.

При использовании СТП возникает необходимость двухсторонней жесткой фиксации изделий, что приводит к невозможности использования способа для сварки сложных пространственных конструкций. Недостатком способа также является высокая стоимость оборудования.

СТП является относительно новым способом, поэтому еще одной проблемой является недостаточная «изученность» процесса, трудно найти в открытых источниках технологию и режимы сварки.

1.3 Дефектность

Отсутствие сварочной ванны решает основные проблемы при сварке алюминия: образование пористости, кристаллизационных трещин, выгорание легирующих элементов [5].

Основным дефектом при сварке трением с перемешиванием является несплавление в корне шва. При выполнении СТП в месте выхода рабочего инструмента из стыка в конце шва остается отверстие. Характерными дефектами является вогнутость, возможность появления твердых включений: осколки рабочего инструмента, остатки грязи, масла, жира [6].

1.4 Чувствительность к аномалиям сборки и сварки

С помощью СТП возможно сваривать в любом пространственном положении. Для обеспечения качественного сварного соединения требуется обеспечить высокую точность сборки конструкции.

2 ЛАЗЕРНЫЕ СПОСОБЫ

Лазерная сварка – это сварка соединений высококонцентрированным источником нагрева.

2.1 Виды

Лазерная сварка алюминиевых сплавов выполняется либо традиционными CO₂-лазерами, либо более современными и прогрессивными волоконными лазерами.

Лазеры бывают как периодического (импульсного), так и непрерывного действия [7].

В качестве источника излучения рекомендуется применять волоконные лазеры, так как уровень мощности, который необходим для начала проплавления в 2 раза меньше, чем у CO₂-лазера [8], а КПД в 1,5-2 раза выше КПД CO₂-лазера (30% против 15-20%) [9]. При этом соединения, полученные излучением CO₂ и волоконного лазера,

практически не отличаются по внешнему виду и макроструктуре [8].

2.2 Достоинства и недостатки

Достоинствами лазерной сварки являются минимальные тепловложения, высокая концентрация нагрева: объем сварочной ванны в несколько раз меньше, чем при дуговой сварке [8,9], минимальная деформация: в 3-5 раз ниже, чем при дуговой сварке [7], высокая производительность за счет скорости сварки: 50-200 м/ч и более [7,9], низкая степень коробления и деформации деталей [8].

Недостатками способа являются высокая стоимость оборудования, снижение прочностных характеристик соединения из-за провисания сварочной ванны [9], для сварки в автоматизированном режиме требуется тщательно выстроить весь производственный цикл.

2.3 Дефектность

При лазерной сварке, из-за быстрого охлаждения расплава, алюминиевые сплавы склоны к образованию трещин, наблюдается возникновение чешуйчатости сварного шва [8], при использовании CO₂ лазера возникает большое количество пор [10].

2.4 Чувствительность к аномалиям сборки и сварки

Данным способом возможно проводить работы в различных пространственных положениях.

Лазерные способы чувствительны к величине зазора между кромками, что существенно увеличивает трудоемкость сборки конструкций, так как возникает необходимость обеспечения высокой точности сборки (Таблица 1) [7,11].

Таблица 1. – Зависимость величины зазора от скорости сварки и толщины металла

Толщина металла, мм	Скорость сварки, мм/сек	Максимально допустимая величина зазора (b), мм
0,8 – 1,5	5,5-22,2	0,12
	22,2-33,3	0,10
1,5 – 3,0	5,5-22,2	0,15
	22,2-33,3	0,12

3 ДУГОВЫЕ СПОСОБЫ

Дуговая сварка – это сварка соединений, в которой используется электрическая дуга для нагрева и расплавления металла.

3.1 Виды

Дуговые способы сварки алюминия разделяются на две большие группы: с использованием неплавящегося вольфрамового электрода (TIG) и с использованием плавящегося электрода-проволоки (MIG).

TIG. Наиболее популярными технологиями TIG сварки являются способы с применением динамических дуг, например, coldArc от компании EWM [12], позволяющий регулировать параметры сварки так, чтобы при изменении расстояния между электродом и изделием, подаваемая энергия сохраняла постоянную составляющую [12].

Для увеличения расплавленного металла и скорости сварки применяют дополнительную присадочную проволоку: холодную или горячую (рис. 2).

MIG. Способы MIG сварки алюминиевых сплавов, в основном, подразделяются на

импульсные и «холодные» процессы.

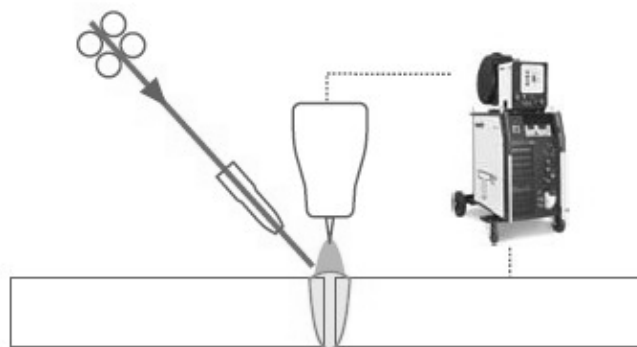


Рис. 2. – Схема TIG сварки с присадкой

«Холодные» способы позволяют уменьшить количество введенного тепла в основной металл за счет резкого снижения сварочного тока при коротком замыкании. Отрыв капли происходит за счет гравитационных сил. В процессе СМТ компании Fronius, отрыв капли происходит еще и с помощью обратного движения сварочной проволоки [13]. Подобные технологии разработаны и другими производителями: ColdArc (EWM,) ColdMIG (Merkle), WiseThin (Kemppi), PrecisionPulse (Lincoln Electric).

Импульсные способы позволяют увеличить скорость сварки за счет импульсного увеличения тока.

Сварку алюминиевых изделий с применением импульсной технологии можно производить с помощью процессов Syncro Pulse, PMC (Fronius), Pulse-On-Pulse (Lincoln Electric), SpeedPulse (Lorch) и др.

В процессах Pulse-On-Pulse и SpeedPulse используются высоко- и маломощные импульсы. Данное решение позволило облегчить процесс выполнения сварочных соединений, улучшить внешний вид швов, увеличить глубину проплавления и скорость сварки [14].

Процесс PMC (Pulse MultiControl) за счет высокочастотной составляющей позволяет оценивать положение капли с последующим изменением сварочных параметров, добиться плавного перетекания капли в ванну. Процесс позволяет автоматически поддерживать минимальную дугу, что приводит к уменьшению разбрызгивания (рис. 3).

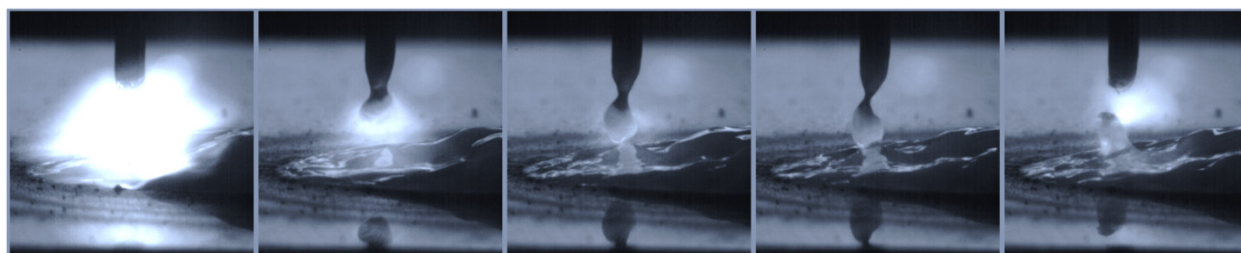


Рис. 3. – Процесс "перетекания" капли в сварочную ванну

Для увеличения скорости сварки используются тандемы (сварка ведется сразу двумя и более проволоками). Например, две проволоки используются в процессе Tandem MIG от компании Lincoln Electric.

3.2 Достоинства и недостатки

Основным достоинством дуговых способов является экономичность процесса по сравнению с другими перечисленными способами, легкость автоматизации, отсутствие специализированной оснастки.

Недостатками способа являются более низкая производительность сварочного, необходимость применять большое количество материалов, относительно низкая концентрация энергии в дуге, неустойчивость горения дуги при высоких скоростях [11].

3.3 Дефектность

Большое количество тепла, вводимое во время сварки, может привести к деформации изделия. Применение рациональной конструкции и импульсных или холодных процессов позволит снизить тепловложение, следовательно, деформацию конструкцию.

При сварке алюминиевых сплавов есть вероятность появления пор и подрезов. Тщательная подготовка поверхности перед сваркой и соблюдение технологии позволит избежать образования пор, а правильный подбор режима сварки предотвратит образование подрезов.

3.4 Чувствительность к аномалиям сборки и сварки

Данным способом можно выполнять качественные сварные соединения во всех пространственных положениях.

Среди перечисленных в статье способов, дуговая сварка является наименее чувствительными к аномалиям изделия и сборки: неравномерной ширине стыка, возможности сварки больших воздушных зазоров.

3.5 Гибридные способы

Данные способы сочетают в себе два и более процесса, что позволяет использовать преимущества каждого и нивелировать их недостатки.

Гибридный способ лазер-дуга. Сварка алюминия осуществляется лазером в сочетании с неплавящимся или плавящимся электродом [11].

Способ используют в том случае, когда необходимо сварить листы в автоматическом режиме с большой скоростью, низким тепловложением и высоким качеством сварных соединений.

Достоинствами является снижение требований к точности сборки деталей [11], высокая стабильность при высоких скоростях сварки (свыше 60 м/ч [15]), снижение мощности луча, снижение потребления энергии, увеличение эффективности оборудования (в 1.5-2 раза по сравнению с лазерной [11]), снижение затрат на расходные материалы (в 2 раза [16]).

Недостатками являются склонность к формированию подрезов, эрозия неплавящегося электрода [10], высокая стоимость оборудования.

Гибридная лазерно-плазменная сварка. Важным преимуществом плазменной сварки является катодная очистка поверхности изделия [11,17].

Микроплазменная составляющая позволяет значительно снизить себестоимость оборудования и увеличить стабильность горения дуги [11].

Недостатком метода является провисание швов, образование подрезов и внутренних пор [15], невозможность достичь стабильного процесса при высоких скоростях сварки [11].

Соединив микроплазменную и лазерную сварку, можно получить высокопроизводительный процесс с повышенным качеством сварных соединений [18], стабилизировать процесс при высоких скоростях, снизить зависимость процесса от оптических свойств поверхности. При сварке происходит очистка поверхности от оксидной пленки [11].

Двухлучевая лазерная сварка. Это способ, в котором сварочная ванна формируется

за счет воздействия двух лучей лазера.

В настоящее время данная технология недостаточно изучена, поэтому практически не применяется в промышленности [19].

Достоинствами данного способа является устранение прожогов, уменьшение порообразования [11], возможность сварки разнотолщинных деталей и удаления оксидной пленки одним из лазеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье были рассмотрены различные способы сварки крупногабаритных тонкостенных конструкций ответственного назначения из алюминиевых сплавов.

Несмотря на высокую производительность и возможность сварки с малым вводом тепла, лазерные способы проблематично использовать при сварке, так как необходимо обеспечить высокую точность сборки и максимальную («аптечную») чистоту производства. Из-за высокой стоимости оборудования, применение данных способов целесообразно только при массовом производстве конструкций.

Сварку трением с перемешиванием также затруднительно применять в данных конструкциях, так как способ актуален только для соединения простых по форме изделий, при сварке которых возможно обеспечить жесткое двухстороннее закрепление.

Актуально применение гибридных способов сварки, но, из-за малого количества информации в открытых источниках, возникает проблема подбора режима сварки и оценка этих процессов по критерию – «цена-качество». Высокая стоимость оборудования также сужает область применения данных способов.

Способ дуговой сварки MIG, за счет применения импульсных или «холодных» процессов, позволит решить проблему высокого тепловложения при сварке алюминиевых сплавов. Пониженная чувствительность способа к аномалиям сборки стыкового соединения, по сравнению с лазерной сваркой, значительно снижает трудоемкость изготовления сложной пространственной конструкции, а применение адаптивных алгоритмов управления процессом позволит расширить технологические возможности процесса и перейти от ручной и механизированной сварки к автоматизированной с сохранением высокого показателя по критерию «цена – качество».

Помимо этого, за счет автоматизации и механизации процесса возможно значительное увеличение производительности сварки и повышение стабильности процесса. Относительно низкая стоимость оборудования и простота реализации технологического процесса сварки на базе быстродействующих инверторных источников питания, также является серьезным преимуществом при выборе данного способа [20].

На основе идентификации процесса сварки как объекта управления, авторами запланированы работы по разработке и внедрению автоматизированного комплекса для автоматической сварки упомянутых в статье ответственных изделий из алюминиевых сплавов с решением задач геометрической и технологической адаптации процесса сварки к технологическим возмущениям различной физической природы.

Проведя анализ технологических возможностей рассмотренных выше современных способов сварки, авторы пришли к выводу, что для поставленных задач наиболее рациональными и оптимальными способами являются MIG/TIG способы сварки с применением импульсных технологий. В своих дальнейших исследованиях авторы уделяют внимание совершенствованию этих способов на базе разработки и внедрения автоматизированного оборудования с использованием средств цифрового контроля и управления процессом, а также применения автоматизированных головок с

быстродействующими источниками питания и адаптивных роботов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mathers G. The Welding of Aluminium and its Alloys. Cambridge: Pub. Woodhead Publishing, Ltd, 2002, 242 p.
2. Макаров, Э.Л. и др. Теория свариваемости сталей и сплавов [Текст] / Э.Л. Макаров, Б.Ф. Якушин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 487 с.
3. Dawes C.J. Friction stir welding. TALAT. 1999, p. 13. Available at: http://mitpublications.org/yellow_images/1361513532_logo_File%204.pdf
4. Thomas W.M., Norris I.M., Staines D.G., Watts E.R. Friction stir welding – process developments and variant techniques. SME Summit. Oconomowoc, 3-4 August 2005, Milwaukee, USA. pp. 1–21. Available at: http://hegesztesportal.hu/tudastar/wt_fsw.pdf
5. Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews. 2009, Vol. 54, Issue 2, ISSN 0950-6608, DOI: 10.1179/174328009X411136, pp. 49–93.
6. Gibson B.T., Lammleinb D.H., Praterc T.J., Longhurstd W.R., Coxa C.D., Balluna M.C., Dharmaraja K.J., Cooka G.E., Straussa A.M. Friction stir welding: Process, automation, and control. Journal of Manufacturing Processes. 2014, Vol. 16, Issue 1, ISSN 1526-6125, DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.04.002, pp. 56–73.
7. Игнатов, А. Лазерная сварка сталей мощными CO₂-лазерами. Часть 1 [Текст] / А. Игнатов // Фотоника. – 2008. – №6. – С. 8.
8. Шиганов, И.Н. и др. Лазерная сварка алюминиевых сплавов [Текст] / И.Н. Шиганов, А.А. Холопов // Фотоника. – 2010. – №3. – С. 6–10.
9. Шиганов, И.Н. и др. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения [Текст] / И.Н. Шиганов, С.В. Шахов, А.А. Холопов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2012. – №6(6). – С. 34–50.
10. Bagger C., Olsen F.O. Review of laser hybrid welding. Journal of Laser Applications. 2005, Vol. 17, №1, DOI 10.2351/1.1848532, p. 13.
11. Григорьянц, А.Г. и др. Гибридные технологии лазерной сварки [Текст] / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.М. Чирков. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 49 с.
12. Инновационные процессы сварки TIG/плазменной сварки от компании EWM [Текст]. – [Б.м.], 2014. – С. 24.
13. Гладков, Э.А. и др. Автоматизация сварочных процессов [Текст] / Э.А. Гладков, В.Н. Бродягин, Р.А. Перковский. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 421 с.
14. Lincoln Electric. Pulse-On-Pulse GMAW (MIG). 2006, p. 4.
15. Шелягин, В.А. и др. Технологические особенности лазерной, микроплазменной и гибридной лазерной-микроплазменной сварки алюминиевых сплавов [Текст] / В.А. Шелягин, А.М. Оришич и др. // Автоматическая сварка. – 2014. – Т. №5(734). – С. 35–42.
16. Пауль, К. и др. Гибридная лазерная сварка [Текст] / К. Пауль, Ф. Ридель // Фотоника. – 2009. – №1. – С. 2–5.
17. Патон, Б.Е. и др. Микроплазменная сварка [Текст] / Б.Е. Патон и др. – Киев: Наукова думка, 1979. – 248 с.
18. Патон, Б.Е. и др. Гибридная лазерно-микроплазменная сварка металлов малых толщин [Текст] / Б.Е. Патон и др. // Автоматическая сварка. – 2002. – №3. – С. 5–9.
19. Грезев, Н.В. Разработка способа двухлучевой лазерной сварки конструкционных низколегированных трубных сталей : автореф. дисс. канд. техн. наук [Текст] / Н.В. Грезев. – М., 2010. – 18 с.
20. Гладков, Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке [Текст] Э.А. Гладков – М: Центр «Академия», 2006. – 432 с.

REFERENCES

- [1] Mathers G. The Welding of Aluminium and its Alloys. Cambridge. Woodhead Publishing Ltd, 2002, ISBN 1-85573-567-9, 242 p. (in English)
- [2] Makarov E.L., Jakushin B.F. Teorija svarivaemosti stalej i splavov [Theory of weldability of steels and alloys]. – M. Pub. MSTU N.E. Bauman, 2014, ISBN 978-5-7038-3938-6, 487 p. (in Russian)
- [3] Dawes C.J. Friction stir welding. TALAT, 1999, p. 13. Available at: http://mitpublications.org/yellow_images/1361513532_logo_File%204.pdf (in English)

- [4] Thomas W.M., Norris I.M., Staines D.G., Watts E.R. Friction stir welding – process developments and variant techniques. SME Summit. Oconomowoc, 3-4 August 2005, Milwaukee, USA. pp. 1–21. Available at: http://hegesztesportal.hu/tudastar/wt_fsw.pdf (in English)
- [5] Threadgill P.L., Leonard A.J., Shercliff H.R., Withers P.J. Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews. 2009, Vol. 54, Issue 2, ISSN 0950-6608, DOI 10.1179/174328009X411136, pp. 49–93. (in English)
- [6] Gibson B.T., Lammlein D.H., Prater T.J., Longhurst W.R., Coxa C.D., Balluna M.C., Dharmaraja K.J., Cook G.E., Strauss A.M. Friction stir welding: Process, automation, and control. Journal of Manufacturing Processes. 2014, Vol. 16, Issue 1, ISSN 1526-6125, DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.04.002, pp. 56–73. (in English)
- [7] Ignatov A. Lazernaja svarka stalej moshhnyimi CO₂-lazerami [Laser welding of steels by powerful Carbone dioxide lasers]. Fotonika [Photonika], 2008, №6, ISSN 1993-7296, p. 8. (in Russian)
- [8] Shiganov I., Holopov A. Lazernaja svarka aljuminievyh splavov [Laser welding of aluminum alloys]. Fotonika [Photonika], 2010, №3, ISSN 1993-7296, pp. 6–10. (in Russian)
- [9] Shiganov I.N., Shahov S.V., Holopov A.A. Lazernaja svarka aljuminievyh splavov aviacionnogo naznachenija [Laser welding of aluminium alloys of aviation assignments] Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii [Engineering journal: science and innovations], 2012, №6(6), ISSN 2308-6033, p. 2. (in Russian)
- [10] Bagger C., Olsen F. Review of laser hybrid welding. Journal of Laser Applications, 2005, Vol. 17, №1, DOI 10.2351/1.1848532, p. 13. (in English)
- [11] Grigoryajanc A.G., Shiganov I.N., Chirkov A.M. Gibridnye tehnologii lazernoj svarki [Hybrid laser welding technology]. M. Pub. MSTU N.E. Bauman, 2004, ISBN 5-7038-2614-4, 49 p. (in Russian)
- [12] Innovacionnye processy svarki TIG/plazmennoj svarki ot kompanii EWM [Innovative welding processes of TIG/plasma welding from EWM company], 2014, pp. 1-24. (in Russian)
- [13] Gladkov Je.A., Brodjagin V.N., Perkovskij R.A. Avtomatizacija svarochnyh processov [Automation of welding processes]. M. Pub. MSTU N.E. Bauman, 2014, ISBN 978-5-7038-3861-7, 421 p. (in Russian)
- [14] Lincoln Electric. Pulse-On-Pulse GMAW (MIG), 2006, p. 1-4. (in English)
- [15] Sheljagin V.A., Orishich A.M. etc. Tehnologicheskie osobennosti lazernoj, mikroplazmennoj i gibridnoj lazernoj-mikroplazmennoj svarki aljuminievyh splavov [Technological features of laser, microplasma and hybrid laser-welding aluminum alloys] Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding], 2014, №5(734), ISSN 0005-111X, p. 35-42. (in Russian)
- [16] Paul K., Ridel F. Gibridnaja lazernaja svarka [Hybrid laser welding]. Fotonika [Photonika], 2009, №1, ISSN 1993-7296, pp. 2–5. (in Russian)
- [17] Paton B.E. etc. Mikroplazmennaja svarka [Microplasma welding]. Kiev. Pub. Naukova Dumka [Scientific thought], 1979, 249 p. (in Russian)
- [18] Paton B.E. etc. Gibridnaja lazerno-mikroplazmennaja svarka metallov malyh tolshhin [Hybrid laser-microplasma welding of thin metals]. Avtomaticheskaya svarka [Automatic welding], 2002, №3, ISSN 0005-111X, p. 5-9. (in Russian)
- [19] Grezev N.V. Razrabotka sposoba dvuhluchevoj lazernoj svarki konstrukcionnyh nizkolegirovannyh trubnyh stalej [Method of dual beam laser welding of tube made from structural low-alloyed steel] : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Abstract of thesis, c.t.s], M. 2010, 18 p. (in Russian)
- [20] Gladkov Je.A. Upravlenie processami i oborudovaniem pri svarke [process and equipment control for welding]. M. Pub. Tsentr Academia [Center "Academy"], 2006, ISBN 5-7695-2301-8, 432 p. (in Russian)

Modern Methods of Automatic Welding of Responsible Large Dimension Thin-walled Aluminum Workpieces: Analysis of the Technological Capability

A.M. Tupitsyn* **¹, E.A. Gladkov², A.V. Chernov***³**

** LLC "SVARBI",*

6 build, 6 Dorozhny proezd, Moscow, Russia 117545

*** Moscow State Technical University by N.E. Bauman,*

1 build, 5 Second-Bauman St., Moscow, Russia 105005

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

¹ e-mail: alexhao@ya.ru ; ² e-mail: 123777@bk.ru ; ³ e-mail: viti@mephi.ru

Abstract – This article analyzes the technological capability of the modern methods of welding large dimension thin-walled aluminum workpieces.

Types, merits and demerits, types of defects which appear when using arc, frictional, laser and hybrid techniques are considered.

The most optimum and rational method of welding is selected according to analysis results.

Keywords: automatic welding methods, welding of aluminum alloys, welding of large workpieces, arc welding, friction welding, laser welding, hybrid welding.

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

УДК 621.375

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЙ
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ ДАТЧИКОВЫХ
СИСТЕМ И АНАЛОГОВЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ
ОТВЕТСТВЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ¹**

© 2016 Н.Н. Прокопенко, Н.В. Бутырлагин, А.В. Бугакова, А.А. Игнашин

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

В статье рассматриваются особенности проектирования инструментального усилителя (ИУ) для датчиковых систем при его реализации на основе радиационно-стойких микросхем базовых матричных кристаллов АБМК_1_4, АБМК_2_1 (ОАО «МНИПИ», г. Минск). Разработана новая архитектура ИУ, которая может работать без резисторов общей отрицательной обратной связи с классическими мостовыми измерительными схемами и обеспечивает повышенный коэффициент ослабления входного синфазного сигнала. В ИУ допускается цифровое управление коэффициентом передачи за счет коммутации элементов матрицы «R-2R» КМОП-транзисторами. Особенности предлагаемого ИУ состоят в использовании в его входном каскаде транзисторов различной физической природы – биполярных и полевых с управляющим р-п переходом. Перспективно применение во входном каскаде ИУ комплементарных КМОП-транзисторов, один из которых должен иметь встроенный, а второй – индуцированный каналы. Для предлагаемой схемы ИУ характерны малые напряжения смещения нуля и отсутствие классических источников опорного тока, устанавливающих статический режим входного дифференциального каскада. ИУ допускает существенное увеличение числа входов для обработки сигналов большого количества датчиков. Предлагается также модификация ИУ, имеющая повышенное быстродействие в режиме большого сигнала, что обеспечивается за счет применения входных дифференциальных каскадов с расширенным диапазоном активной работы.

Ключевые слова: инструментальный усилитель, датчиковые системы, аналоговые интерфейсы, радиационная стойкость, мультидифференциальный усилитель.

Поступила в редакцию 16.03.2016 г.

В качестве прецизионного устройства усиления и преобразования электрических сигналов различных датчиков широко применяются инструментальные усилители (ИУ) [1, 2, 3, 4, 5], в т.ч. на основе мультидифференциальных каскадов [6, 7, 8].

Для работы в условиях космического пространства, в экспериментальной физике и ядерной энергетике необходимы радиационно-стойкие ИУ с несколькими дифференциальными входами, обеспечивающими функциональное преобразование нескольких аналоговых сигналов [9, 10]. Мировой опыт проектирования устройств данного класса [11, 12, 13, 14] показывает, что решение этих задач возможно с использованием биполярно-полевого технологического процесса (базовые матричные кристаллы АБМК_1_4, АБМК_2_1, ОАО «МНИПИ», г. Минск [15]), обеспечивающего формирование р-канальных полевых и высококачественных п-р-п биполярных

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

транзисторов с радиационной стойкостью до 1 Мрад и потоком нейтронов до 10^{13} н/см². Однако, для таких ИУ необходима специальная схемотехника, учитывающая ограничения биполярно-полевой технологии [15].

Существенный недостаток классических ИУ на трех операционных усилителях [16, 17, 18] состоит в том, что в них не обеспечивается дифференциальное преобразование нескольких входных напряжений, что актуально для многоканальных датчиков [9, 10]. Кроме этого, к прецизионности применяемых резисторов таких ИУ предъявляются повышенные требования [16, 17, 18].

На рисунке 1 показана схема предлагаемого ИУ [19] и пример его включения в структуру классического измерительного моста с резистивными сенсорами некоторой физической величины ($R3 \div R4$).

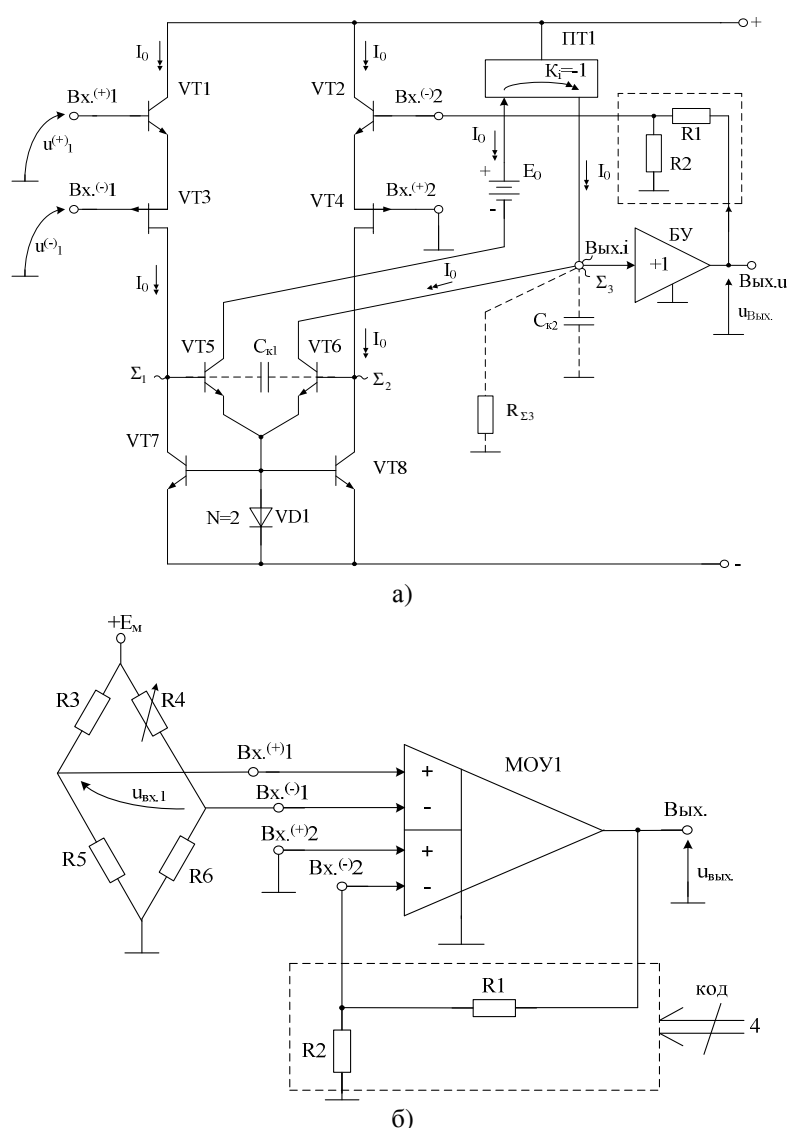


Рис. 1. – Схема предлагаемого ИУ (а) и его включение с мостовым датчиком (б)

Выходное напряжение ИУ рисунка 1 при большом петлевом усилении (T) по цепи общей отрицательной обратной связи определяется формулой:

$$u_{\text{вых}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(u_{\text{вх.1}} + U_{\text{см}} - \frac{U_{\text{сф}}}{K_{\text{ос.сф}}}\right) \approx \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_{\text{вх.1}},$$

где $U_{см}$ – напряжение смещения нуля ИУ, приведенное ко входам $Vx^{(+)}1$, $Vx^{(-)}1$;
 $U_{сф}$ – синфазное напряжение на входах $Vx^{(+)}1$, $Vx^{(-)}1$;
 $K_{ос.сф}$ – коэффициент ослабления входных синфазных напряжений ИУ по входам $Vx^{(+)}1$, $Vx^{(-)}1$.

Численные значения коэффициента $K_{ос.сф}$ для входного дифференциального каскада ИУ на транзисторах VT1, VT3 определяются глубиной внутренней обратной связи полевого транзистора VT3 при его включении в схеме с общим затвором:

$$K_{ос.сф} \approx \mu_3^{-1} = 10^3 \div 10^4.$$

При этом по входам $Vx^{(+)}1$, $Vx^{(-)}1$ обеспечивается высокое входное сопротивление, которое, в отличие от ИУ на основе классических операционных усилителей, не зависит от сопротивлений резисторов общей обратной связи ($R1$, $R2$).

Так, например, входное дифференциальное сопротивление ИУ по инвертирующему входу $Vx^{(-)}1$ определяется входным дифференциальным сопротивлением по цепи затвора R_3 полевого транзистора VT3:

$$R_{вх}^{(-)} = R_3 \rightarrow \infty.$$

Для не инвертирующего входа:

$$R_{вх}^{(+)} \approx \beta_1 S_3^{-1},$$

где β_1 – коэффициент усиления по току базы транзистора VT1;
 S_3 – крутизна стоко-затворной характеристики полевого транзистора VT3.

В зависимости от величины внутреннего сопротивления источника сигнала или сопротивлений цепи обратной связи в качестве инвертирующих входов могут использоваться либо затвор транзистора VT3, либо база транзистора VT2. В ответственных случаях в схеме входного каскада могут применяться комплементарные КМОП транзисторы, один из которых должен иметь индуцированный, а другой – встроенный каналы. В этом случае вопрос о дифференциальных входных сопротивлениях ИУ по входам $Vx^{(+)}1$, $Vx^{(-)}1$ снимается.

Первая особенность схемы рисунка 1а – потенциальная возможность работы без резисторов обратной связи $R1$, $R2$. Так, при $R1=0$, $R2=\infty$, коэффициент передачи ИУ по дифференциальному входу становится равным единице, а схема может обеспечить как инвертирующее, так и неинвертирующее преобразование входных сигналов.

Вторая особенность схемы рисунка 1 – возможность цифрового управления коэффициентом передачи. Такой режим может быть обеспечен включением вместо резистора $R2$ классической матрицы «R-2R», коммутируемой с помощью КМОП ключей.

Третья особенность – применение во входном каскаде ИУ рисунка 1а транзисторов с различными принципами работы – биполярных и полевых с управляющим p-n переходом. При этом за счет дифференциальной архитектуры промежуточного каскада (ПК) VT5-VT7 и идентичности его каналов усиления по входам ПК в схеме рисунка 1а реализуются малые уровни напряжения смещения нуля. Заметим, что схема входного каскада ИУ рисунка 1а может быть реализована на КМОП транзисторах, один из которых должен иметь встроенный канал, а другой – индуцированный канал.

Четвертая особенность схемы рисунка 1 – отсутствие источников опорного тока, устанавливающих статический режим входных транзисторов VT1-VT4. Данный функциональный узел в ИУ с классической архитектурой оказывает отрицательное влияние на прецизионность ИУ и его динамические параметры.

Пятая особенность схемы – простота наращивания числа инвертирующих и неинвертирующих входов ИУ за счет параллельного включения необходимого количества рассмотренных выше дифференциальных каскадов на полевых и биполярных транзисторах.

Статический режим входных транзисторов схемы рис. 1а устанавливается за счет соответствующего выбора геометрических размеров полевых транзисторов VT3 и VT4. Статический ток стока этих транзисторов ($I_{c3}=I_{c4}=I_0$) определяется по их стоко-затворной характеристике при напряжении затвор-исток, равном напряжению эмиттер-база ($U_{эб} \approx 0,7\text{В}$) входных биполярных транзисторов VT1 и VT2. Таким образом, для обеспечения статического режима в схеме рис. 1а не требуются какие-либо другие источники опорного тока. В этом состоит одна из ее особенностей [19].

Токи стоков полевых транзисторов $I_{c3}=I_{c4}=I_0$ определяют статический режим транзисторов VT7 и VT8 за счет местной отрицательной обратной связи по синфазному сигналу (выходные транзисторы VT5 и VT6). Если в качестве VD1 использовать два параллельно включенных р-п перехода, идентичных эмиттерным р-п переходам транзисторов VT7 и VT8, то коллекторные токи выходных транзисторов VT5 и VT6 будут соответствовать току стока транзисторов VT3 и VT4. Таким образом, промежуточный каскад ИУ также не требует использования каких-либо традиционных источников опорного тока.

Вспомогательный источник напряжения E_0 в схеме рисунка 1 (например, резистор, стабилитрон или несколько р-п переходов) включен для согласования статических режимов выходных транзисторов VT5 и VT6 по напряжению коллектор-база. Его применение позволяет уменьшить влияние эффекта Эрли этих выходных транзисторов на напряжение смещения нуля ИУ ($U_{см}$).

Рассмотрим зависимость коэффициента передачи по напряжению схемы рис. 1а от параметров ее элементов.

Усиление по петле отрицательной обратной связи ИУ рис. 1а при единичном коэффициенте передачи токового зеркала ПТ1 определяется формулой:

$$T = \beta_{oc} K_{y1} K_{y2} K_{бу}, \quad (1)$$

$$\text{где } K_{y1} = \frac{u_{к8}}{u_{вх.2}} \approx y_{\Sigma 2}^{-1} (g_{m4}^{-1} + r_{э2})^{-1};$$

$$K_{y2} = \frac{u_{\Sigma 3}}{u_{к8}} \approx \frac{R_{\Sigma 3}}{r_{э5} + r_{э6}};$$

$u_{вх.2}$ – напряжение на входе Вх.⁽⁻⁾²;

$u_{к8}$ – напряжение на базе VT6;

$\beta_{oc} = R_2 (R_1 + R_2)^{-1}$ – коэффициент передачи четырехполюсника отрицательной обратной связи;

$y_{\Sigma 2}$ – эквивалентная проводимость в высокоимпедансном узле $\Sigma 2$;

$K_{y1}, K_{y2}, K_{бу} \approx 1$ – коэффициенты передачи по напряжению первого, второго и третьего каскадов ИУ;

g_{m4} – крутизна стоко-затворной характеристики полевого транзистора VT4;

$R_{\Sigma 3}$ – эквивалентное сопротивление в высокоимпедансном узле $\Sigma 3$;

$r_{\Sigma i}$ – сопротивление прямосмещенного эмиттерного р-п перехода i -го транзистора.

При этом в формуле (1) эквивалентная проводимость в высокоимпедансном узле $\Sigma 2$:

$$Y_{\Sigma 2} = Y_{i6} + Y_{i8} + Y_{i4},$$

где Y_{i6} – входная проводимость транзистора VT6 по цепи базы;

Y_{i8} – выходная проводимость транзистора VT8 по цепи коллектора;

Y_{i4} – выходная проводимость транзистора VT4 по цепи стока.

Причем:

$$R_{i6} = Y_{i6}^{-1} \approx \beta_6 (r_{\Sigma 5} + r_{\Sigma 6}),$$

$$R_{i8} = Y_{i8}^{-1} \approx r_{\Sigma 8} \mu_8^{-1},$$

$$R_{i4} = Y_{i4}^{-1} \approx (r_{\Sigma 2} + g_{m4}^{-1}) \mu_4,$$

где $\mu_i \approx 10^{-4}$ – коэффициент внутренней обратной связи i -го транзистора в схеме с общей базой (VT8) или общим затвором (VT4).

В результате анализа схемы рис.1а (с учетом ее высокой симметрии) можно найти, что при $T \gg 1$ модуль коэффициента передачи по напряжению ИУ:

$$K_y = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{K_{y1} K_{y2} K_{\text{БВ}}}{1 + \beta_{\text{oc}} K_{y1} K_{y2} K_{\text{БВ}}} \approx \frac{1}{\beta_{\text{oc}}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right).$$

При 100% отрицательной обратной связи схема рис. 1а может быть инвертирующим повторителем входного напряжения с $K_y \approx -1$. Однако, в отличие от традиционных схемотехнических решений на основе классических ОУ она может не содержать резисторов общей отрицательной обратной связи.

В схеме ИУ рисунка 2а введен второй многоканальный входной дифференциальный каскад на транзисторах VT5, VT6, VT7 и VT8. Общее число входов в таком ИУ возрастает до восьми, что позволяет обеспечить преобразование (алгебраическое суммирование и т.п.), как минимум, семи разных входных напряжений (рис. 1а).

Так, выходное напряжение в схеме рисунка 2а (при достаточно большом петлевом усилении $T \gg 1$) можно найти по формуле:

$$u_{\text{вых}} \approx \frac{T}{1+T} (u_1^{(+)} - u_1^{(-)} + u_2^{(+)} - u_2^{(-)} + u_3^{(+)} - u_3^{(-)} + u_4^{(+)}),$$

где u_i – напряжение на i -том входе ИУ рис. 2а.

В схеме рис. 3 два входных дифференциальных каскада, реализованные соответственно на транзисторах VT1, VT2, VT3, VT4 и VT5, VT6, VT7, VT8, имеют расширенный диапазон активной работы [20]. Данная схема ИУ имеет только 4 входа, но характеризуется повышенным быстродействием и при однополюсной частотной коррекции ($C_{\kappa 1}$) [20].

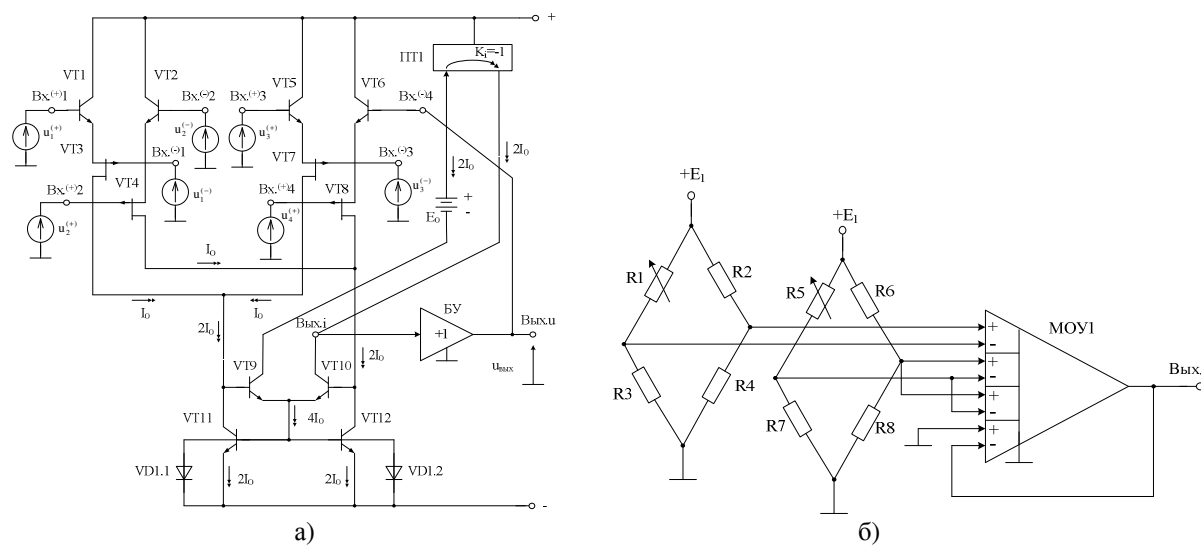


Рис. 2. – Инструментальный усилитель с восемью входами (а) и схема его включения в многоканальной мостовой измерительной системе (б)

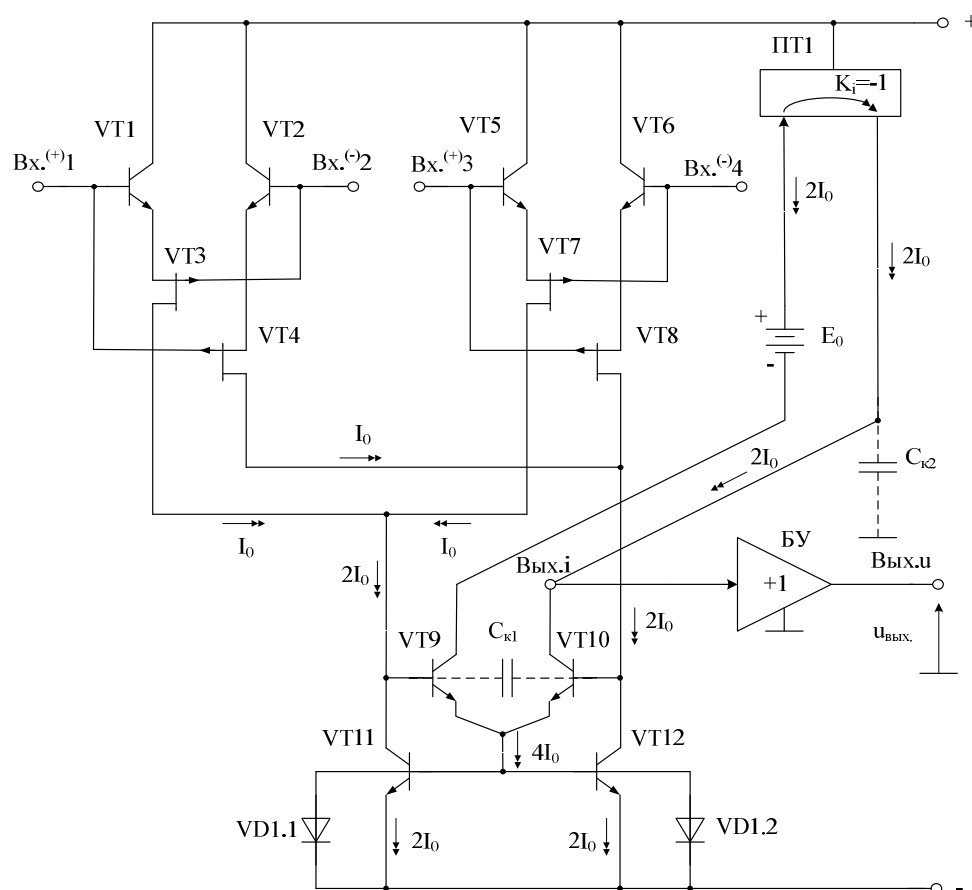


Рис. 3. - Инструментальный усилитель с повышенным быстродействием

На рисунке 4 приведена схема ИУ рисунка 1а в среде PSpice на радиационно-зависимых моделях интегральных транзисторов АБМК_1_4 НПО «Интеграл» (г. Минск).

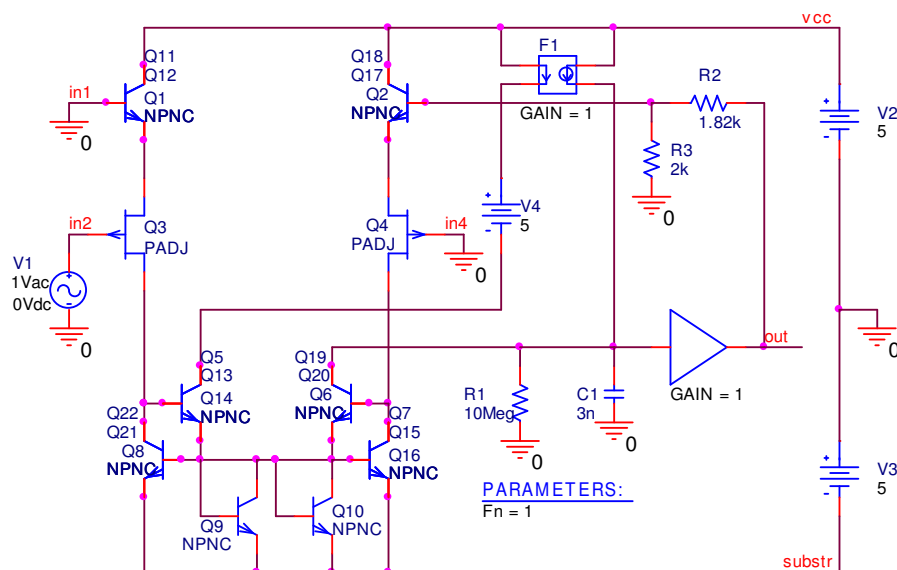
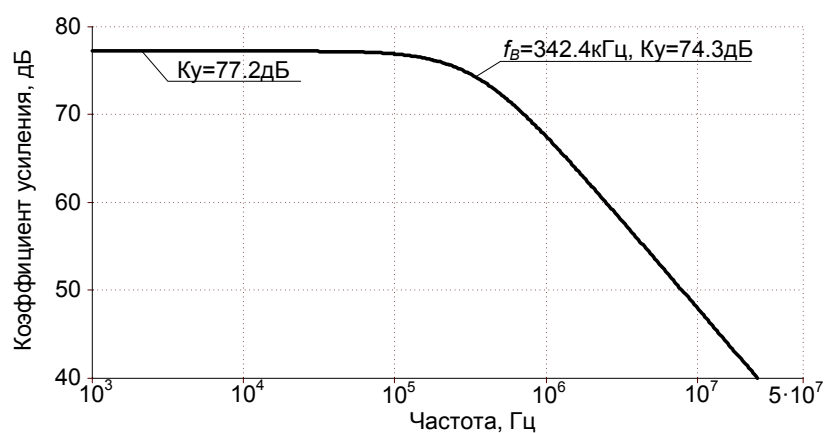
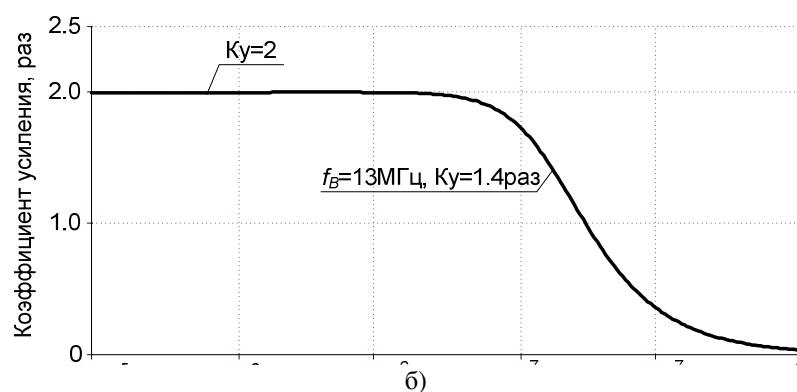


Рис. 4. – Схема включения МОУ рисунка 1а в среде PSpice с четырехполосником отрицательной обратной связи

На рисунке 5 показаны амплитудно-частотные характеристики инструментального усилителя рисунка 4 для случая, когда коэффициент передачи четырехполосника обратной связи равен 0,5, то есть коэффициент усиления ИУ в данной схеме включения $K_u = -2$.



а)



б)

Рис. 5. – Амплитудно-частотные характеристики ИУ без отрицательной обратной связи (ООС) (а)

и с ООС (б)

Амплитудно-частотная характеристика рисунка 5 ИУ рисунка 4 показывает, что за счет изменения отношения резисторов обратной связи R_2 , R_3 можно обеспечить инвертирующий коэффициент усиления $K_y = -2$ при высоком входном сопротивлении по цепи затвора транзистора Q3. Петлевое усиление в ИУ обеспечивается двумя каскадами усиления и принимает значения в диапазоне до 80 дБ (рис. 5а), что достаточно для многих применений ИУ.

Предлагаемые схемотехнические решения ИУ имеют также малые значения напряжения смещения нуля ($U_{см}$) при воздействии температуры и радиации. На рисунке 6 показана зависимость систематической составляющей напряжения смещения нуля ИУ рисунка 4 от потока нейтронов (а) и температуры в диапазоне минус 60 - 80 °С (б). Данные характеристики получены для случая, когда элементы схемы рисунка 4 обладают высокой идентичностью, т.е. данные графики показывают предельные возможности ИУ, к которым нужно стремиться.

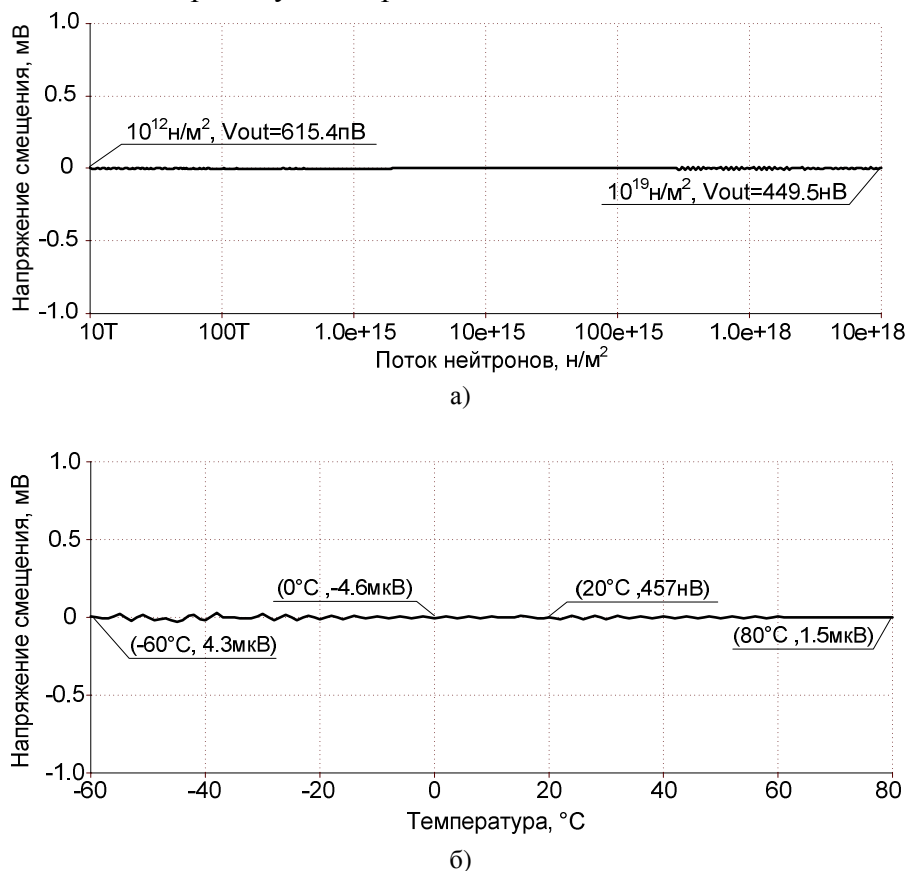


Рис. 6. – Зависимость систематической составляющей напряжения смещения нуля ИУ рис. 4 от потока нейтронов (а) и температуры в диапазоне минус 60 - 80 °С (б)

Таким образом, рассмотренные инструментальные усилители имеют ряд преимуществ в сравнении с известными схемотехническими решениями и могут найти применение в системах обработки сигналов датчиков различной физической природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Verbeeck J. A MGy, low-offset programmable instrumentation amplifier IC for nuclear applications / J. Verbeeck, Y. Cao, M. Van Uffelen, L. Mont Casellas, C. Damiani, E. Ruiz Morales, R. Ranz Santana, R. Meek, B. Haist, W. De Cock, L. Vermeeren, M. Steyaert, P. Leroux // 15th Eur. Conf. Radiat. Its Eff. Components Syst. (RADECS), Moscow, 2015, pp. 1–4. DOI:

- 10.1109/RADECS.2015.7365579.
2. Kugelstadt T. Getting the most out of your instrumentation amplifier design / T. Kugelstadt // Analog Applications Journal, 2005, pp. 25-29.
 3. Wurcer S., et al. Instrumentation Amplifiers Solve Unusual Design Problems / Scott Wurcer, et al. // EDN Electrical Design News, vol. 28, No. 16, Aug. 1983, pp. 133-145.
 4. Авербух, В. Инструментальные усилители [Текст] / В. Авербух // Схемотехника. – 2001. - № 1 (3). – С. 26-29; Схемотехника. – 2001. - № 2 (4). – С. 22-24.
 5. Kitchin C. A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers 3ND Edition / C. Kitchin, L. Counts // Analog Devices, Inc., 2006.
 6. Säcker E. A versatile building block: the CMOS differential difference amplifier / E. Säcker, W. Guggenbühl // IEEE J. Solid-State Circuits, vol. SC-22, pp. 287-294, Apr. 1987. DOI: 10.1109/JSSC.1987.1052715
 7. Huang S.-C. A wide range differential difference amplifier: A basic block for analog signal processing in MOS technology / S.-C. Huang, M. Ismail, S. R. Zarabadi // IEEE Trans. Circuits Syst.-II, vol. 40, pp. 289-301, May 1993. DOI: 10.1109/82.227369
 8. Prokopenko N.N. The Main Connection Circuits of the Radiation-Hardened Differential Difference Amplifier Based on the Bipolar and Field Effect Technological Process / N. N. Prokopenko, O. V. Dvornikov, N. V. Butyrlagin, A. V. Bugakova // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014), October 2-4, 2014, Novosibirsk, Russia, Volume 1, pp. 29–34. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040870
 9. Дворников, О. Особенности аналоговых интерфейсов датчиков. Часть 2 [Текст] / О. Дворников, В. Чеховский, В. Дятлов, Н. Прокопенко // Современная электроника. – 2013. – № 3. – С. 58–63.
 10. Дворников, О. Интерфейсы датчиков для систем на кристалле [Текст] / О. Дворников, В. Чеховский, В. Дятлов, Н. Прокопенко // Современная электроника. – 2013. – № 8. – С. 40–47.
 11. Dvornikov O.V. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors / O.V. Dvornikov, V.A. Tchekhovski, V.L. Dziatlau, N.N. Prokopenko // Russian Microelectronics, 2016, vol. 45, No. 1, pp. 54-62, DOI: 10.1134/S1063739716010030.
 12. Дворников, О.В. Изменение параметров комплементарных биполярных транзисторов при воздействии ионизирующих излучений [Текст] / О.В. Дворников, В.А. Чеховский, В.Л. Дятлов, Ю.В. Богатырев, С.Б. Ластовский // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2015. – № 3. – С. 17–22.
 13. Buchner S. The Effects of Low Dose-Rate Ionizing Radiation on the Shapes of Transients in the LM124 Operational Amplifier / S. Buchner, D. McMorow, L. Dusseau and R.L. Pease // Nucl. Sci. IEEE Trans., vol. 55, no. 6, pp. 3314–3320, 2008. DOI: 10.1109/TNS.2008.2007952
 14. Franco F. J. Degradation of Power Bipolar Operational Amplifiers in a Mixed Neutron and Gamma Environment / F. J. Franco, Y. Zong, and J.A. Agapito // IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 54, no. 4, pp. 982–988, Aug. 2007. DOI: 10.1109/TNS.2007.892183
 15. Прокопенко, Н.Н. Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем: монография [Текст] / Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, С.Г. Крутинский ; под общ. ред. д.т.н., проф. Н.Н. Прокопенко; ФГБОУ ВПО «Южно-Рос. гос. ун-т. экономики и сервиса». – Шахты : ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. – 208 с.
 16. Holenarsipur P. Three is a Crowd for Instrumentation Amplifiers [Текст] / Maxim Integrated Products, Application Note 4034. – 2007. - pp. 1-12
 17. Szykowski J. CMRR analysis of instrumentation amplifiers / J. Szykowski // Electron. Lett., vol. 19, no. 14, pp. 547–549, 1983. DOI: 10.1049/el:19830371
 18. Pallis-Areny R. Common Mode Rejection Ratio in Differential Amplifiers / R. Pallis-Areny, J.G. Webster // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1991, vol. 40, No. 4. pp. 669 – 676. DOI: 10.1109/19.85332
 19. Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Бугакова А.В., Пахомов И.В. Операционный усилитель: заявка на патент Рос. Федерация. № 2015143966/08; заявл. 13.10.15
 20. Prokopenko N.N. Maximum ratings of voltage feedback and current feedback operational amplifiers in linear and nonlinear modes / N.N. Prokopenko, A.S. Budyakov, E.M. Savchenko, S.V. Korneev // 4th European Conference on Circuits and Systems for Communications, 2008 (ECCSC 2008), pp. 205–210. WOS:000259024700035

REFERENCES

- [1] Verbeeck J., Cao Y., Van Uffelen M., Mont Casellas L., Damiani C., Ruiz Morales E., Ranz Santana R., Meek R., Haist B., De Cock W., Vermeeren L., Steyaert M., Leroux P. A Mgy, low-offset

- programmable instrumentation amplifier IC for nuclear applications. 15th Eur. Conf. Radiat. Its Eff. Components Syst. (RADECS), Moscow, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/RADECS.2015.7365579 (in English)
- [2] Kugelstadt T. Getting the most out of your instrumentation amplifier design. *Analog Applications Journal*, 2005, pp. 25-29. (in English)
 - [3] Wurcer S., et al. Instrumentation Amplifiers Solve Unusual Design Problems. *EDN Electrical Design News*, Vol. 28, № 16, 1983, pp. 133-145. (in English)
 - [4] Averbukh V. Instrumentalnye usiliteli [Instrumental amplifiers]. *Shemotehnika [Circuitry]*, № 1 (3), 2001, pp. 26-29; *Shemotehnika [Circuitry]*, № 2 (4), 2001, pp. 22-24 (in English)
 - [5] Kitchin C., Counts L. A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers 3ND Edition. *Analog Devices, Inc.*, 2006. (in English)
 - [6] Säcker E., Guggenbühl W. A versatile building block: the CMOS differential difference amplifier. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1987, Vol. SC-22, pp. 287-294. DOI: 10.1109/JSSC.1987.1052715 (in English)
 - [7] Huang S.-C., Ismail M., Zarabadi S. R. A wide range differential difference amplifier: A basic block for analog signal processing in MOS technology. *IEEE Trans. Circuits Syst.-II*, 1993, Vol. 40, pp. 289-301. DOI: 10.1109/82.227369 (in English)
 - [8] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. The Main Connection Circuits of the Radiation-Hardened Differential Difference Amplifier Based on the Bipolar and Field Effect Technological Process. 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014), Novosibirsk, Russia, 2014, Vol. 1, pp. 29–34. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040870 (in English)
 - [9] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dzatlau V.L., Prokopenko N.N. Osobennosti analogovykh interfejsov datchikov. Chast' 2 [The features of the analog interfaces of the sensors. Part 2]. *Sovremennaja jelektronika [Modern electronics]*, 2013, № 3, pp. 58–63 (in Russian).
 - [10] Dvornikov O., Tchekhovski V., Dzatlau V., Prokopenko N. Interfejsy datchikov dlya sistem na kristalle [Sensor interface for systems-on-chip]. *Sovremennaja jelektronika [Modern electronics]*, 2013, № 8, pp. 40–47 (in Russian).
 - [11] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dzatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. *Russian Microelectronics*, 2016, Vol. 45, № 1, pp. 54-62, DOI: 10.1134/S1063739716010030. (in English)
 - [12] Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dzatlau V.L., Bogatyrev Yu.V., Lastovsky S.B. Izmenenie parametrov komplementarnykh bipolarnykh tranzistorov pri vozdejstvii ionizirujushchih izluchenij [Change of parameters of complementary bipolar transistors in case of influence of the ionizing radiation]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser.: Fizika radiacionnogo vozdejstviya na radioelektronnuju apparaturu [Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру]*, 2015, № 3, pp. 17–22. (in Russian)
 - [13] Buchner S., McMorro D., Dusseau L., Pease R.L. The Effects of Low Dose-Rate Ionizing Radiation on the Shapes of Transients in the LM124 Operational Amplifier. *Nucl. Sci. IEEE Trans.*, 2008, Vol. 55, № 6, pp. 3314–3320. DOI: 10.1109/TNS.2008.2007952 (in English)
 - [14] Franco F. J., Zong Y., Agapito J.A. Degradation of Power Bipolar Operational Amplifiers in a Mixed Neutron and Gamma Environment. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2007, Vol. 54, № 4, pp. 982–988. DOI: 10.1109/TNS.2007.892183 (in English)
 - [15] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Krutchinsky S.G. Jelementnaja baza radiacionno-stojkih informacionno-izmeritel'nyh sistem: monografija [The elements base of the radiation –hardened information and measuring systems: monograph] / pod obshh. red. d.t.n., prof. N.N. Prokopenko; FGBOU VPO «Juzhno-Ros. gos. un-t. jekonomiki i servisa [endorsed by D.Sc in engineering prof. N.N. Prokopenko; FSBEI of HPE “South Russia State University of Economics and Services”] Shahty : FGBOU VPO «JuRGUJeS» [Shakhty: FSBEI of HPE “SRSUES”], 2011, 208 p. (in Russian)
 - [16] Holenarsipur P. Three is a Crowd for Instrumentation Amplifiers. *Maxim Integrated Products, Application Note 4034*, 2007, pp. 1-12 (in English).
 - [17] Szykowski J. CMRR analysis of instrumentation amplifiers. *Electron. Lett.*, 1983, Vol. 19, № 14, pp. 547–549. DOI: 10.1049/el:19830371 (in English)
 - [18] Pallis-Areny R., Webster J.G. Common Mode Rejection Ratio in Differential Amplifiers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1991, Vol. 40, № 4, pp. 669 – 676. DOI: 10.1109/19.85332 (in English)
 - [19] Prokopenko N.N., Dvornikov O.V., Bugakova A.V., Pakhomov I.V. Operatsionnyy usilitel' - Operational amplifier. Application for a patent RF, № 2015143966/08, 2015 (In Russian).

- [20] Prokopenko N.N., Budyakov A.S., Savchenko E.M., Korneev S.V. Maximum ratings of voltage feedback and current feedback operational amplifiers in linear and nonlinear modes. 4th European Conference on Circuits and Systems for Communications, 2008 (ECCSC 2008), pp. 205–210. WOS:000259024700035 (in English)

Multichannel Radiation-Hardened Instrumentation Amplifier for Sensor Systems and Analog Interfaces of Demanding Application²

N.N. Prokopenko, N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova, A.A. Ignashin

*Don State Technical University,
1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russia, 344000
e-mail: prokopenko@sssu.ru*

Abstract – The article considers the design features of the instrumentation amplifier (IA) for sensor systems, realized on the radiation-hardened microcircuits of AC_1_4, AC_2_1 (OJSC “MRIMI”, Minsk city). The new architecture of IA is developed, which can operate without resistors of common negative feedback with classical bridge measuring circuits and provides higher common-mode rejection ratio. In IA the digital control of the transfer ratio is available due to the elements commutation of the array “R-2R” by CMOS transistors. The feature of the suggested IA lies in application of the transistors of various physical natures in its input stage – Bi-JFETs and JFETs. The use of the complementary CMOS transistors in the input stage of IA is prospective, besides one of them must have an internal channel and another one – an induced one. The low offset voltages and the absence of classical sources of the reference current, setting the steady-state behavior of the input differential stage, are typical for the suggested circuit of IA. A big number of inputs for signal processing of a large number of sensors is possible in IA. The modification of IA with higher fast response in the large signal mode, which is provided due to the application of the input differential stages with the extended range of active work, is suggested.

Keywords: instrumentation amplifier, sensor systems, analog interfaces, radiation hardness, differential difference amplifier.

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

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621. 039

ПРОБЛЕМА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В АТОМНОМ МАШИНОСТРОЕНИИ НА ПРИМЕРЕ ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ МАШИНЫ

© 2016 г. П.Д. Кравченко*, А.Д. Маляренко**

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

** *Белорусский национальный технический университет – БНТУ, Минск, Беларусь*

В статье рассмотрена проблема длительного применения громоздкого сложного транспортно-технологического оборудования на примере перегрузочной машины с жёсткими телескопическими звеньями для обслуживания ядерных реакторов типа ВВЭР. Предложена новая, упрощенная, конструктивная схема перегрузочной машины с канатным подвесом автоматических грузозахватных устройств, позволяющая снизить на порядок вес и количество конструктивных элементов и повысить уровень безотказности при эксплуатации.

Ключевые слова: перегрузочная машина, атомное машиностроение, рабочая штанга, канатный подвес, эвристический метод, проектирование, АЭС.

Поступила в редакцию 20.03.2016 г.

Машина перегрузочная МПС-В-1000-3.У4.2 для серийной реакторной установки ВВЭР-1000 предназначена для выполнения 18 операций перемещения и установки объектов на технологические позиции с обеспечением необходимых условий безопасности эксплуатации и точности выполнения операций всего транспортно-технологического комплекса [1].

Основные типы операций, выполняемых с помощью МП-1000, условно можно разделить на следующие подгруппы:

- выгрузка, транспортировка, установка кассет с тепловыделяющими элементами (ТВЭлами) и поглощающими элементами (пЭлами) или стержнями выгорающих поглотителей (свп);
- выемка, транспортировка и установка пучков пЭлов или свп;
- открывание, транспортировка, установка на заданную позицию и закрывание пробок гермопеналов или пеналов системы обнаружения дефектных сборок (СОДС);
- загрузка, транспортировка, установка гермопеналов в транспортные контейнеры и другие операции перемещения пеналов и кассет;
- осмотр мест установки объектов и контроль их положения с помощью специальных осмотровых устройств.

Конструктивная схема МП-1000 создана на основе концепции создания манипуляционных роботов-манипуляторов с жесткими звеньями.

Особенностью МП-1000 является применение в качестве основного, особо ответственного, исполнительного органа (ИО) жесткой длинной вертикальной телескопической рабочей штанги весом более 12 т, предназначенной для выполнения основных рабочих движений по вертикальной оси и создания вращающего момента $M_{вр}=1000$ Нм при открывании пробки гермопенала или пенала СОДС.

Машина МП-1000 весит более 84 т, является фактически мостовым краном с шириной подкрановой колеи моста 7300 мм и жестким подвесом ИО – рабочей штанги длиной более 14 м.

Известно множество конструкций подъемно-транспортного оборудования в виде мостовых кранов с гибким (канатным) и жестким подвесом исполнительных органов для захвата, перемещения и установки перемещаемых объектов на заданные технологические позиции.

Краны общемашиностроительные, металлургические, монтажные, краны-штабелеры и другие специализированные типы кранов выполняют множество операций различной сложности. Машина МП-1000 выполняет также множество операций, отличающихся по сложности только условиями обеспечения высокой точности позиционирования объектов в зоне с высоким уровнем радиоактивности и необходимостью обеспечения заданной величины вращающего момента относительно вертикальной оси объекта – пробки пенала.

Оценим конструктивное совершенство МП-1000 с применением общепринятых критериев.

В подъемно-транспортном машиностроении рассмотрим предлагаемый критерий, выражаемый отношением веса транспортирующей машины к весу перемещаемого объекта, называемый коэффициентом конструктивного совершенства $K_{кс}$:

$$K_{кс} = G_m / G_o,$$

где G_m – вес машины;

G_o – вес перемещаемого объекта.

При весе МП-1000 84830 кг (для 5 блока Нововоронежской АЭС) и весе кассеты с топливными элементами – основного перемещаемого объекта – 753 кг коэффициент конструктивного совершенства МП-1000 равен 112,6.

Чем меньше $K_{кс}$, тем выше конструктивное совершенство машины (при сравнимых условиях перемещения – времени и качества выполнения технологических операций).

Для мостовых кранов общепромышленного применения значение $K_{кс}$ близко к единице, для кранов с жестким подвесом объектов перемещения и кранов-штабелеров $K_{кс} = 2 \dots 4$.

При использовании аналогичного подхода в новой концепции [2, 4– 7] технологического процесса механической обработки и перемещения объектов тяжелого и атомного машиностроения предложены перспективные предложения по проектированию оборудования, позволяющие еще на предпроектной стадии принять решение об упрощенном экономичном способе обработки объектов с использованием в качестве критерия удельную металлоемкость, т. е. отношение веса обрабатываемого или транспортирующего оборудования к весу обрабатываемого или транспортируемого объекта.

После тщательного анализа всех операций, выполняемых всеми указанными типами подъемно-транспортных машин, можно заключить, что конструкция МП-1000 далека от совершенства.

Однако такие машины эксплуатируются уже более 30 лет.

Возникла проблема усовершенствования конструкций оборудования атомного машиностроения.

Принятию решения об использовании именно такой вышеуказанной схемы МП-1000 способствовали две главные причины:

1) Опасения конструкторов о возможности проявления нештатных ситуаций во время эксплуатации машины в опасной радиоактивной среде и задание при проектировании в связи с этим дополнительных коэффициентов запаса прочности и надежности элементов машины.

2) Отсутствие альтернативных проектных решений, выполненных с применением эвристических методов поиска лучших технических решений, что привело к созданию конструктивной схемы по подобию манипуляционных роботов-манипуляторов с длинными жесткими массивными телескопическими звеньями.

Кроме того, на принятие решения повлияло поведение лиц, принимающих решения (ЛПР) в условиях отсутствия конкурентоспособных альтернативных решений и недоверие к ПТМ с канатным подвесом объектов перемещения.

Заметим, что эвристический поиск лучшего технического решения [3], особенно в случае решения проблемы перемещения объекта, следует проводить с учетом принципов «паука», «муравья», перемещающих объекты массой, в десятки и сотни раз превышающие собственную массу и принцип «рыболова», который перемещает объекты массой, в тысячи раз превышающей массу удочки.

Подробный анализ операций, выполняемых известными типами ПТМ, привел к выводу, что перегрузочная машина может быть изготовлена по конструктивной схеме общемашиностроительного мостового крана с широко применяемым сдвоенным канатным полиспастом вместо рабочей штанги. Требуется только обеспечить выполнение ответственной операции поворота пробки пенала относительно вертикальной оси с применением вращающего момента $M_{вр} = 1000 \text{ Нм}$.

Решение о создании подвесных грузозахватных устройств, работающих на канатном подвесе, сначала было принято только для обеспечения условий поворота пробки пенала относительно вертикальной оси при движении по вертикали дополнительной нагрузочной массы, однако добавление промежуточной переходной втулки позволило как увеличить вращающий момент за счет увеличения плеча момента, так и осуществить поворот и захват пробки пенала за одну операцию. Рассмотрим логическую схему для предварительного сравнения конструктивных схем перегрузки объектов с жестким и гибким подвесом ИО для работы с объектами, представленную на рисунке 1.

Схема представляет собой объект 1 в виде пробки гермопенала, которую нужно открыть с приложением вращающего момента $M_{вр} = 1000 \text{ Нм}$ относительно вертикальной оси. На схеме рис. 1, а это происходит за счет применения электромеханического привода поворота рабочей штанги 2 относительно вертикальной оси. Машина перегрузки 3 в этом случае получается громоздкой и массивной. С применением гибкого подвеса 4 в виде подъемной лебедки крана с двойным полиспастом, к нижним блокам 6 которого подвешен исполнительный орган 7, захватывающий и поворачивающий объект под действием собственного и дополнительного веса, система явно упрощается.

Здесь работает безотказная сила тяжести, электромеханический привод не нужен. Тонкостенная трубная секция 5 служит только для страховки ИО вместе с объектом только во время транспортировки.

Предварительные ориентировочные расчеты показывают, что вес машины МПК с предложенной гибкой системой подвеса ИО составит не более 8т.

Это на порядок ниже веса применяемой более 30 лет машины МП1000.

Одной из основных причин принятия конструктивной схемы МП1000 было недоверие к конструкциям канатного подвеса, априори считающегося менее надежным, чем жесткая сплошная металлическая конструкция. Однако по теории надежности стальной канат, как соединение из множества параллельных элементов, при

увеличенных коэффициентах запаса, является более надежным, чем сплошная однородная металлическая конструкция. Более того, рабочая штанга, состоящая из трех последовательных элементов, уже на предпроектной стадии структурно оказывается менее надежной.

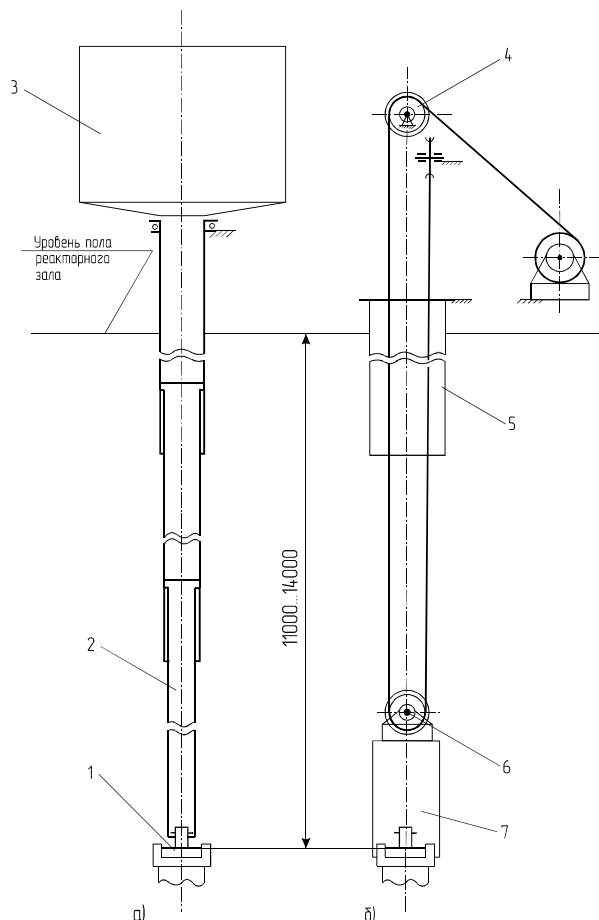


Рис. 1. – Предпроектная модель для сравнения схем перегрузки объектов:

- а) с жестким подвесом ИО; б) с гибким подвесом ИО; 1 – пробка гермопенала; 2 – рабочая штанга; 3 – машина МП1000; 4 – машина МПК с канатным подвесом ИО и объектов; 5 – страховочная труба; 6 – нижний блок сдвоенного полиспаста; 7 – автоматическое грузозахватное устройство с дополнительной нагрузочной массой.

Логическая схема, представленная на рисунке 1, является только исходной базовой. Для сравнения уровня надежности требуется конкретный расчет обеих схем по всем элементам.

Предварительно определенный вероятностный анализ безопасности [8] показал явное повышение уровня безопасности с применением машины перегрузки с канатным подвесом объектов.

Достоинства и недостатки обеих систем подвеса представлены в таблице 1.

Анализ параметров, представленных в таблице 1, требует внимательного подхода при рассмотрении каждого элемента. Если пункты 1 и 2 очевидны, то пункты 6, 7 и 8 требуется подтвердить расчетами параметров системы с гибким подвесом ИО. Пункты 3, 4 и 5 (особенно 5) также требуют строго расчетного обоснования, особенно с гибким подвесом ИО, а применение эвристических методов указывается нами как обязательный принцип при создании новой конструкции, т.к. авторами настоящей работы решения уже обоснованы и приняты, но это уровень «know-how».

Пункты 9, 10 и 11 показаны для подтверждения целесообразности рассмотрения

альтернативных конструктивных схем при проектировании такой сложной системы, как перегрузка топливных элементов в реакторе.

Комплексный анализ только логической схемы, назовем ее предпроектной, показывает перспективность применения системы с гибким подвесом ИО.

Таблица 1. – Сравнение достоинств и недостатков МП с жесткой и гибкой системами подвеса для работы с объектами

№	Параметр	Система с жестким подвесом	Система с гибким подвесом
1	2	3	4
1	Конструктивная сложность	Сложная	Простая
2	Практическая применимость	Широко применяется	Применяется редко
3	Надежность системы в целом	Обеспечивается за счет точного обеспечения требований при изготовлении и эксплуатации, что достигается с большими экономическими затратами	Обеспечивается за счет простоты конструктивной схемы. Надежность существенно выше. Расчетная
4	Точность выполнения технологических операций	Обеспечивается за счет сложной, но отработанной за длительный период эксплуатации конструктивной схемы и системы управления	Обеспечивается как простотой конструктивной схемы, так и простотой системы управления. Расчетная
5	Уровень сложности операции захвата, удержания, транспортировки и освобождения объекта	Весьма сложная, учитывая многозвенность исполнительных органов и многооперационность, связанную с многозвенностью	Простая, учитывая малозвенность системы. Требуется изобретательские решения по упрощению операций и повышению надежности системы
6	Требуемая точность наведения исполнительного органа на объект	± 3 мм, не более	10...15 мм, до 20 мм
7	Вес МП	Более 80 тс	Менее 8 тс
8	Время перегрузки объекта	Согласно требованиям, обеспечивающим надежность и безопасность операции. Известно по результатам эксплуатации	Согласно требованиям, обеспечивающим надежность и безопасность операции. Меньше времени работы системы с жестким подвесом. Расчетное
9	Ремонтопригодность	Низкая	Высокая
10	Обеспечение надежности и безопасности операции захвата, удержания, транспортирования и освобождения объекта	Согласно нормативным требованиям обеспечения безопасности работы с радиоактивными материалами	Согласно нормативным требованиям обеспечения безопасности работы с радиоактивными материалами
11	Сейсмостойкость	Расчетная. До 8 баллов по шкале MSK-64	Расчетная. Возможна до 9 баллов по шкале MSK-64

Указанные решения проверены экспериментально на модели в масштабе 1:5 подъемного устройства и АГЗУ машины перегрузочной с канатным подвесом МПК, представленной на рисунке 2.

Результаты проверки показали полную функциональную пригодность предложенной конструктивной схемы.

Предварительные ориентировочные расчеты показывают, что вес МПК не превосходит 8т при обеспечении работоспособности и безопасности эксплуатации в соответствии с техническими требованиями, предъявляемыми к машине перегрузочной МП-1000.

Теоретически обоснована работоспособность автоматического грузозахватного устройства АГЗУ в МПК [7]. На модели успешно проведено множество испытаний других автоматических грузозахватных устройств.

Вероятностный анализ безопасности эксплуатации МПК [8] показывает, что риск отказа МПК за время эксплуатации будет на порядок ниже риска отказа МП-1000.

Одним из основных условий, позволивших обеспечить повышение уровня вероятности безотказной работы МПК, явилось условие упрощения конструктивной схемы с применением канатного подвеса как элемента с множеством параллельных элементов системы и уменьшение на порядок количества деталей.

Упрощение конструктивной схемы логично привело к необходимости упрощения системы управления [9]. С учетом последних достижений в сфере промышленной электроники, в частности, опыта применения лазерных, оптических, ультразвуковых и других типов датчиков в различных условиях эксплуатации, система управления МПК, особенно при автоматическом режиме работы, существенно упрощена, однако этот уровень “know-how” и здесь не рассматривается.

Вышеизложенное доказывает полезность и целесообразность применения указанной методики получения и применения перспективных решений, как более простых, а следовательно, более надежных.

Окончательное решение о принятии в производство и эксплуатацию оборудования, спроектированного по предложенной методике, естественно, возможно только после экспериментальной проверки натурного образца МПК в заводских условиях и опытно-промышленной эксплуатации.

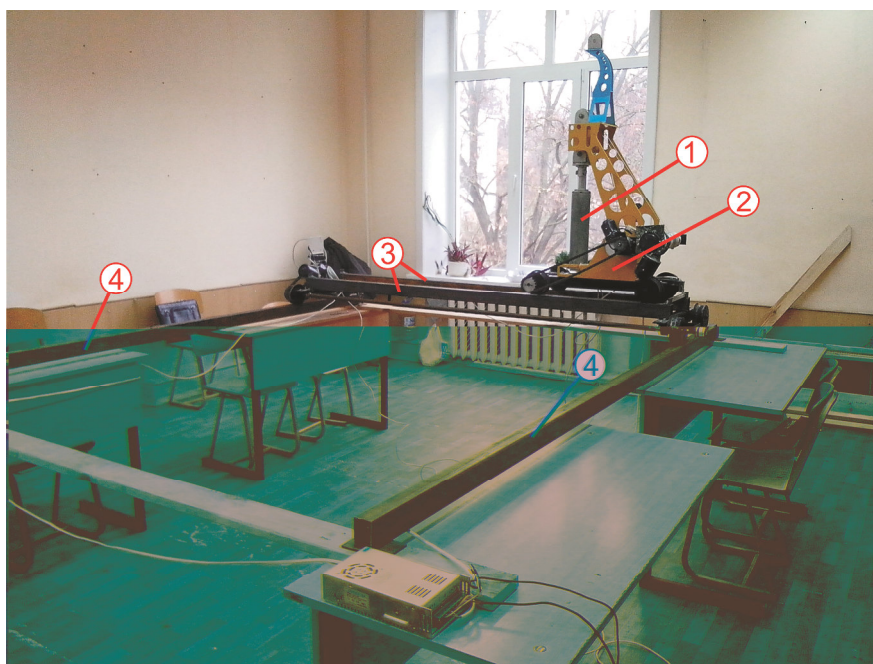


Рис. 2. – Модель МПК. 1 – подвесное АГЗУ с дополнительной нагрузочной массой; 2 – тележка с механизмами подъема и передвижения; 3 – подтележечные рельсы; 4 – подкрановые рельсы.

ВЫВОДЫ

1) При создании новой и модернизации существующей конструкции необходимо производить эвристический поиск различных конкурентоспособных вариантов.

2) Решение о разработке проекта с последующим внедрением его в производство и эксплуатацию должно быть принято в результате рассмотрения нескольких (не менее 2) альтернативных вариантов решений.

3) Решение должно быть принято после рассмотрения вариантов и заключения независимого профессионального экспертного совета, который должен руководствоваться общепринятыми критериями оценки технического совершенства, надежности и безопасности оборудования, применяемого в ядерной энергетике.

Настоящие выводы базируются на известных положениях методов проектирования и конструирования объектов новой техники, однако они вытекают из вышеприведенной методики, позволяющей показать практически полезные результаты инженерного проектирования именно с использованием методов эвристического поиска решения.

Создание конкурентоспособных решений при совершенствовании конструкций как модернизируемого, так и нового оборудования без использования интеллектуальной составляющей коллектива инженеров-конструкторов и изобретателей при доминирующей роли ЛПР приводит к неэффективным решениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панасенко, Н.Н. и др. Сейсмостойкие подъемно-транспортные машины атомных станций [Текст] / Н.Н. Панасенко, С.Г. Божко. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. – 208 с.
2. Кравченко, П.Д. и др. Проектирование нестандартного оборудования. Тяжелое и атомное машиностроение : монография [Текст] / П.Д. Кравченко А.Н. Дудченко, В.А. Нарыжный. – Шахты: ЮРГУЭС, 2001. – 279 с.
3. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества: Учеб. пособие для студентов вузов [Текст] / А.И. Половинкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
4. Кравченко П.Д., Яблоновский И.М. Сравнение конструктивных схем машин перегрузочных с жестким и гибким подвесом исполнительного органа [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский // Машиностроение и техносфера XXI века / сборник трудов XIII международной научно-технической конференции в г. Севастополе 11-16 сентября 2006 г. В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2006. Т. 2. – 324 с.
5. Пат. 2319236 Российская Федерация МПК C1 G21C 19/00 Устройство перегрузки топливных элементов в ядерном реакторе перегрузочными машинами с гибким подвесом объектов [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, В.С. Магальясов (РФ); заявитель и патентообладатель «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса (ЮРГУЭС)» – 2006119869/06; заявл. 06.06.2006; опубл. 10.03.2008 Бюл. №7.
6. Пат. 2319234 Российская Федерация C1 МПК G21C 3/00 Подвесное автоматическое устройство поворота крышки гермопенала [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский (РФ) заявитель и патентообладатель «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса (ЮРГУЭС)» – 2006112706/06; заявл. 17.04.2006; опубл. 10.03.2008 Бюл. №7.
7. Кравченко, П.Д. и др. Теоретическое обоснование работоспособности подвешного устройства для поворота пробки пенала в реакторе типа ВВЭР [Текст] / П.Д. Кравченко, И.М. Яблоновский, В.А. Нарыжный // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2007. – №4. – С. 53–58.
8. Яблоновский И.М. Вероятностный анализ безопасности машины перегрузочной канатной для реакторов типа ВВЭР [Текст] / И.М. Яблоновский // Тяжелое машиностроение. – 2008. – №3. – С. 5–8.
9. Шиянов А.И., Герасимов М.И., Муравьев И.В. Системы управления перегрузочных манипуляторов атомных электростанций с ВВЭР [Текст] / А.И. Шиянов, М.И. Герасимов, И.В. Муравьев. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 176 с.

REFERENCES

- [1] Panasenkov N.N., Bozhko S.G. Seysmostoykie poemno-transportnye mashiny atomnykh stantsiy [Aseismic hoist transport vehicles of nuclear power plants]. Krasnoyarsk. Pub. Krasnoyarskogo universiteta [Publishing house of Krasnoyarsk university], 1987. 208 p. (in Russian)
- [2] Kravchenko P.D., Dudchenko A.N., Naryzhnyy V.A. etc. Proektirovanie nestandartnogo oborudovaniya. Tyazheloe i atomnoe mashinostroenie [Design of the non-standard equipment. Heavy and atomic mechanical engineering]: monografiya [monograph]. Shakhty. Pub. YuRGUES [Southern Russian state university of economy and service], 2001, 279 p. (in Russian)
- [3] Polovinkin A.I. Osnovy inzhenernogo tvorchestva: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov [Bases

- of engineering creativity. Manual for students of higher education institutions]. M. Pub. Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1988. 368 p. (in Russian)
- [4] Kravchenko P.D., Yablonovskiy I.M. Sravnenie konstruktivnykh skhem mashin peregruzochnykh s zhestkim i gibkim podvesom ispolnitel'nogo organa [Comparing of constructive diagrams of machines overload with a rigid and flexible suspension of executive body]. Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka [Mechanical engineering and technosphere of the 21st century]: sbornik trudov XIII mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v g. Sevastopole 11-16 sentyabrya 2006 g. [the collection of works XIII of the international scientific and technical conference in Sevastopol on September 11-16, 2006.] V 5-ti tomakh [in 5 volumes]. Donetsk. Pub. DonNTU [Donetsk national technical university], 2006. Vol. 2. 324 p. (in Russian)
- [5] Kravchenko P.D., Yablonovskiy I.M., Magalyasov V.S. (RF). Patent 2319236 Rossiyskaya Federatsiya MPK C1 G21C 19/00. Ustroystvo peregruzki toplivnykh elementov v yadernom reaktore peregruzochnymi mashinami s gibkim podvesom obektov [The patent 2319236 the Russian Federation MPK C1 G21C 19/00 the Device of an overload of fuel elements in a nuclear reactor by overload machines with a flexible suspension of objects]. Zayavitel i patentoobladatel «Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i servisa (YuRGUES) 2006119869/06 [the applicant and the patent holder "The southern Russian state university of economy and service (SRSUES) – 2006119869/06]; zayavl [stated]. 06.06.2006; opubl [published]. 10.03.2008. Byul [bulletin]. №7. (in Russian)
- [6] Kravchenko P.D., Yablonovskiy I.M. (RF). Patent 2319234 Rossiyskaya Federatsiya S1 MPK G21C 3/00 Podvesnoe avtomaticheskoe ustroystvo povorota kryshki germopenala. Zayavitel i patentoobladatel «Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet ekonomiki i servisa (YuRGUES) [The patent 2319234 of Russian Federation C1 MPK of G21C 3/00 the Suspension automatic device of turn of a cover germopenat. The applicant and the patent holder "The southern Russian state university of economy and service (SRSUES) – 2006119869/06] – 2006112706/06; zayavl [stated]. 17.04.2006; opubl [published]. 10.03.2008. Byul [bulletin]. №7. (in Russian)
- [7] Kravchenko P.D., Yablonovskiy I.M., Naryzhnyy V.A. Teoreticheskoe obosnovanie rabotosposobnosti podvesnogo ustroystva dlya povorota probki penala v reaktore tipa VVER [Theoretical reasons for operability of the suspension device for turn of cork of a case in the PWR reactor]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical science]. 2007, №4, ISSN 0321-2653, pp. 53-58 (in Russian)
- [8] Yablonovskiy I.M. Veroyatnostnyy analiz bezopasnosti mashiny peregruzochnoy kanatnoy dlya reaktorov tipa VVER [The probable analysis of safety of the machine overload rope for PWR reactors]. Tyazheloe mashinostroenie [heavy engineering]. 2008, №3, ISSN 1024-7106, pp. 5–8. (in Russian)
- [9] Shiyayev A.I., Gerasimov M.I., Muravev I.V. Sistemy upravleniya peregruzochnykh manipulyatorov atomnykh elektrostantsiy s VVER [Management systems of overload pointing devices of nuclear power plants with PWR reactor]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1987, 176 p. (in Russian)

Problem of Transport Technology Equipment Improving in Nuclear Engineering Using Reloading Machine as an Example

P.D. Kravchenko*, A.D. Maliarenko**

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

** Department "Trade and Advertising Equipment", Belarusian National Technical University "BNTU",
18a building, 65 Nezavisimosty Ave, Minsk, Belarus, 220013
e-mail: amalyar55@mail.ru

Abstract –The problem of longstanding use of cumbersome complicated transport technology equipment using the example of the reloading machine with rigid telescopic elements for PWR nuclear reactors is considered in article. New simplified construction of reloading machine with rope type hang of automatic grasp device is offered, which led to decrease of construction weight, number of elements and to increase the level of safety.

Keywords: reloading machine, nuclear engineering, working rod, rope hang, heuristic method, design, NPP.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.566.6, 621.874.7

**ОСОБЕННОСТИ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН ЭНЕРГОБЛОКОВ С РЕАКТОРАМИ
ВВЭР-1000**

© 2016 А.А. Лапкис, В.Н. Никифоров, О.Ю. Пугачева

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

В 2014-2015 гг. выполнен значительный объем работ по продлению срока эксплуатации машин перегрузочных и транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива для энергоблоков Балаковской АЭС. В связи с пересмотром НТД (научно-технической документации) с момента ввода энергоблока в эксплуатацию, проведен глубокий анализ как собственно НТД, так и конструкторских и эксплуатационных документов. Выявлено отсутствие утвержденных методик продления срока эксплуатации для данного типа оборудования. Анализ документов показал, что машины сконструированы со значительным запасом сейсмостойкости и удовлетворяют пересмотренным НТД.

Поставлена исследовательская задача выявления основных повреждающих факторов и оценки остаточного ресурса с их учетом для механической части машин перегрузочных и транспортно-технологического оборудования перегрузки топлива.

Составлены и согласованы с разработчиками и эксплуатантами машин перегрузочных программы обследования индивидуально на каждую машину (и набор ТТО (текущего технического обслуживания), различающийся по энергоблокам).

С применением методов визуального и неразрушающего контроля проведен поиск повреждающих факторов. Обследование выявило отсутствие деградации металла, что позволило отбросить большинство факторов как не ограничивающих ресурс МП и ТТО. Для оценки остаточного ресурса выделен главный – циклическое нагружение.

Для оценки ресурса выбраны невосстанавливаемые элементы – металлоконструкции моста. Анализ циклической прочности позволил обосновать срок продления эксплуатации, равный первоначально назначенному – 30 лет.

По итогам работы сформулирована необходимость в разработке руководящего документа, регламентирующего продление срока эксплуатации механической части машин перегрузочных и транспортно-технологического оборудования для перегрузки топлива энергоблоков ВВЭР-1000.

Ключевые слова: атомная энергетика, АЭС, реактор, ВВЭР, перегрузка топлива, ППР (планово-предупредительный ремонт), ядерное топливо, машина перегрузочная, транспортно-технологическое оборудование, грузоподъемные механизмы, диагностика, обследование, продление ресурса.

Поступила в редакцию 15.03.2016 г.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОБСЛЕДОВАНИЯ

Рассматривая даты ввода в эксплуатацию энергоблоков АЭС, несложно заметить, что в 2016-2024 гг. истекает назначенный срок службы у четырех российских, шести украинских и двух болгарских реакторов ВВЭР-1000. Подходит к концу и срок службы оборудования энергоблоков, строительство которых началось в 1980-е годы, а

завершилось только в 1990-е или 2000-е. Для эксплуатирующих организаций остро стоит задача провести работы по продлению срока эксплуатации (далее – ПСЭ) и получить лицензии на срок продления. Лицензирование включает в себя большой объем работ по оценке остаточного ресурса оборудования, в число которого входят и те устройства, которые используют для перегрузки топлива:

- машины перегрузочные (далее – МП), изображенные на рис. 1;
- захваты: чехлов, кластера, кассеты;
- устройства для транспортировки шахты, платформы ВБ и БЗТ;
- гидрозатворы скользящие;
- кантователи;
- пеналы герметичные и пеналы системы обнаружения дефектных сборок;
- другое транспортно-технологическое оборудование (далее – ТТО).



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

В 2014 году перед НИИ АЭМ встала задача об обосновании продления срока эксплуатации более чем 25 единиц такого оборудования (включая две МП) на энергоблоках №№1 и 2 Балаковской АЭС. Первой же проблемой, с которой пришлось столкнуться, оказалось отсутствие утвержденных методик ПСЭ на большинство разновидностей оборудования, подвергаемого обследованию.

Нельзя сказать, что отсутствие полное – так, например, ПСЭ системы управления МП осуществляется по руководящему документу РД ЭО 0319-01 «Методика и программа оценки технического состояния и остаточного ресурса системы управления механизмами перегрузочной машины МПС-В-1000-ЗУ4 для АЭС с реакторами ВВЭР-1000». Вместе с тем (для металлоконструкций моста и тележки, рабочей штанги, ТТО) объем контроля, выбор главных повреждающих факторов, выбор предельного состояния и методики расчета остаточного ресурса остаются в зоне ответственности исполнителя работ. Ограничениями при этом служат в основном такие основополагающие документы, как [1, 2, 3].

Таким образом, оказалось возможным поставить исследовательскую задачу о выявлении основных повреждающих факторов и оценке остаточного ресурса с их учетом для ТТО и механической части МП.

В отсутствие необходимых нормативно-технических документов обследование и обоснование остаточного ресурса должно проводиться по индивидуально разработанной программе. Разработанные для обоих энергоблоков программы имели следующие особенности:

а) Учитывая сложность и ответственность оборудования, для программ предусмотрели широкий круг согласования, включающий проектантов АЭС и реакторной установки, эксплуатирующую организацию, разработчиков МП, головную материаловедческую организацию.

б) Программы предусматривали тщательный анализ эксплуатационной документации, включая: все сведения о ремонтах и модернизациях МП и ТТО, графиков и протоколов испытаний.

в) Программы учитывали, что штрафы являются сосудами по ПНАЭ Г-7-008-89 [4], а прочее оборудование относится к грузоподъемному по НП-043-11 [5].

г) В обязательном порядке предписывались нивелировка и тщательный осмотр рельсовых путей с предъявлением требований, аналогичных их заводским требованиям по дефектации.

д) Программы содержали требования к функциональной диагностике, то есть проверке работоспособности обследуемого оборудования.

е) Программы не предусматривали конкретный выбор главного повреждающего фактора и предельного состояния – это предполагалось сделать после осмотра и неразрушающего контроля оборудования.

На момент составления программы предполагались следующие пути возможного разрушения оборудования:

- коррозионный и (или) эрозионный износ;
- деградация конструкционных материалов под действием ионизирующих излучений;
- накопление усталостных повреждений под циклической механической нагрузкой.

2. АНАЛИЗ ДОКУМЕНТАЦИИ

Многие НТД с момента ввода энергоблока в эксплуатацию были пересмотрены, поэтому потребовался глубокий анализ как собственно НТД, так и конструкторских, и эксплуатационных документов.

3. ОБСЛЕДОВАНИЕ

Ни одному из путей к разрушению, перечисленных в ч. 1, до проведения обследования не представляется возможным отдать предпочтение, чтобы назвать основным повреждающим фактором. Этим обусловлен и выбор методов контроля.

Для выявления видимых дефектов, которые

– могут влиять на циклическую прочность оборудования и/или надежность его работы;

– делают оборудование неработоспособным,

предусмотрен *визуально-измерительный контроль* для всех элементов МП и ТТО, доступных для осмотра, в объеме не менее, чем требуется инструкцией по дефектации извода-изготовителя. Для крановых путей (моста МП, тележки МП и тележки токоподвода моста) предусмотрено геодезическое обследование.

Для определения деградации физико-механических свойств металла МП и ТТО предусмотрены *замеры твердости*. Следует заметить, что если снижение твердости говорит об ухудшении свойств сопротивления кратковременному разрушению, то рост твердости является свидетельством радиационного охрупчивания, ухудшающего

циклическую прочность.

Для выявления коррозионно-эрозионного износа применяется *ультразвуковая толщинометрия*. Результаты замеров подлежали сравнению с конструкторскими значениями толщины элементов. Кроме того, расчет на прочность на этапе эксплуатации в соответствии с руководящим документом [2] выполняется также по фактическим значениям толщины.

Для оценки работоспособности элементов МП и ТТО предусмотрена функциональная диагностика. Для элементов, которые имеют документированные инструкции по функциональной диагностике, рекомендуется придерживаться этих инструкций. Для всех остальных на основе технических условий и инструкций по эксплуатации разработаны индивидуальные процедуры, при которых контролируется состояние подвижных деталей, легкость их перемещения, надежность фиксации, работа сигнальных механизмов и т.п.

Для выполнения требования [4] для пеналов герметичных и пеналов СОДС предусмотрены гидроиспытания на прочность и плотность. Однако при анализе документов выяснилось, что пеналы регулярно подвергаются гидроиспытаниям без нарушений от установленного порядка. Можно заключить, что прочность и плотность пеналов обеспечены и регулярно контролируются.

4. АНАЛИЗ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Сейсмостойкость оборудования, выполняющего ядерно-опасные операции по транспортировке отработанного ядерного топлива, заслуживает подробного рассмотрения. Авария на АЭС Фукусима в 2011 году показала, насколько опасной может быть недооценка внешних экстремальных воздействий при проектировании. При этом с 2002 года в России введены актуальные нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01 [6], после чего на всех АЭС была проведена кампания по проверке соответствия расчетных нагрузок требованиям этих вновь принятых норм. На Балаковской АЭС в 2006 году ФГУП «Атомэнергопроект» актуализировал сейсмические нагрузки, выдав новые спектры нагрузок. Для отметки размещения МП (+41,4м) они приведены на рисунке 2.

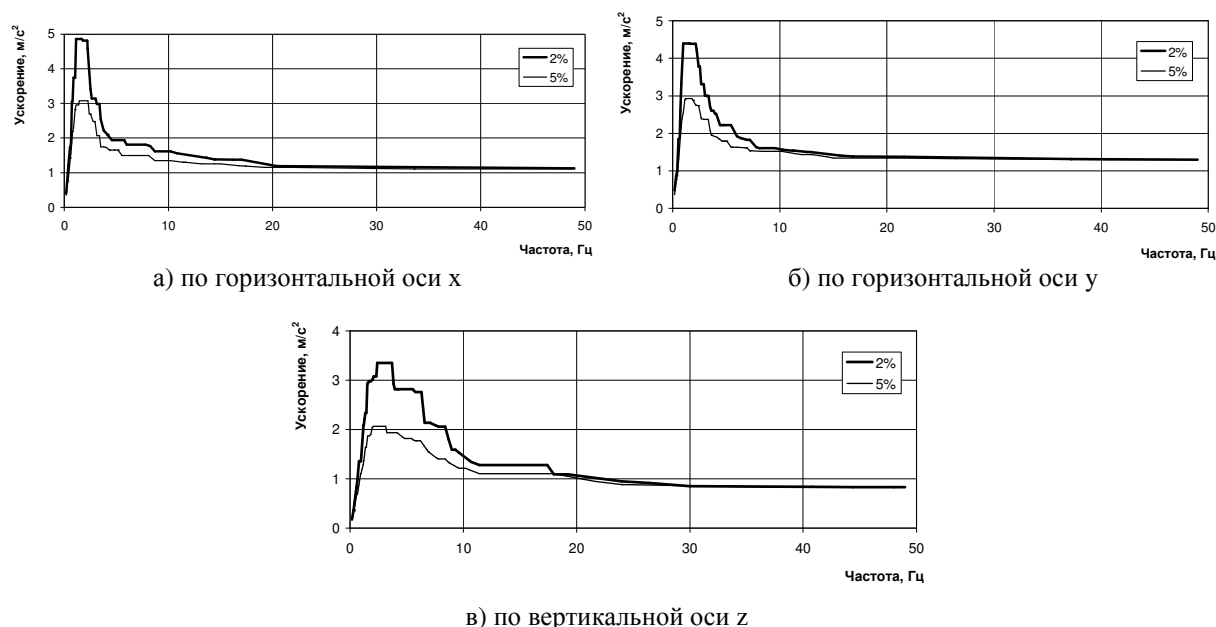


Рис. 2. – Спектры сейсмической нагрузки при МРЗ на отметке размещения МП

Учитывая, что МП и ТТО, размещаемые на данной отметке, рассчитывались производителем на нагрузку со спектром, приведенным на рисунке 3, можно провести сопоставление и сделать вывод о сейсмостойкости МП и ТТО современным нормам.

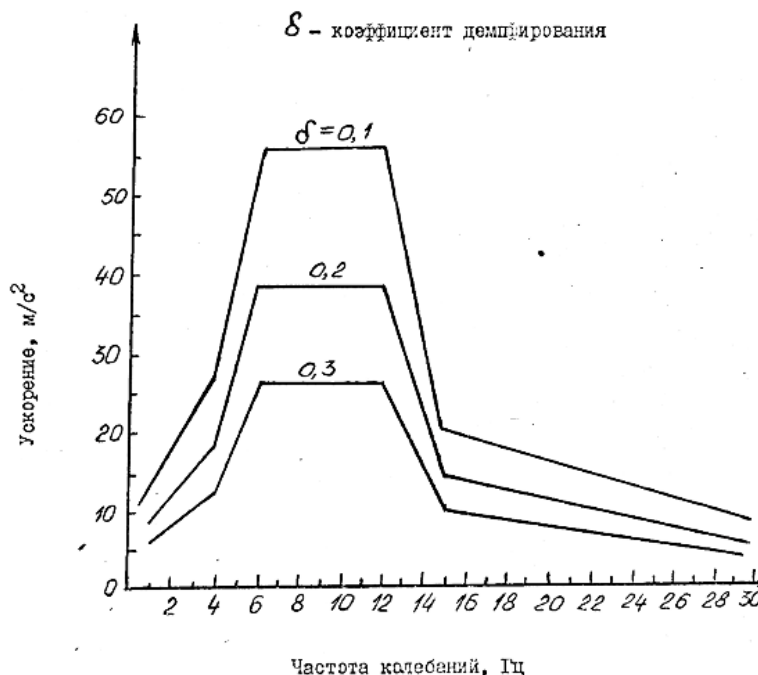


Рис. 3. – Расчетный спектр сейсмической нагрузки при МРЗ 9 баллов для МП и ТТО [7,8]

5. ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

Обследование МП и ТТО энергоблоков Балаковской АЭС в соответствии с пп. 1-4 показало, что оборудование в основном находится в работоспособном состоянии. Визуально-измерительный контроль позволил выявить элементы, подвергшиеся механическому износу и деформации. Один из захватов чехла по результатам замеров его искривления рекомендован к ремонту или замене.

Для проведения неразрушающего контроля, в частности, замеров твердости, в соответствии с национальными нормами, удовлетворительно подходит использование компактных ручных твердомеров [9]. Замеры толщины и твердости металла не выявили ни деградации свойств металла (снижения прочности, охрупчивания), ни коррозионного или эрозионного износа. Таким образом, методом исключения, а также учитывая опыт НИИ АЭМ [10] в качестве повреждающего фактора, ограничивающего ресурс МП и ТТО, было признано циклическое нагружение. Соответствующим предельным состоянием для этого фактора является образование усталостных макротрещин.

Условие прочности металла МП и ТТО для данного предельного состояния может быть записано в соответствии с Нормами [7]:

$$a = \sum_i \frac{N_i}{[N_i]} \leq [a],$$

где a – накопленная циклическая повреждаемость,

N_i – число циклов i -го вида, которые рассчитываемое изделие должно отработать

за весь срок службы;

$[N_i]$ – допускаемое число циклов данного вида;

$[a]=1$ – допускаемая циклическая повреждаемость.

Для расчета N_i требуется вся доступная информация о фактически отработанных циклах для каждого элемента оборудования. Для этого совместно с цехом-владельцем оборудования был проведен анализ его работы за прошедший срок эксплуатации. Для всех элементов было подсчитано число циклов нагружения и выписана справка соответствующего содержания. Анализ позволил также выявить число циклов нагружения за один ППР энергоблока – это позволило перевести результаты расчета на прочность из допускаемого числа циклов в допускаемое число ППР.

Расчет на прочность на этапе эксплуатации выполняется по фактическим свойствам металла [2] (толщина и твердость). Для перевода твердости в нормативные механические свойства, соответствующие Нормам расчета на прочность (временное сопротивление R_m) используют методику РД ЭО 0027-2005 [10]. Временное сопротивление углеродистой стали конструкции моста рассчитывают по формуле таблицы 6 [11]:

$$R_m = 103 + 2,66HB + 0.00088HB^2$$

Условный предел текучести $R_{0,2}$ принимается в соответствии с техническими условиями на материал или по Нормам расчета на прочность [7].

Для расчета циклической прочности была построена упрощенная модель металлоконструкции моста (см. рис. 4), к которой приложили весовые нагрузки. В качестве самого тяжелого цикла нагружения был принят следующий. Исходное и конечное состояния – тележка не нагружена, находится у края моста. Промежуточное состояние – тележка нагружена весом ТВС и находится в середине моста.

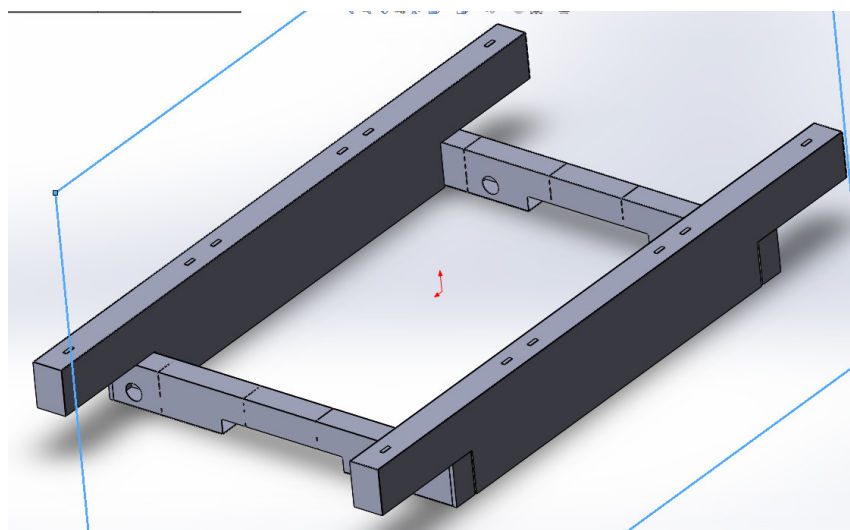


Рис. 4. – Расчетная модель металлоконструкции моста

Расчет напряженных состояний был выполнен методом конечных элементов в программном коде Zenit-95. Амплитуда напряжений цикла определялась как наиболее опасный из результатов поузлового вычитания начального и промежуточного, начального и конечного или промежуточного и конечного состояний. Допускаемое число циклов было определено по стандартной методике [7, разд. 5] с применением кривой усталости (см. рис. 5).

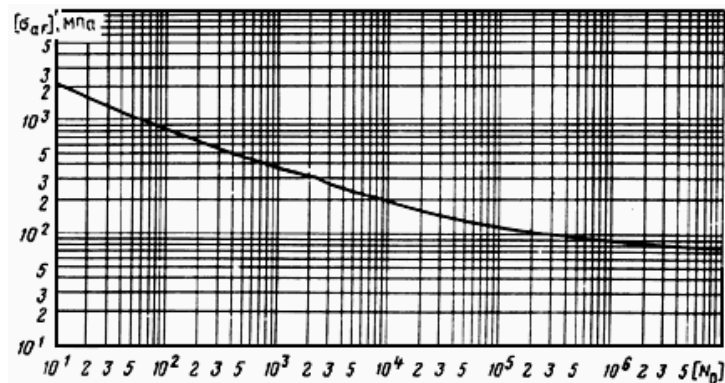


Рис. 5. – Кривая усталости стали перлитного класса [7]

Чтобы перевести полученное число циклов нагружения в календарные сроки ПСЭ, совместно с ОЯБиН (отдел ядерной безопасности и надежности) был выполнен анализ, позволивший рассчитать средний и минимальный (с заданной доверительной вероятностью) интервал времени между ППР энергоблока. Таким образом, удалось сделать вывод о том, что остаточного ресурса хватает для продления срока эксплуатации не менее, чем на 50 ППР, что означает в среднем 75 и не менее 30 лет эксплуатации.

Для дальнейшего упрощения процедур ПСЭ перспективным представляется создание интеллектуальной системы по обследованиям и ремонтам машин перегрузочных, эксплуатируемых на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200, в соответствии с подходом, описанным в [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа позволяет утверждать, что:

- имеется необходимость в составлении руководящего документа по продлению срока эксплуатации машин перегрузочных МПС-В-1000 с транспортно-технологическим оборудованием;
- за 30 лет нормальной эксплуатации металлоконструкций машин перегрузочных и транспортно-технологического оборудования в условиях энергоблоков ВВЭР-1000 металл не испытывает деградации свойств. Основным повреждающим фактором является циклическое механическое нагружение;
- расчетный остаточный ресурс основных металлоконструкций МП достаточен для выполнения еще не менее 50 ППР энергоблока и позволяет продлить срок эксплуатации еще на 30 лет;
- по результатам обследования могут быть приняты решения о продлении эксплуатации МП и ТТО на 30 лет и откорректированы мероприятия по управлению ресурсными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СТО 1.1.1.01.007.0281-2010. Управление ресурсными характеристиками элементов энергоблоков атомных станций [Текст].
2. РД ЭО 0330-2001. Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации [Текст].
3. СТО 1.1.1.01.006.0327-2008. Продление срока эксплуатации блока атомной станции [Текст].
4. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и

- трубопроводов атомных энергетических установок [Текст].
5. НП-043-11. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов для объектов использования атомной энергии [Текст].
 6. НП 031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций [Текст].
 7. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст].
 8. ТУ 108.1361-85. Машина перегрузочная МПС-В-1000 3У4.2. [Текст]
 9. Aslanyan E.G. Metrological facilities for measuring hardness // Measurement Techniques. 2005, Vol. 48, №1, pp. 57–63.
 10. Адаменков, К.А. и др. Опыт проведения работ по обследованию технического состояния и оценке остаточного ресурса машин перегрузочных типа МПС-В-1000-3У4.2. [Текст] / К.А. Адаменков, В.Н. Никифоров, Д.В. Сиротин и др. // Тез. докл. II всерос. науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», г. Подольск, 19-23 ноября 2001 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2001. – С. 117–118.
 11. РД ЭО 0027-2005. Руководящий документ. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости [Текст].
 12. Kuznetsov K.A. Methods, models, and means of increasing the efficiency of the estimation of the technical conditions and residual operation life of technical devices // Journal of machinery manufacture and reliability. 2014, Vol. 43, №6, ISSN 1052-6188, DOI: 10.3103/S1052618814060053, pp. 497-502.

REFERENCES

- [1] STO 1.1.1.01.007.0281-2010. Upravlenie resursnymi kharakteristikami elementov energoblokov atomnykh stantsiy [STO 1.1.1.01.007.0281-2010. Control of resource characteristics of elements of power units of nuclear power plants]. (in Russian)
- [2] РД ЭО 0330-2001. Rukovodstvo po raschetu na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov reaktornykh ustanovok RBMK, VVER i EGP na stadii ekspluatatsii [RD EO 0330-2001. A manual by calculation on durability of the equipment and pipelines of reactor installations of RBMK, PWR and EGP at an operation stage]. (in Russian)
- [3] STO 1.1.1.01.006.0327-2008. Prodlenie sroka ekspluatatsii bloka atomnoy stantsii [STO 1.1.1.01.006.0327-2008. Extension of period of operation of the unit of nuclear power plant]. (in Russian)
- [4] ПНАЭ Г-7-008-89. Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [PNAE G-7-008-89. Rules for the Construction and Safe Operation of the equipment and pipelines of atomic power stations]. (in Russian)
- [5] NP-043-11. Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii gruzopodemnykh kranov dlya obektov ispolzovaniya atomnoy energii [NP-043-11. Rules for the Construction and Safe Operation of load-lifting easels for objects of use of atomic energy]. (in Russian)
- [6] NP 031-01. Normy proektirovaniya seysmostoykikh atomnykh stantsiy [NP-043-11. Rules for the Construction and Safe Operation of load-lifting easels for objects of use of atomic energy].
- [7] PNAE G-7-002-86. Normy rascheta na prochnost oborudovaniya i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok [PNAE G-7-002-86. Norms of calculation on durability of the equipment and pipelines of atomic power stations]. (in Russian)
- [8] TU 108.1361-85. Mashina peregruzochnaya MPS-V-1000 3U4.2. [TU 108.1361-85. Machine overload MPS-V-1000 3U4.2.]. (in Russian)
- [9] Aslanyan E.G. Metrological facilities for measuring hardness. Measurement Techniques. 2005, №1, ISSN 0543-1972, DOI: 10.1007/s11018-005-0100-6, pp. 57–63. (in English)
- [10] Adamenkov K.A., Nikiforov V.N., Sirotin D.V. etc. Opyt provedeniya rabot po obsledovaniyu tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenke ostatochnogo resursa mashin peregruzochnykh tipa MPS-V-1000-3U4.2. [Experience of work on survey of technical condition and an assessment of a residual resource of machines overload the MPS-V-1000-3U4.2 type.] Tezisy dokladov II vsrossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER» [Theses of the report of the II All-Russian scientific and technical conference "Safety of the NPP with PWR"], Podolsk, 19-23 noyabrya 2001 [November, 19-23, 2001]. Podolsk. Pub. OKB «Gidropress» [Experimental design bureau "Hydraulic press"], 2001, pp. 117–118. (in Russian)
- [11] РД ЭО 0027-2005. Rukovodyashchiy dokument. Instruktsiya po opredeleniyu mekhanicheskikh svoystv metalla oborudovaniya atomnykh stantsiy bezobraztsovymi metodami po kharakteristikam tverdosti [RD EO 0027-2005. The leading document. The instruction for determination of

mechanical properties of metal of the equipment of nuclear power plants by bezobraztsovy methods according to characteristics of hardness] (in Russian)

- [12] Kuznetsov K.A. Methods, models, and means of increasing the efficiency of the estimation of the technical conditions and residual operation life of technical devices. Journal of machinery manufacture and reliability. 2014, Vol. 43, №6, ISSN 1052-6188, DOI: 10.3103/S1052618814060053, pp. 497-502. (in English)

Operation Extension Features of Overload Machines of PWR-1000 Reactors Power Units

A.A. Lapkis, V.N. Nikiforov, O.Yu. Pugacheva

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

Abstract – The considerable amount of works on machine operation extension of overload and transport technology equipment of fuel overload is made for Balakovo NPP in 2014-2015. Due to the revising STD (scientific and technical documentation) from the moment of power unit input in operation, the deep analysis of STD, designer and operational documents is carried out. Absence of the approved techniques of operation extension for this type of the equipment is revealed. The document analysis showed that machines are constructed with the considerable inventory of seismic stability and satisfy with STD.

The research task of detection of the main faulting factors and residual resource assessment with their account for machine mechanical part of overload and transport technology equipment of fuel overload is set.

Programs of survey on each machine are made individually and agreed with developers and operators of overload machines (and the set of COM (current operating maintenance) differing on power units).

Search of faulting factors is carried out using methods of visual and non-destructive testing. Survey revealed absence of degradation of metal that allowed to discard the majority of factors as not limiting the overload machines and COM resource. For an assessment of a residual resource main ones as cyclic loading is selected.

A bridge metalwork are selected to be nonrestorable elements for an assessment of a resource . The analysis of cyclic durability allowed to justify period of extension of operation, equal originally to assigned – 30 years.

Need for development of the leading document regulating extension of operation period of mechanical part of overload machines and transport technology equipment for overload of PWR-1000 fuel is formulated following the results of operation.

Keywords: nuclear power, NPP, reactor, PWR, fuel overload, SPM (scheduled preventive maintenance), nuclear fuel, overload machine, transport technology equipment, load-lifting mechanisms, diagnostics, survey, resource extension.

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

УДК 621.039:006.1

**ПРОГРАММЫ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ВИТИ НИЯУ
МИФИ ДЛЯ НП СРО «СОЮЗАТОМСТРОЙ», ПОВЫШАЮЩИЕ
УРОВЕНЬ БЕЗОПАСНОСТИ СООРУЖЕНИЙ ОИАЭ**

© 2016 В.С. Опекунов*, В.А. Руденко, В.А. Денисов*, А.В. Стамбулко*,
Ю.В. Заяров**, Ю.И. Пимшин****

** Саморегулируемая организация атомной отрасли, Москва*

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

В статье представлены динамика основных показателей и анализ проведения курсов повышения квалификации в ВИТИ НИЯУ МИФИ для руководителей и специалистов организаций, являющихся членами СРО НП (саморегулируемой организации некоммерческого партнерства) «СОЮЗАТОМСТРОЙ» за 2010–2015 годы. Предложены мероприятия, позволяющие повысить уровень подготовки слушателей за счет актуализации и вариативности программ повышения квалификации, а так же обеспечивающие расширение технологии образовательной деятельности ВИТИ НИЯУ МИФИ для организаций-членов СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ. Для программ «Устройство бетонных и железобетонных монолитных конструкций при сооружении ОИАЭ (объектов использования атомной энергии)», «Монтаж оборудования объектов использования атомной энергии» и «Геодезические работы, выполняемые на строительных площадках в процессе сооружения ОИАЭ» разработаны соответствующие вариативные модули «Возведение и приемо-сдаточные испытания защитных герметичных оболочек объектов использования атомной энергии», «Монтаж подъемных сооружений на ОИАЭ» и «Разработка проектов производства геодезических работ на ОИАЭ».

Ключевые слова: СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ», атомная энергетика, программы и курсы повышения квалификации, вариативность программ, руководители и специалисты строительных организаций.

Поступила в редакцию 10.03.2016 г.

Безопасность эксплуатации атомных электростанций формируется на этапе выполнения строительно-монтажных работ, качество которых в значительной мере зависит от уровня квалификации персонала строительных организаций и предприятий. ВИТИ НИЯУ МИФИ с 2011 года принимает участие в образовательном проекте СРО атомной отрасли, направленном на развитие отраслевой системы подготовки персонала организаций-членов СРОАО. На образовательной площадке НИЯУ МИФИ в г. Волгодонске проводятся курсы повышения квалификации для руководителей и специалистов организаций, являющихся членами СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ», в том числе выполняющих строительно-монтажные работы на объектах Ростовской АЭС. За пять лет (с 2011 по 2015 годы) здесь повысили квалификацию более 800 слушателей (см. таблицу № 1).

Таблица 1. – Повышение квалификации в ВИТИ НИЯУ МИФИ

	2011 год	2012 год	2013 год	2014 год	2015 год
Учебные программы	3	4	7	8	8
Учебные потоки	3	8	13	14	13
Слушатели	62	168	175	212	197

Основные результаты совместной работы по организации и проведению курсов повышения квалификации по программам дополнительного профессионального образования изложены в материалах [1-5].

Градостроительный кодекс РФ определяет (ст. 55.5) необходимость получения не реже чем один раз в пять лет дополнительного профессионального образования работниками организации, заявленными для получения свидетельства о допуске к строительно-монтажным работам. Требования СРОАО к квалификации персонала организаций, являющихся членами некоммерческого партнерства, более высокие – повышению квалификации не реже 1 раза в 5 лет подлежат руководители организаций, руководители структурных подразделений и специалисты организации, занятые в области строительной деятельности и находящиеся в штате по основному месту работы.

Таким образом, вскоре руководители и специалисты, повысившие квалификацию в 2011 году, будут повторно направляться на курсы. Необходимо провести качественное переформатирование существующего программного комплекса для обеспечения потребности организаций в повышении квалификации своих специалистов по актуализированным программам. Все учебные заведения, проводящие курсы в рамках образовательного проекта СРОАО, разрабатывают по программам дополнительного профессионального образования комплексы учебно-методической документации (учебно-тематический план, программа курса, раздел программы для самостоятельной работы слушателей на этапе заочного обучения, список интерактивной литературы и т.д.). Разработанные учебно-методические комплексы (УМК) размещаются в единой информационной системе СРОАО. Слушатели курсов через личный кабинет организации на портале atomsro.ru получают доступ к УМК. Для повторного прохождения руководителями и специалистами курсов повышения квалификации необходима глубокая актуализация учебно-методической документации, позволяющая изменить тематику образовательной программы, ранее изученной слушателями. Кроме того, необходимо предусмотреть вариативность специализированной части ряда программ, в которые включаются тематические модули, обладающие научно-производственной новизной и позволяющие обеспечить новый уровень знаний для слушателей курсов.

Профессорско-преподавательским составом ВИТИ НИЯУ МИФИ накоплен многолетний научно-исследовательский и производственный опыт возведения строительных конструкций на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) и их мониторинга по направлениям:

- возведение и приемо-сдаточные испытания защитных герметичных оболочек объектов использования атомной энергии;
- организация и выполнение мониторинга за техническим состоянием защитных герметичных оболочек объектов использования атомной энергии;
- монтаж кранов кругового действия устанавливаемых в реакторных отделениях на объектах использования атомной энергии;
- мониторинг технического состояния подъемных сооружений на объектах использования атомной энергии.

Накопленный практический опыт и новизну материалов на уровне изобретений, на которые получены патенты РФ, целесообразно отразить при проведении курсов в

ВИТИ НИЯУ МИФИ в вариативной части реализуемых программ.

Например, для программы С-2 «Устройство бетонных и железобетонных монолитных конструкций при сооружении ОИАЭ» представляется целесообразным ввести вариативный модуль «Возведение и приемо-сдаточные испытания защитных герметичных оболочек (ЗГО) объектов использования атомной энергии». В модуле раскрываются темы: преднапряжение и испытание ЗГО; программа испытаний на герметичность и прочность; контрольно-измерительные технологии для оценки технического состояния ЗГО в период преднапряжения и приемо-сдаточных испытаний.

Для программы С-6 «Монтаж оборудования объектов использования атомной энергии» предлагается вариативный модуль «Монтаж подъемных сооружений на ОИАЭ». Тематика вариативной части модуля: особенности монтажа кранов прямолинейного действия и кранов радиального действия; монтаж кранов радиального действия; входной контроль секций рельсового пути, моста и ходовой части крана; монтаж полярного крана; оценка влияния полярного крана на защитную герметичную оболочку; наладка полярного крана, оценка параметров скольжения ходовой части крана, оценка его курсовой устойчивости.

Для программы С-1 «Геодезические работы, выполняемые на строительных площадках в процессе сооружения ОИАЭ» предлагается вариативный модуль «Разработка проектов производства геодезических работ на ОИАЭ». Для программы С-4 «Устройство наружных и внутренних инженерных систем на ОИАЭ» – модуль «Мониторинг технического состояния трубопроводов и запорной арматуры».

При необходимости повышения квалификации по программам, разработанным по новым видам работ, на которые выдаются СРОАО свидетельства о допуске организаций к строительно-монтажным работам, вариативная часть курсов может меняться что, несомненно, повысит эффективность повышения квалификации. Таким образом, программы повышения квалификации СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ» будут постоянно актуализироваться, и после их утверждения, включаться в программный комплекс СРОАО.

В рамках дальнейшего совершенствования курсов повышения квалификации, проводимых в ВИТИ для СРОАО, предполагается реализовать выездные курсы повышения квалификации силами научно-педагогического персонала института на площадках строящихся ОИАЭ. Разрабатывается модель проведения выездных курсов, включающая в себя проведение очных занятий в специально подготовленном помещении принимающей строительной организации и занятий в форме вебинара, проводимого под контролем представителя ВИТИ, находящегося на площадке проведения курсов. Такая форма проведения курса позволит контролировать организацию занятий, осуществлять входной контроль знаний по результатам изучения слушателям материалов заочной части курса, проводить очные и практические занятия по тематике курса, итоговую аттестацию слушателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заяров, Ю.В. Опыт ВИТИ НИЯУ МИФИ в организации и проведении курсов повышения квалификации НП СРО «СОЮЗАТОМСТРОЙ» [Текст] / Ю.В. Заяров // Атомное строительство. – 2012. – №7(13). – Ноябрь-декабрь. – С. 35.
2. Пимшин, Ю.И. О повышении квалификации специалистов строительных организаций [Текст] Ю.И. Пимшин // Атомное строительство. – 2012. – №7(13). – Ноябрь-декабрь. – С. 36.
3. Опекунов, В.С. и др. Повышение квалификации специалистов, выполняющих строительно-монтажные и пусконаладочные работы на объектах использования атомной энергии [Текст] / В.С. Опекунов, А.В. Стамбулко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 2(7). – С. 78–82.
4. Опекунов, В.С. и др. Повышение квалификации специалистов строительных организаций-членов СРО НП «СОЮЗАТОМСТРОЙ» в ВИТИ НИЯУ МИФИ [Текст] / В.С. Опекунов, В.А. Руденко, Ю.В. Заяров, Ю.И. Пимшин, А.В. Стамбулко // Глобальная ядерная безопасность. –

2014. – № 2(11). – С. 44–48.

5. Опекунов, В.С. и др. Влияние уровня квалификации персонала строительно-монтажных организаций на безопасность сооружения ОИАЭ [Текст] / В.С. Опекунов, В.А. Денисов, В.С. Соколов, А.В. Стамбулко, Н.Н. Чупейкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4(17). – С. 97–102.

REFERENCES

- [1] Zayarov Yu.V. Opyt VITI NIYaU MIFI v organizatsii i provedenii kursov povysheniya kvalifikatsii NP SRO «SOYuZATOMSTROY» [VETI NRNU “MEPhI” experience in organizing and conducting training courses of NP SRO “SOYuZATOMSTROY”]. Atomnoe stroitelstvo [Nuclear Construction]. 2012, №7(13), Noyabr-dekabr [November-December], p. 35. (in Russian)
- [2] Pimshin Yu.I. O povyshenii kvalifikatsii spetsialistov stroitelnykh organizatsiy [Improving the skills of building organization specialists]. Atomnoe stroitelstvo [Nuclear construction]. 2012, №7(13), Noyabr-dekabr [November-December], p. 36. (in Russian)
- [3] Opekunov V.S., Stambulko A.V. Povysheenie kvalifikatsii spetsialistov, vypolnyayushih stroitelno-montazhnye i puskonladochnye raboty na obekтах ispolzovaniya atomnoy energii [Professional development of the experts carrying out construction and commissioning on objects of nuclear energy usage]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2013, №2(7), ISSN 2305-414X, pp. 78–82. (in Russian)
- [4] Opekunov V.S., Rudenko V.A., Zayarov Yu.V., Pimshin Yu.I., Stambulko A.V. Povysheenie kvalifikatsii spetsialistov stroitelnykh organizatsiy-chlenov SRO NP «SOYuZATOMSTROY» v VITI NIYaU MIFI [Professional development of specialists of the SRO NP “SOYuZATOMSTROY” construction member organizations in VETI NRNU “MEPhI”]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2014, №2(11), ISSN 2305-414X, pp. 44–48. (in Russian)
- [5] Opekunov V.S., Denisov V.A., Sokolov V.S., Stambulko A.V., Chupeykina N.N. Vliyanie urovnya kvalifikatsii personala stroitelno-montazhnykh organizatsiy na bezopasnost sooruzheniya OIAE [Influence of skill level of construction organizations personnel to safety nuclear facilities construction]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2015, №4(17), ISSN 2305-414X, pp. 97–102. (in Russian)

VETI NRNU “MEPhI” Training Programs for the Self-Regulatory Organization Noncommercial Partnership “SOYuZATOMSTROY” Increase Security Installation Level of Nuclear Facilities

V.S. Opekunov*, V.A. Rudenko, V.A. Denisov*, A.V. Stambulko*,
Yu.V. Zayarov**, Yu.I. Pimshin****

** Self-regulatory organization of the nuclear industry
29/1 Bolshaya Ordynka St., Moscow, Russia, 119017
e-mail: stambulko@atomsro.ru*

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

Abstract – The article presents the dynamics of the basic indicators and analysis of the training courses in VETI NRNU “MEPhI” for managers and specialists of the organizations that are members of SRO NP (self-regulatory organization noncommercial partnership) “SOYuZATOMSTROY” for 2010-2015. The measures that improve the training level by updating and variability of training programs, as well as to ensure the expansion of technology of VETI NRNU “MEPhI” educational activities for organizations-members of SRO NP “SOYuZATOMSTROY”. Appropriate divergent modules “Construction and Acceptance Testing of Protective Membranes of Nuclear Facilities”, “Installation of Lifting Equipment at Nuclear Facilities” and “Development of Land-Surveying Projects at Nuclear Facilities” are developed for programs “Creating of Concrete and Reinforced Concrete Monolithic Structures in Nuclear Facilities Construction”, “Installation of Nuclear Facility Equipment” and “Land-Surveying Work Performed at Construction Sites during the Nuclear Facility Construction”.

Keywords: SRO NP “SOYUZATOMSTROY”, nuclear power, programs and training courses, the variability of programs, managers and specialists of building organizations.

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

УДК 378.016:621.039

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ САРФТИ НИЯУ МИФИ С ПРЕДПРИЯТИЯМИ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ В ВОПРОСАХ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ
И ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ**

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

*Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ,
Саров, Нижегородская обл., Россия*

В статье рассмотрены подходы образовательных учреждений высшего профессионального образования к подготовке специалистов в контексте перехода российской экономики к инновационной модели развития. Определены ключевые факторы и векторы трансформации традиционной системы образования к адаптивной сквозной образовательной системе, учитывающей потребности реального сектора экономики, включая высокотехнологичные отрасли. Отражен передовой опыт взаимодействия высшего учебного заведения с ведущим отраслевым предприятием в формате новой образовательной парадигмы.

Ключевые слова: компетенции, интеграция, РФЯЦ-ВНИИЭФ, базовые кафедры, научно-образовательные центры, «Цифровое предприятие», учебно-исследовательский центр компетенций, «фабрики процессов».

Поступила в редакцию 15.03.2016 г.

В период мирового финансово-экономического кризиса, становится понятным, что экономический рост любой страны зависит не столько от благоприятного географического расположения и наличия природных ресурсов, сколько от концентрации и степени развития ее интеллектуального потенциала. Взятый Правительством РФ курс на модернизацию экономики и последовательный переход на инновационное развитие, необходимость решения проблем импортозамещения, объективно диктуются требованиями выживания России в современном мире. Одним из важнейших секторов инновационной экономики, является система высшего образования, проблемой которой является отрыв от реальных запросов и требований динамично меняющегося рынка. Вполне справедливо констатировать несоответствие выпускников высшей школы ожиданиям работодателей, отрыв теоретических знаний от реальной практики работы, недостаток знаний и практического опыта работы многих преподавателей в приоритетных направлениях науки, сферах высоких технологий, современном бизнесе и производстве.

От современного специалиста требуются знания не только в предметной и междисциплинарных областях, умение работать в команде, но и владение им приемами и методами работы на практике. В связи с этим сегодня основной акцент делается на формирование прикладного контента образовательного процесса и результативность научно-исследовательской деятельности. Система высшего образования должна перейти на такой уровень подготовки специалистов, когда в процессе обучения приобретается опыт участия в научных исследованиях, разработке и внедрении технологий, реальной практической деятельности по производству конкурентных

продуктов и услуг, востребованных рынком.

Такие факторы как резкое сокращение периода обновления информации, отсутствие тесных связей системы образования с наукой и производством, востребованность на рынке труда лишь определенного количества и качества специалистов, конкуренция со стороны зарубежных университетов на отечественном рынке образовательных услуг побуждают вузы к поиску новых принципов взаимодействия с внешней средой. Проблема качества подготовки специалистов к профессиональной деятельности не может быть решена только в рамках системы образования. Необходимо тесное сотрудничество вузов и организаций реального сектора экономики: науки, научно-производственных комплексов, технопарков, корпораций, коммерческих фирм и т.д. Это позволит наполнить вузовскую подготовку более конкретным практическим содержанием, выявить перспективные направления деятельности вуза, создать на предприятиях интеллектуальный капитал, способный разрабатывать, а затем и реализовывать стратегическое направление их развития [1].

Данная инновационная кооперация обеспечит подготовку специалистов, сочетающих глубокие теоретические знания с практическими компетенциями, способных генерировать новые знания и создавать конкурентоспособную продукцию, востребованную потребителями.

Новые формы сотрудничества предполагают перестройку всех составляющих системы образования: довузовского, среднего профессионального, высшего образования, а также послевузовского и дополнительного профессионального образования. Это диктуется необходимостью обеспечения потребностей экономики в специалистах различных направлений и уровней подготовки для высокотехнологичных областей [2].

По нашему мнению современная система сквозного профессионального образования должна:

- обеспечивать условия для «сквозного» непрерывного образования, способствующего формированию у обучаемых правильной образовательной траектории на различных уровнях образования и профессиональной деятельности;
- обеспечивать инновационные предприятия специалистами, обладающими набором необходимых профессиональных и бизнес-ориентированных компетенций, высоким уровнем мотивации к инновационной деятельности;
- обеспечивать широкие международные и межрегиональные коллаборативные научные, производственные, образовательные, социальные, культурные связи, способствующие формированию долгосрочных профессиональных и бизнес взаимодействий инновационных предприятий с внешними партнерами;
- представлять широкому кругу заинтересованных потребителей сетевой доступ к научно-образовательным и вычислительным ресурсам, банку образовательных программ различных уровней на основе современных образовательных и информационных технологий (SCORM, E-Learning, видеолекции, вебинары и др.);
- обеспечивать постоянное повышение квалификации и переподготовку работников предприятий с целью поддержания и развития их профессионального уровня соответствующего (опережающего) требованиям производства и бизнеса;
- способствовать продвижению результатов интеллектуальной деятельности и инновационных высокотехнологичных продуктов, создаваемых на предприятиях путем современных маркетинговых технологий (IMC, CRM, SFA и др.) [3].

Таким образом, взятый правительством курс на инновационное развитие экономики России диктует необходимость формирования сквозной адаптивной системы подготовки и переподготовки кадров, обеспечивающей долгосрочное и устойчивое воспроизводство востребованных высокотехнологичными отраслями

специалистов, обладающих необходимыми профессиональными компетенциями и практико-ориентированными навыками коммерциализации результатов научно-исследовательской деятельности. Это создаст необходимый устойчивый базис успешного выполнения отраслевых задач и развития высокотехнологического бизнеса на уровне мировых лидеров.

Для атомной отрасли России, представленной Госкорпорацией «Росатом» требуются специалисты, обладающие глубокими знаниями в области ядерной науки и технологий. В настоящее время корпорация объединяет организации, имеющие многопрофильный, наукоемкий и высокотехнологический характер. В организационную структуру Госкорпорации «Росатом» входит ядерный оружейный комплекс, ядерный энергетический комплекс, научно-технический комплекс, комплекс по обеспечению ядерной и радиационной безопасности и атомный ледокольно-технологический комплекс. Каждый дивизион представляет собой полноценную бизнес-единицу со своей собственной стратегией.

Главными потребителями кадров являются Федеральные ядерные центры, НИИ и предприятия Росатома. К сожалению, имеет место несоответствие системы кадрового обеспечения научно-производственных комплексов ЯОК, ЯЭК, ЯРБ, сектора науки задаче инновационных изменений, происходящих в атомной отрасли: не хватает кадров, способных работать с новыми технологиями, уходят из сферы трудовой деятельности носители «критических» знаний, слабое и неадресное ресурсное обеспечение, отсутствие адекватной инфраструктуры, консерватизм и устаревшие требования к содержанию образования, проблемы социализации молодежи (в современном сознании успешный молодой человек должен обладать высшим образованием, даже если он предполагает работать по иной профессии, не устанавливающей высокие требования к компетенциям работника). Задача подготовки кадров для атомной отрасли является приоритетной для Национального исследовательского ядерного университета МИФИ (НИЯУ МИФИ) и образовательных учреждений, входящих в его состав. Цель НИЯУ МИФИ и его филиалов - подготовка высококвалифицированных специалистов, отвечающих современным запросам атомной отрасли и других высокотехнологичных отраслей по профильным специальностям университета, обеспечение интеграции науки, образования и производства, проведение фундаментальных и прикладных исследований по приоритетным направлениям развития отраслевой науки, технологий и техники.

Саровский физико-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ (СарФТИ НИЯУ МИФИ) осуществляет подготовку специалистов для одного из крупнейших научно-исследовательских центров не только в России, но и в мире – Российского Федерального Ядерного центра – Всесоюзного научно-исследовательского института экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»).

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» имеет в своем составе мощнейшую научную, производственную и экспериментальную базу, а в организационной структуре – институты, конструкторские бюро, тематические научные и производственные центры, заводы, развитую социальную сферу. РФЯЦ-ВНИИЭФ выполняет задачи в области государственного оборонного заказа, проводит исследования и реализует их результаты в области:

- новой и традиционной энергетики (источники энергии на новых принципах, водородная энергетика);
- использования биотоплива (изделия и технологии для нефтегазовой промышленности);
- лазерных технологий (исследования и моделирование в атомной энергетике, энергоэффективные технологии);

- информационных технологий (компактные супер-ЭВМ, численное моделирование сложных физических процессов, суперкомпьютерные технологии для внедрения в высокотехнологичные отрасли промышленности, 3D инженерный анализ);
- научного и промышленного производства (информационно-управляющие системы, метрологическое и калибровочное оборудование, физическая защита ядерных материалов, экологическая и промышленная безопасность, безопасность при транспортировке, медицинское приборостроение).

Глубокая интеграция, которая сложилась к настоящему времени между СарФТИ НИЯУ МИФИ и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» позволяет выделить следующие варианты решения проблемы должного обеспечения отрасли профессиональными кадрами:

- подготовка востребованных специалистов силами коллективов созданных базовых кафедр, а так же научно-образовательных центров (НОЦ), которые усиливают практическую направленность их подготовки;
- дополнительная профессиональная подготовка уже работающих специалистов, которая позволяет поддерживать желаемый работодателем уровень квалификации сотрудников;
- прием на работу студентов, который позволяет подготовить специалиста, не переучивая, с заданным набором профессиональных компетенций.

Модернизация образовательного процесса на инновационной основе – процесс комплексный, непростой и часто суть его в многочисленных публикациях скрывается за общими рассуждениями, абстрактными определениями.

Главным звеном в этой большой и сложной работе является изменение подходов к организации образовательного процесса, смена существующей парадигмы подготовки специалистов: подготовка должна осуществляться не в целях удовлетворения плана выпуска специалистов, а адресно, под заказы конкретных предприятий и организаций с учетом актуализированных профессиональных компетенций. Только такой подход позволит органично преодолеть барьеры и трудности, возникающие у молодого специалиста при его адаптации на рабочем месте, а предприятию максимально снизить издержки полноценной интеграции молодого специалиста в профессиональный коллектив.

Традиционный учебный процесс, построенный по лекционно-семинарскому принципу, формализованный по времени и месту, сегодня перестает отвечать образовательным требованиям. Все большее значение в высокотехнологичных отраслях начинает приобретать проактивный (опережающий) тип развития. Только такой подход к бизнес-стратегии позволяет компаниям быть конкурентоспособными и эффективно развивать свой бизнес.

При средней продолжительности жизненного цикла высокотехнологичного бизнеса в 5-7 лет, традиционное образование, ориентированное на опыт прошлых достижений, на устаревшие методы и инструментарий, перестает отвечать сегодняшним требованиям к подготовке специалистов. Высшим учебным заведениям необходимо совместно с предприятиями – потенциальными заказчиками, системно совершенствовать как содержание образовательного цикла, так и порядок взаимодействия учебно-научного комплекса с бизнес-структурами, предприятиями реального сектора экономики в процессе формирования и развития проактивной образовательной среды в полной мере отвечающей задачам инновационной экономики.

В ряде случаев научное содержание учебных дисциплин излишне затеоретизировано и с практикой имеет мало общего. Традиционные методы совершенствования содержания на основе качественных и временных подходов при линейном представлении информации становятся не только высокзатратными, но и труднореализуемыми. При изменении подходов к организации образовательного

процесса необходимо перейти к представлению предметной среды, т.е. изучаемого явления, как открытой, нелинейной и развивающейся системы, имеющей жестко структурированный блок фундаментальной составляющей и вариативную компоненту ситуативного характера, отвечающего запросам практики, формируемую совместно профессорско-преподавательским составом вуза и профессиональными сообществами.

Большое значение для совершенствования образования имеет работа базовых кафедр – интегрированных учебно-научных структурных подразделений СарФТИ и РФЯЦ-ВНИИЭФ. В настоящее время созданы и функционируют кафедры: технологии специального приборостроения, динамики и прочности машин, приборостроения, теоретической физики, прикладной математики и информатики, радиофизики и электроники, квантовой электроники, ядерной и радиационной физики, экспериментальной физики), которые возглавляют ведущие ученые ВНИИЭФ [4]. Работодатель рассматривает базовую кафедру как собственное подразделение, служащее решению его насущных задач. Через собственные стандарты профессиональной деятельности и образовательные программы, наработку целого комплекса профессиональных дисциплин, авторские курсы, основанные на результатах НИОКР института, стимулирование активных форм обучения с привлечением к преподаванию высококвалифицированных специалистов-практиков, предоставление баз практики, в том числе для проведения научно-исследовательской, работодатели имеют возможность ставить и реализовывать конкретные цели и задачи, исходящие из профессиональной сферы деятельности.

Примером успешной инновационной кооперации СарФТИ НИЯУ МИФИ и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» также является реализация концепции «Цифровое предприятие».

В соответствии со стратегией развития Госкорпорации «Росатом» и атомной отрасли в целом отраслевые предприятия начали процессы активного внедрения инновационных информационных технологий комплексной автоматизации управленческой и производственной деятельности на основе современных методологий эффективного процессного управления, инжиниринга и реинжиниринга бизнес-процессов (концепция проекта «Цифровое предприятие»). Начавшийся переход к концепции сквозного управления бизнес-процессами отраслевых предприятий на основе современных информационных технологий позволяет говорить о новом качестве производственно-управленческой деятельности: об обеспечении повышения её эффективности и расширении конкурентных преимуществ отраслевых предприятий – с одной стороны, и существенном снижении производственных издержек – с другой.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в настоящее время является основной площадкой, где формируется прикладное воплощение концепции проекта «*Цифровое предприятие*». В течение нескольких последних лет в ядерном центре успешно реализуется пилотный проект по созданию, внедрению, тиражированию и сопровождению «Типовой Информационной Системы отраслевых предприятий ЯОК (ТИС ЯОК)», проходит сложная и многоступенчатая аттестация ИТ-продуктов. В настоящее время ряд функциональных модулей информационной системы фактически внедрен на разных уровнях в производственную и управленческую деятельность РФЯЦ-ВНИИЭФ, с последующим тиражированием апробированных решений на других предприятиях Росатома.

Переход на новую концептуально-технологическую платформу управленческо-производственной деятельности на основе ИТ-технологий требует приобретения новых знаний и освоения новых профессиональных компетенций как от действующих работников предприятия, так и от вновь поступающих на работу молодых специалистов. При этом принцип формирования навыков необходимых сегодня

профессиональных ИТ-компетенций у будущих молодых специалистов еще на стадии обучения в вузе может позволить существенно ускорить период профессиональной адаптации на рабочем месте и повысить уровень уверенности в своей профессиональной пригодности в стремительно растущих конкурентных условиях.

Задачи и проблемы, которые сегодня решаются в сфере информационных технологий, включая важнейшие на данный момент вопросы информационной безопасности и импортозамещения системного и прикладного программного обеспечения, требуют своего дальнейшего развития. При освоении новых форм работы на платформе ИТ-технологий возрастает острая потребность в молодых специалистах информационного профиля, способных успешно выполнять поставленные задачи и профессионально соответствовать уровню возрастающей актуализации этих задач, что в конечном итоге приведет к созданию мощного кадрового резерва для конкурентоспособности, стабильности, безопасности и развития предприятий ядерного центра.

Таким образом, комплексные компетенции в условиях функционирования «Цифрового предприятия» (ТИС ЯОК) являются вызовом сегодняшнего дня.

Для приобретения и освоения специалистом комплексных компетенций в условиях функционирования ТИС ЯОК необходимо решить следующие задачи:

- активизировать процесс *интеграции ключевых элементов* «Цифрового предприятия» в образовательный процесс;
- формировать компетенции специалиста по приоритетным направлениям деятельности в контексте ключевых элементов цифрового предприятия;
- ввести комплексную аттестацию компетенций специалиста в условиях функционирования цифрового предприятия.

Владение необходимыми компетенциями и уровень компетентности специалиста при трудоустройстве в РФЯЦ-ВНИИЭФ в условиях функционирования «Цифрового предприятия» будет являться его конкурентным преимуществом в условиях конкурсного отбора кандидатов на место.

Для реализации поставленных задач в СарФТИ НИЯУ МИФИ был создан Учебно-исследовательский центр компетенций в области информационных технологий ЯОК (УИЦК ИТ ЯОК), где при участии базовых кафедр и лабораторий СарФТИ НИЯУ МИФИ будет осуществляться обучение будущих молодых специалистов, повышение квалификации и переподготовка действующих специалистов подразделений РФЯЦ-ВНИИЭФ по следующим востребованным направлениям:

- пользователь информационных систем, входящих в пул ТИС ЯОК;
- разработчик (системный администратор, технический программист) модулей ТИС ЯОК;
- разработчик решений для программных продуктов, связанных с решением задач импортозамещения (операционные системы, базы данных и т.п.);
- пользователь продукции ПО АСКОН (технологии сквозного проектирования изделий ЯОК).

Кроме того, на базе УИЦК ИТ ЯОК будут проводиться совместные научно-прикладные исследования в области информационных технологий при участии как студентов, так и сотрудников СарФТИ НИЯУ МИФИ.

Возможности СарФТИ НИЯУ МИФИ позволяют оперативно организовать обучение новым информационным технологиям ЯОК студентов старших курсов по всем востребованным в РФЯЦ-ВНИИЭФ специальностям, а также ежегодно осуществлять повышение квалификации и переподготовку действующих сотрудников РФЯЦ-ВНИИЭФ в требуемом объеме.

В составе УИЦК ИТ ЯОК предлагается создать специализированные учебно-

научные лаборатории – полигоны «фабрики процессов» ИТ ЯОК. Их предназначение - проектное практико-ориентированное обучение слушателей на основе инновационных технологий обучения. Инновационные технологии обучения предполагают активное использование командных методик решения конкретных производственных задач посредством дискуссий, «мозговых штурмов», консультирования с экспертами, в том числе в режиме «он-лайн». Для этого инфраструктура полигонов «фабрики процессов» ИТ ЯОК должна быть оснащена специализированными программно-аппаратными средствами, серверным оборудованием, сетевыми решениями, функциональными тренажерами, информационными материалами.

Возможности полигонов «фабрики процессов» ИТ ЯОК в составе УИЦК ИТ ЯОК СарФТИ НИЯУ МИФИ позволят использовать их в качестве открытых площадок для организации занятий и курсов по повышению квалификации и переподготовке специалистов не только для РФЯЦ-ВНИИЭФ, но и для других отраслевых предприятий, заинтересованных в приобретении и внедрении в производственную деятельность модулей ТИС ЯОК. Также на базе полигонов будет возможным проведение для ИТ-специалистов тематических семинаров, конференций, круглых столов.

В дальнейшем полигоны «фабрики процессов» ИТ ЯОК в составе УИЦК ИТ ЯОК СарФТИ НИЯУ МИФИ могут и должны стать площадками для формирования базовых ценностей корпоративной среды отраслевых предприятий.

Базовым критерием эффективной деятельности вуза становится включенность профессорско-преподавательского состава в научные исследования и практическую деятельность по коммерциализации ее результатов. Однако научная деятельность в большей степени имеет формальный характер без ощутимой пользы обществу. Это связано, в том числе и с тем, что преподаватели не работают в реальном профессиональном пространстве. Преодоление опосредованного представления о деятельности предприятий отрасли, базового предприятия мы видим в необходимости повышения квалификации научно-педагогических работников (НПР), разработке программ повышения квалификации (ПК) для отраслевых предприятий, организации стажировки НПР в ведущих научно-производственных предприятиях и высокотехнологичных компаниях.

Благодаря реализации проекта по внутреннему повышению квалификации НПР НИЯУ МИФИ свою квалификацию повысили все штатные преподаватели СарФТИ НИЯУ МИФИ, включая внешних совместителей и почасовиков. Большинство из них смогли повысить квалификацию по нескольким востребованным программам ПК [5].

В рамках данного проекта активно развивается сетевое взаимодействие подразделений дополнительного профессионального образования НИЯУ МИФИ. Преподаватели и работники СарФТИ НИЯУ МИФИ неоднократно проходили повышение квалификации на курсах, организуемых ФПКПК НИЯУ МИФИ на основе современных дистанционных (сетевых) форм организации учебного процесса.

В 2015 году в целях приведения в соответствие профиля образования НПР преподаваемым дисциплинам при активном содействии ФПКПК НИЯУ МИФИ была проведена масштабная переподготовка преподавателей СарФТИ НИЯУ МИФИ по 12 направлениям переподготовки (2 направления были реализованы в рамках сетевого взаимодействия с другими подразделениями дополнительного профессионального образования НИЯУ МИФИ). Это дало возможность успешно пройти процедуру аккредитации университета и существенно повысить профессиональный уровень преподавателей.

Реализация в рамках ПСР НИЯУ МИФИ проекта по разработке программ повышения квалификации для работников атомной отрасли является весьма значимым

мероприятием, поскольку дает возможность не только разрабатывать востребованные, актуализированные программы ПК для работников отраслевых предприятий, но и делать это на системном, качественном уровне. Включение в состав разрабатываемых программ всех необходимых учебно-методических и мультимедийных материалов, элементов деловых игр и информации о последних достижениях науки и техники, специфики отрасли, дает дополнительные стимулы для мотивации специалистов отраслевых предприятий к обучению, что способствует укреплению сотрудничества с предприятиями ГК «Росатом» и планированию новых направлений. Кроме того, высокий уровень разрабатываемых программ ПК положительно отражается на имидже НИЯУ МИФИ в целом.

Значимым для магистров, аспирантов и научно-педагогических работников СарФТИ НИЯУ МИФИ направлением, реализуемым благодаря Программе Стратегического Развития (ПСР) НИЯУ МИФИ, является организация и проведение стажировок на базе ведущих отраслевых предприятий и высокотехнологичных инжиниринговых компаний. Возможность проведения подобных мероприятий, способствует расширению кругозора преподавателей, интенсивному обмену опытом и формированию новых научно-профессиональных связей со специалистами отраслевых предприятий, что дает возможность вовлечения научно-педагогических работников СарФТИ НИЯУ МИФИ в научно-технические проекты РФЯЦ-ВНИИЭФ и других предприятий отрасли.

В рамках НИЯУ МИФИ и его структурных подразделений активно развиваются сетевые формы обучения, создаются условия для мобильности преподавателей и студентов. Так в 2015 году магистры СарФТИ прошли практику по направлениям прикладная математика и физика, прикладная механика на базе НИЯУ МИФИ, учебную практику по принципам работы аппаратных средств провайдера и пользователя на базе Нижегородского государственного инженерно-экономического университета (ГБОУ ВО НГИЭУ). Также успешно прошла стажировка бакалавров по программе «Комплексная автоматизация основных процессов жизненного цикла изделий» на базе Трехгорного технологического института – филиала НИЯУ МИФИ.

Таким образом, можно констатировать, что взаимное сотрудничество СарФТИ с РФЯЦ-ВНИИЭФ реализуется успешно. Но развитие этого сотрудничества требует формирования системы устойчивых связей, которые должны обеспечить выпуск профессионально ориентированных специалистов. Для этого необходимо сосредоточить совместные усилия на:

- обучении направлениям, востребованным предприятиями отрасли, формировании соответствующего набора компетенций выпускников;
- разработке проблемно-ориентированных образовательных программ, интеграции их в деятельность предприятий отрасли;
- формировании системы по разработке программы «опережающей» подготовки специалистов для наукоемких, высокотехнологичных сфер деятельности и производств;
- развитии сетевых и виртуальных форм обучения;
- дополнении и развитии компетенций сотрудников предприятий отрасли вовлеченных в учебно-научно-производственную интеграцию;
- создании условий для самообучения и саморазвития профессорско-преподавательского состава вуза;
- осуществлении научно-исследовательского сотрудничества между вузом и предприятиями;
- развитии и совершенствовании системы научно образовательных центров (НОЦ) для реализации принципа глубокой интеграции образования, науки и бизнеса.

Развитие на базе НОЦ исследовательской магистратуры. Перераспределение студенческой учебной и производственной практик в пользу научно-исследовательской деятельности;

- создании в СарФТИ НИЯУ МИФИ ряда научных центров, обеспеченных новейшим оборудованием, укомплектованных штатными сотрудниками, способными проводить опережающими темпами по сравнению с предприятиями теоретические и экспериментальные исследования. Для руководства центрами целесообразно приглашать молодых и уже известных в своих областях ученых. В центрах также необходимо создать условия для подготовки специалистов высшей квалификации с последующим внедрением выполненных ими разработок на предприятиях;

- участии в российских и зарубежных грантовых проектах, федеральных и областных целевых программах, конкурсах и проектах министерств и ведомств Российской Федерации с привлечением к ним предприятий и отдельных коллективов и специалистов;

- создании студенческих конструкторских бюро и инновационно-технологических групп как центров инкубирования предприятий малого бизнеса, маркетингового продвижения и тиражирования знаний, результатов НИОКР и сложных технологических продуктов вузовской науки.

Таким образом, формирование образовательной среды в полной мере отвечающей задачам инновационной экономики является приоритетной задачей. Высшие учебные заведения и предприятия реального сектора экономики активно включились в этот процесс, имеют стратегическое видение и определенный опыт в реализации инновационных образовательных программ. Совершенствование этого опыта, его тиражирование – одно из базовых условий перехода на новую образовательную парадигму профессионального образования. От того, как успешно будет осуществляться этот переход, будет зависеть способность реального сектора экономики соответствовать мировой конъюнктуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А.А. и др. Концепция взаимодействия МГТУ им. Н.Э. Баумана с предприятиями ракетно-космической отрасли в вопросах целевой подготовки инженеров и научных кадров [Текст] / А.А. Александров, А.В. Пролетарский, К.А. Неусыпин // European social science journal = Европейский журнал социальных наук. – 2013. – №1. – С. 121–126.
2. Беляева, Г.Д. и др. Конкурентоспособность и динамические способности российских национальных исследовательских университетов [Текст] / Г.Д. Беляева, Г.А. Федоренко, А.Б. Макарец, А.Г. Сироткина // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №4(17). – С. 115–129.
3. Беляева, Г.Д. и др. Организационные изменения в высших учебных заведениях в условиях инновационного развития [Электронный ресурс] / Г.Д. Беляева, Г.А. Федоренко // Управление экономическими системами : электронный научный журнал. – 2012. – №11. – Режим доступа: URL: <http://www.uecs.ru/component/flexicontent/items/item/1635-2012-11-07-06-04-50> – 15.03.2016.
4. Саровский физико-технический институт. Интеграция науки и образования [Текст] / А.Г. Сироткина и др. – Саров: ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012.
5. Федоренко, Г.А. и др. Перспективы развития системы повышения квалификации специалистов предприятий ЯОК на базе СарФТИ НИЯУ МИФИ [Текст] / Г.А. Федоренко, А.Б. Макарец, И.А. Никитин, Е.Е. Ломтева, Е.Г. Юткина // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – №1(14). – С.70–76.

REFERENCES

- [1] Aleksandrov A.A., Proletarskiy A.V., Neusypin K.A. Kontseptsiya vzaimodeystviya MGTU im. N.E. Baumana s predpriyatiyami raketno-kosmicheskoy otrasli v voprosakh tselevoy podgotovki inzhenerov i nauchnykh kadrov [The concept of interaction of

- Bauman MSTU and the enterprises of space-rocket branch in questions of target training of engineers and scientific frames]. *Evropeyskiy zhurnal sotsialnykh nauk* [European social science journal]. 2013, №1. ISSN 2079-5513, pp. 121–126. (in Russian)
- [2] Belyaeva G.D., Fedorenko G.A., Makarets A.B., Sirotkina A.G. Konkurentosposobnost i dinamicheskie sposobnosti rossiyskikh natsionalnykh issledovatel'skikh universitetov. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Competitiveness and dynamic abilities of the Russian national research universities]. 2015, №4(17), ISSN 2305-414X, pp.115–129. (in Russian)
- [3] Belyaeva G.D., Fedorenko G.A. Organizatsionnye izmeneniya v vysshikh uchebnykh zavedeniyakh v usloviyakh innovatsionnogo razvitiya [Organizational changes in higher educational institutions in the conditions of innovative development]. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami* [Control of economic systems]. 2012, №11, ISSN 1999-4516. Available at: <http://www.uecs.ru/component/flexicontent/items/item/1635-2012-11-07-06-04-50> (in Russian)
- [4] Sirotkina A.G. etc. Sarovskiy fiziko-tehnicheskiiy institut [Sarov State Physics and Technical Institute] Integratsiya nauki i obrazovaniya [Integration of science and education]. – Sarov. Pub. IPK FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Institute of professional development. RFNC-VNIIEF], 2012. (in Russian)
- [5] Fedorenko G.A., Makarets A.B., Nikitin I.A., Lomteva E.E., Yutkina E.G. Perspektivy razvitiya sistemy povysheniya kvalifikatsii spetsialistov predpriyatiy YaOK na baze SarFTI NIYaU MIFI [Perspectives of development of system of professional development of specialists of the enterprises of the Nuclear Complex on the basis of SarPhTI MEFhI]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2015, №1(14), ISSN 2305-414X, pp. 70–76. (in Russian)

Interaction of Sarov State Physics and Technical Institute the branch of NRNU “MEPhI” and the Nuclear Industry in the Scientific and Engineering Personnel Preparation

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

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

Abstract – In article approaches of higher education institutions to training of specialists in the context of transition of the Russian economy to innovative model of development are considered. Key factors and vectors of traditional education system transformation to the adaptive open educational system considering needs of economy real sector including high-tech industries are defined. The best practices of interaction of a higher educational institution and the leading enterprise are reflected in a format of a new educational paradigm.

Keywords: competences, integration, Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics, basic departments, scientific and educational centers, "The digital enterprise", educational and research center of competences, "factories of processes".

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

УДК 316:378

**КУЛЬТУРА БЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМЕ ЦЕННОСТЕЙ
ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»**

© 2016 В.А. Руденко, Н.П. Василенко

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

В Госкорпорации «Росатом» определены корпоративные ценности: «Безопасность», «Единая команда», «Ответственность за результат», «Эффективность», «Уважение» и «На шаг впереди», но какова роль Культуры безопасности в системе данных ценностей? Рассмотрению данного вопроса и посвящена данная статья.

Цель статьи – определение места культуры безопасности в системе ценностей ГК «Росатом», для чего методами теоретического анализа были решены следующие задачи: рассмотрены документы МАГАТЭ, определяющие понятия культуры безопасности и проанализированы материалы исследований ученых по культуре безопасности в атомной отрасли.

На основании данного анализа можно сделать следующие выводы: культура безопасности занимает основополагающее место в системе ценностей ГК «Росатом», и если определяется дерево ценностей ГК «Росатом», то Культура безопасности – его основа – «корни».

Ключевые слова: культура безопасности, ценности, ценности Госкорпорации «Росатом», атомная отрасль.

Поступила в редакцию 18.03.2016 г.

Рассматривая роль и место культуры безопасности в системе ценностей ГК «Росатом», необходимо отметить те подходы к понятию ценностей, которые характеризуют профессиональную сферу, выделяя их из множества определений понятия «ценность», как имеющих общий, очень широкий смысл, так и сводящих это понятие до одного из явлений мотивационного процесса.

Роль ценностных ориентаций состоит в том, что они сообщают направленность профессиональной деятельности, придают ей ценности, содержащие смысл, позволяют занять определенную позицию, регулируют поведение, формируют способы самоактуализации.

Рассматривая профессиональные ценности на уровне организации, следует выделить следующие подходы к определению ценностей:

- ценность – важность, значимость, польза, полезность чего-либо;
- ценности рассматриваются как стандарты и принципы, которые принимают для себя люди определенной группы;
- ценности управляют отношениями, возникающими в поведении людей;
- система ценностей играет роль повседневных ориентиров в профессиональной и социальной действительности человека, обозначений его различных практических отношений к окружающим предметам и явлениям;
- ценностная ориентация определяется, как избирательное отношение человека к материальным и духовным ценностям, система его установок, убеждений,

предпочтений, выраженная в поведении;

- в ценностях могут быть выражены организационные установки, как нужно обращаться с людьми, и как сами люди хотят, чтобы с ними обращались;
- ценности должны быть доведены до персонала и известны на всех уровнях организации, как стандартные, обязательные;
- в организациях ценности принимаются всеми безоговорочно [10].

Примером принимаемых корпоративных ценностей и служат ценности ГК «Росатом», которые представил глава Госкорпорации «Росатом» С. Кириенко на Молодежном форуме «Форсаж–2014» отметив, что ценности – крайне важная вещь для любой компании, особенно, работающей в инновационной сфере [10].

Каждая из шести ценностей Госкорпорации «Росатом» («Безопасность», «Единая команда», «Ответственность за результат», «Эффективность», «Уважение» и «На шаг впереди») отражает стандарты поведения работников Госкорпорации, так как именно посредством ценностных ориентаций формируются стандарты, определяется иерархия жизненно-значимых целей и выбор методов их достижения для организации, обеспечивая преимущество определенного типа поведения и деятельности ее работников.

При этом, как отмечает А.В. Каслина, представляя ценности Госкорпорации «Росатом», для их определения в основу взяты следующие понятия:

- ценности человека – готовность действовать и воспринимать информацию определенным образом, наличие определенных стереотипов мышления;
- ценности проявляются в поведении, когда готовность реализуется в конкретных действиях;
- ценности формируют корпоративную культуру, показывают, как принято и как не принято действовать в компании;
- ценности позволяют принимать решения в ситуации, когда нет инструкций [3].

Но какое место в данной системе ценностей занимает культура безопасности?

В целом, культура безопасности рассматривается, через сформированные в организации нормы поведения, ценности и представления, осуществляет регулирующую функцию в обеспечении требований безопасности при выполнении процессов, связанных с рисками: определение целей и приоритетов, распределение ресурсов, выбор и контроль решений, действий, достигнутых результатов [8].

В.А. Машин, рассматривая систему управления безопасностью, как инструмент формирования и развития культуры безопасности, отмечает, что «вопросы формирования культуры безопасности должны решаться, через развитие и совершенствование таких процессов, видов деятельности, принципов и методов, с помощью которых организация может оптимально управлять рисками, формировать правильное понимание целей и приоритетов в области безопасности, поощряя нужные нормы поведения и создавая условия для формирования ценностей и представлений, отвечающих требованиям безопасности» [5].

Кроме того, автор в своей работе «Формирование и развитие культуры безопасности: ТМП подход» отмечает, что формирование и развитие культуры безопасности непосредственно базируется на требованиях, методах и принципах, которые должны быть определены в рамках основных процессов обеспечения безопасности [6].

Н.В. Абрамова считает, что понятие культуры безопасности содержит в себе идею о самосознании, о принятии общечеловеческих ценностей каждым индивидом, при этом, согласно ценностям культуры безопасности, первостепенное значение в целях организаций, использующих атомную энергию, имеет цель обеспечения и повышения безопасности [1, С. 36].

Рассматривая вопросы организационной культуры, при этом выделяя культуру безопасности, как ее аспект, где безопасность – критический фактор в нормах, значениях и отношениях каждого служащего организации, автор отмечает, что организационная культура, как организационный фактор, имеет смысл общепринятых ценностей, норм, значений, отношений и восприятий членов организации [1, С. 47].

Кроме того, Н.В.Абрамова, на основе постулатов, представленных в докладе МАГАТЭ INSAG-15, отмечает, что по мере того, как будет совершенствоваться умение анализировать культуру безопасности, появится возможность идентифицировать большее число глубинных ценностей [1, С. 106].

Современное дерево ценностей ГК «Росатом», является развитием корпоративного подхода в организации, представленного в Кодексе этики Госкорпорации «Росатом» через этические принципы Госкорпорации и обязательства по их исполнению. Важно отметить, что первым обязательством, которое берет на себя Госкорпорация – «сохранять и развивать культуру безопасности», в котором отмечается, что безопасность является внутренней потребностью и важнейшей составляющей деятельности Госкорпорации.

В качестве основных обязательств Госкорпорации в Кодексе представлены следующие: сохранять и развивать культуру безопасности; служить общественным интересам; быть честными и открытыми; своевременно предотвращать конфликты интересов и возникновение коррупции; быть эффективными; быть ответственными участниками трудовых отношений; быть хорошими партнерами; быть хорошими соседями. Данные этические принципы и обязательства Госкорпорации и являются основой современных корпоративных принципов: «Безопасность», «Единая команда», «Ответственность за результат», «Эффективность», «Уважение» и «На шаг впереди».

Райков С.В. рассматривая вопросы интеграции культуры безопасности в систему управления безопасностью Госкорпорации «Росатом», отмечает, что одним из наиболее приоритетных направлений деятельности Госкорпорации «Росатом» является повышение культуры безопасности в отрасли, как важнейшего инструмента обеспечения безопасности [7].

В документах МАГАТЭ по безопасности отмечается, что безопасность выступает как характеристика культуры безопасности, которая «есть ясно и всеми распознаваемая ценность» [2].

М. Халецкая представляет культуру безопасности, как ресурс обеспечения и повышения безопасности [10].

Все рассмотренные нами авторские работы по проблеме в своей основе содержат документы МАГАТЭ по вопросам безопасности, где выделяется главенствующая роль Культуры безопасности в обеспечении безопасности. Так в докладе INSAG-4 культура безопасности была определена как: «тот набор характеристик и подходов организаций и отдельных лиц, который устанавливает в качестве высшего приоритета то, что вопросам ядерной безопасности атомной электростанции уделяется внимание сообразно их значимости», что так же подтверждает основополагающее место культуры безопасности в системе принципов ГК «Росатом». Но в тоже время, в данном документе, в ссылке на публикации №11 серии «Отчеты по безопасности» МАГАТЭ, поясняется, что культура безопасности сама по себе является подмножеством культуры всей организации в целом, в то время как последняя содержит в себе сочетание общих ценностей, подходов и образцов поведения, придающих данной организации ее особый характер [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что все, сказанное выше, определяет основополагающую роль культуры безопасности в системе принципов Госкорпорации «Росатом».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамова, В.Н.* Организационная психология, организационная культура и культура безопасности в атомной энергетике. Часть I. Психология и методы оценки организационной культуры и культуры безопасности на атомных станциях [Текст] / В.Н. Абрамова. – М.; Обнинск, 2009. – 258 с.
2. *Игнатов, М.* Стандарты МАГАТЭ по безопасности – основа для оценки культуры безопасности (SCART) [Текст] / М. Игнатов // Доклад. Конференция «Человеческий фактор безопасности атомной энергетике и промышленности», 17–20 сентября 2007 г., г. Обнинск. – Обнинск, 2007.
3. *Каслина, А.В.* Ценности Госкорпорации «Росатом» [Текст] / А.В. Каслина // Материалы курсов повышения квалификации. Москва, 6 июля 2015 г. – М., 2015.
4. Ключевые вопросы практики повышения культуры безопасности. Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. 75-INSAG-15 [Текст]. – Вена, 2002. – 24 с.
5. *Машин, В.А.* Система управления безопасностью как инструмент формирования и развития КБ [Электронный ресурс] / В.А. Машин // МЛШ «Культура безопасности: Практические методы управления», Санкт-Петербург, 01–05 июля 2013 г. – СПб., 2013. – 64 с. – Режим доступа: URL: <http://mashinva.narod.ru/arch/PSY37.pdf> – 15.03.2016.
6. *Машин, В.А.* Формирование и развитие культуры безопасности: ТМП подход [Электронный ресурс] / В.А. Машин. – Обнинск, 2015. – Режим доступа: URL: <http://mashinva.narod.ru/arch/PSY65.pdf> – 15.03.2016.
7. *Райков, С.В.* Интеграция культуры безопасности в систему управления безопасностью Госкорпорации «Росатом» [Электронный ресурс] / С.В. Райков. 21.11.2013 г. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – Режим доступа: URL: <http://www.rosatom.ru/resources/e3f5ce804200d3b9946cd5b32a194887/rajkov.pdf> – 15.03.2016.
8. *Руденко, В.А. и др.* Ценностная составляющая культуры безопасности [Текст] / В.А. Руденко, Н.П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – №4(9). – С. 82–86.
9. Форсируя ценности. Выступление С. Кириенко на Молодежном форуме «Форсаж-2014» [Текст] // РЭА. – 2014. – Сентябрь. – С. 50–53.
10. *Халецкая, М.* Международный форум «АТОМЭКСПО – 2014» [Текст] / М. Халецкая. 09–11 июня 2014 г., г. Москва. – М., 2014.

REFERENCES

- [1] Abramova V.N. Organizatsionnaya psikhologiya, organizatsionnaya kultura i kultura bezopasnosti v atomnoy energetike [Organizational psychology, organizational culture and safety culture in nuclear power]. Chast I [Part 1]. Psikhologiya i metody otsenki organizatsionnoy kultury i kultury bezopasnosti na atomnykh stantsiyakh [Psychology and valuation methods of organizational culture and safety culture of on nuclear power plants]. M. Obninsk. 2009. 258 p. (in Russian)
- [2] Ignatov M. Standarty MAGATE po bezopasnosti – osnova dlya otsenki kultury bezopasnosti (SCART) [Standards of IAEA on safety is a basis for an assessment of safety culture (SCART)]. Doklad [Report]. Konferentsiya «Chelovecheskiy faktor bezopasnosti atomnoy energetiki i promyshlennosti», 17–20 sentyabrya 2007 g., g. Obninsk ["Human Factor of Safety of Nuclear Power and Industry" conference, on September 17-20, 2007, Obninsk]. Obninsk, 2007. (in Russian)
- [3] Kaslina A.V. Tsennosti Goskorporatsii «Rosatom». Materialy kursov povysheniya kvalifikatsii [Values of Rosatom State Corporation. Materials of advanced training courses]. Moskva, 6 iyulya 2015 g. [Moscow, July 6, 2015.]. M., 2015. (in Russian)
- [4] Klyuchevye voprosy praktiki povysheniya kultury bezopasnosti [Key questions of increase practice of safety culture]. Doklad Mezhdunarodnoy konsultativnoy gruppy po yadernoy bezopasnosti 75-INSAG-15 [The report of the International consultative group on nuclear safety 75-INSAG-15]. Vienn, 2002. ISBN 92–0–112202–0, 24 p. (in Russian)
- [5] Mashin V.A. Sistema upravleniya bezopasnostyu kak instrument formirovaniya i razvitiya KB [Management system safety as instrument of formation and development of safety culture]. MLSh «Kultura bezopasnosti: Prakticheskie metody upravleniya», Sankt-Peterburg, 01–05 iyulya 2013 g. [ISS "Safety Culture: Practical methods of management", St. Petersburg, on July 01-05, 2013] SPb. [St. Petersburg], 2013. 64 p. Available at: <http://mashinva.narod.ru/arch/PSY37.pdf> (in Russian)
- [6] Mashin V.A. Formirovanie i razvitie kultury bezopasnosti: TMP podkhod [Formation and development of safety culture: TMP approach]. Obninsk. 2015. Available at: <http://mashinva.narod.ru/arch/PSY65.pdf> (in Russian)
- [7] Raykov S.V. Integratsiya kultury bezopasnosti v sistemu upravleniya bezopasnostyu Goskorporatsii

- «Rosatom» [Integration of safety culture into management safety system of Rosatom State Corporation]. 21.11.2013 g. M. Pub. NIYaU MIFI [NRNU MEPhI], 2013. Available at: <http://www.rosatom.ru/resources/e3f5ce804200d3b9946cd5b32a194887/rajkov.pdf> (in Russian)
- [8] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Tsennostnaya sostavlyayushchaya kultury bezopasnosti [Valuable component of safety culture]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety]. 2013, №4(9), ISSN 2305-414X, pp. 82–86. (in Russian)
- [9] Forsiruya tsennosti. Vystuplenie S. Kirienko na Molodezhnom forumе «Forsazh-2014» [Forcing values. S. Kiriyenko's report at the Youth forum "Forcing-2014"]. RosEnergoAtom [Russian Energetic Agency]. 2014. Sentyabr [September]. pp. 50–53. (in Russian)
- [10] Khaletskaya M. Mezhdunarodnyy forum «ATOMEKSPO – 2014» [International forum "ATOMEKSPO — 2014"]. 09–11 iyunya 2014 g., g. Moskva [June 09-11, 2014]. M., 2014. (in Russian)

Safety Culture in Value System of «Rosatom» State Corporation

V.A. Rudenko*, N.P. Vasilenko**

*Volgodonsk Engineering Technical Institute
the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
73/94 Lenin St., Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360
* e-mail: VARudenko@mephi.ru ; ** e-mail: NPVasilenko@mephi.ru*

Abstract – BACKGROUND The «Rosatom» State Corporation defined corporate values such as «Security», «Unified Team», «Responsibility for the result», «Efficiency», «Respect» and «A step ahead». What role of Safety Culture in the system of these values? This article is devoted to reviewing of the matter.

OBJECTIVES We determined the place of Safety Culture in system of values of «Rosatom» State Corporation.

The following problems are solved:

- the IAEA documents defining concepts of Safety Culture are considered;
- scientific researches of Safety Culture in nuclear branch are analyzed.

METHODS of the theoretical analysis were used.

CONCLUSIONS:

- Safety Culture takes the fundamental place in system of values of «Rosatom» State Corporation;
- if the value system of «Rosatom» State Corporation is considered as a tree, the Safety Culture is its basis, i. e. the "roots".

Keywords: Safety Culture, values, values of «Rosatom» State Corporation, nuclear branch.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Беляева Г.Д.	108	Опекунов В.С.	104
Бугакова А.В.	76	Пимшин Ю.И.	104
Бутырлагин Н.В.	76	Пирожков Р.В.	46
Василенко Н.П.	118	Пономаренко П.А.	60
Гладков Э.А.	66	Постой Л.В.	19
Гоок С.Э.	34	Прокопенко Н.Н.	76
Гуменюк А.В.	34	Пугачева О.Ю.	95
Денисов В.А.	104	Ращепкина С.А.	51
Заяров Ю.В.	104	Ретмайер М.	34
Игнашин А.А.	76	Рогачев А.Ф.	7
Колоденкова А.Е.	26	Руденко В.А.	104, 118
Кравченко П.Д.	87	Сироткина А.Г.	108
Лапкис А.А.	95	Стамбулко А.В.	104
Ленивенко Н.Н.	60	Ткачев В.Г.	19
Литвинова Т.А.	46	Тупицын А.М.	66
Макарец А.Б.	108	Федоренко Г.А.	108
Маляренко А.Д.	87	Фролова М.А.	60
Мелихова Е.В.	7	Чернов А.В.	66
Мецлер А.А.	46	Эль-Батаги А.М.	34
Никифоров В.Н.	95		

AUTHOR INDEX OF VOL. 1, 2016

Belyaeva G.D.	108	Melikhova E.V.	7
Bugakova A.V.	76	Metsler A.A.	46
Butyrlagin N.V.	76	Nikiforov V.N.	95
Chernov A.V.	66	Opekunov V.S.	104
Denisov V.A.	104	Pimshin Yu.I.	104
El-Batahgy A.M.	34	Pirozhkov R.V.	46
Fedorenko G.A.	108	Ponomarenko P.A.	60
Frolova M.A.	60	Postoj L.V.	19
Gladkov E.A.	66	Prokopenko N.N.	76
Gook S.	34	Pugacheva O.Yu.	95
Gumenyuk A.	34	Rashchepkina S.A.	51
Ignashin A.A.	76	Rethmeier M.	34
Kolodenkova A.E.	26	Rogachev A.F.	7
Kravchenko P.D.	87	Rudenko V.A.	104, 118
Lapkis A.A.	95	Sirotkina A.G.	108
Lenivenko N.N.	60	Stambulko A.V.	104
Litvinova T.A.	46	Vasilenko S.V.	118
Makarets A.B.	108	Tkachev V.G.	19
Maliarenko A.D.	87	Tupitsyn A.M.	66
		Zajarov Yu.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 (it is no more than 20 sources) and drawings (no more than 7).

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.

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 konstruktsiy. [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 (не больше 20 источников) и рисунки (не более 7).

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

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

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

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

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

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

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

6) Литература приводится в порядке упоминания в конце статьи. В тексте должны быть ссылки в квадратных скобках только на опубликованные материалы. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала и сопровождаются, в

случае перевода на русский язык, с указанием на перевод.

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

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

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

7) Этика публикаций.

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

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

- а) значительном вкладе в концепцию и дизайн исследования или в анализ и интерпретации данных;
- б) подготовке текста статьи или внесении принципиальных изменений;
- в) окончательном утверждении версии, которая сдается в печать.

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

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

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

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

Авторы несут ответственность за содержание статьи и за сам факт ее публикации. Редакция журнала оставляет за собой право на сокращение и корректорскую верстку 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.

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

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

E-mail: oni-viti@mephi.ru

Тел.: 8(8639)222717.

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2016, 1(18)

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

Сдано в набор 22.03.2016 г.

Компьютерная верстка Вишнева М.М.

Корректор Вишнёва М.М. ИПО ВИТИ НИЯУ МИФИ

Подписано к печати 24.03.2016 г.

Бумага «SvetoCopy» 80 г/м². Объем 15,84 усл.печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ(ф) НИЯУ МИФИ