

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2019, 4(33)

Founded in November, 2011

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

Quarterly

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial Staff:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

A.A. Salnikov, PhD Technical sciences (*Russia*)

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

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

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address:

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia

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

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

Press address:

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

Moscow

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2019, 4(33)

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 (№ 759)

Группы научных специальностей:

05.14.00 – Энергетика;

05.26.00 – Безопасность деятельности человека;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление.

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

Главный редактор:

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

Редакционная коллегия:

М.Н. Стриханов, главный редактор, д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)

В.А. Руденко, заместитель главного редактора, д-р соц. наук, проф. (Россия)

Денис Флори, заместитель генерального директора МАГАТЭ (Австрия)

Лю Дамин, проф. Китайского института ядерной энергетики (Китай)

Нэнси Фрагояннис, старший советник Комиссии по ядерному регулированию США (США)

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

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

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

С.Э. Гоок, к-т техн. наук (Германия)

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

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

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

Ю.И. Пимшин, 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)

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

А.А. Сальников, к-т техн. наук (Россия)

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

В.П. Поваров, к-т физ.-мат. наук (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

2019, 4(33)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

The Application Urgency of Activity Indicators of Alkaline Phosphatase and Seston Esterases in Aquatic Ecosystem Monitoring

O.I. Beisug7

Unambiguity of Decisions When Using Linear Functional Equation in the Radiation Protection Model

V.P. Cherniavsky18

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

Liquation Heterogeneity and Weldability of 10GN2MFA Steel

E.I. Kolokolov, S.A. Tomilin, M.E. Zhidkov27

To the Issue of the Valid Form of Hereditary Viscoelasticity with One Creep Kernel

A.S. Kravchuk, A.I. Kravchuk37

The Model for Thermal Calculation of Virtual Welding Joint Formation

V.V. Krivin, V.Y. Shpitser, V.A. Tolstov, V.T. Saunkin49

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Study Ways to Increase KW in Fast Reactors with MOX Fuel Aiming for the Minimum of Sodium Void Reactivity Effect

A. Harutyunyan, S.B. Vygovskiy, A. Khachatryan50

Use CFD Model of WWER-1200 Reactor for Prediction of Fuel Assemblies Vibrations

K.N. Proskuryakov, A.V. Anikeev, E. Afshar, D.A. Pisareva62

The Increase in the Sensitivity of Diagnostics of NPP Equipment in the Conditions of Transition to 18-month Fuel Cycle

E.A. Abidova71

Synthesis of Block Diagram of Portable Software and Technical Complex for NPP Diesel Generator Unit Diagnostics

A.E. Dembitsky, Yu.P. Mucha, A.V. Chernov, E.A. Abidova76

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

The Introduction of Models of Sustainable Development and Lean Production in Ecological and Social Safety System in Modern Organization (Using the Example of «Rosatom» State Corporation)

I.E. Lyskova85

Environmental, Social and Economic Aspects of the Possible Development of Atomic Energy in the Federal Republic of Nigeria

Orumo Kenoll, A.P. Elokhin, A.I. Ksenofontov96

Formation of Universal Competencies at the Stage of Early Career Guidance in the Nuclear Energy Field

V.A. Rudenko, N.P. Vasilenko, N.V. Ermolaeva, N.I. Lobkovskaya110

Author Index of vol. 4, 2019125

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4(33), 2019

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

- Актуальность применения показателей активности щелочной фосфатазы и эстераз сестона в мониторинге водных экосистем
О.И. Бейсуг7
- Однозначность решений при использовании линейного функционального уравнения в модели радиационной защиты
В.П. Чернявский18

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

- Ликвационная неоднородность и свариваемость Стали 10ГН2МФА
Е.И. Колоколов, С.А. Томилин, М.Е. Жидков27
- К вопросу об обоснованной форме наследственной вязкоупругости с одним ядром ползучести
А.С. Кравчук, А.И. Кравчук37
- Модель для теплового расчёта формирования виртуального сварного шва
В.В. Кривин, В.Я. Шпицер, В.А. Толстов, В.Т. Саункин43

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

- Исследование способов повышения КВ в быстрых реакторах с МОХ-топливом стремясь к минимальным значениям НПЭР
А.К. Арутюнян, С.Б. Выговский, А.Г. Хачатрян50
- Использование CFD модели реактора ВВЭР-1200 для прогнозирования вибраций ТВС
К.Н. Проскуряков, А.В. Аникеев, И. Афшар, Д.А. Писарева62
- Повышение чувствительности диагностирования оборудования АЭС в условиях перехода на 18-месячный топливный цикл
Е.А. Абидова71
- Синтез блок-схемы переносного программно-технического комплекса диагностики дизель-генераторных установок атомных электростанций
А.Е. Дембицкий, Ю.П. Муха, А.В. Чернов, Е.А. Абидова76
-

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

Внедрение моделей устойчивого развития и бережливого производства в систему экологической и социальной безопасности современной организации (на примере Госкорпорации «Росатом»)

И.Е. Лыскова 85

Экологические и социально-экономические аспекты возможного развития атомной энергетики в федеративной республике Нигерия

К. Орумо, А.П. Елохин, А.И. Ксенофонтов 96

Формирование универсальных компетенций на этапе ранней профессиональной ориентации в области атомной энергетики

В.А. Руденко, Н.П. Василенко, Н.В. Ермолаева, Н.И. Лобковская 110

Авторский указатель номера 4(33), 2019 124

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 556.012:574

**АКТУАЛЬНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АКТИВНОСТИ
ЩЕЛОЧНОЙ ФОСФАТАЗЫ И ЭСТЕРАЗ СЕСТОНА В
МОНИТОРИНГЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

© 2019 О.И. Бейсуг

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

Рассмотрены оценки состояния водных экосистем. Проведен анализ уже существующих в гидрохимии оценок, используемых в мониторинге водных экосистем, выявлены их достоинства и недостатки. Обосновано применение показателей активности щелочной фосфатазы и внеклеточных эстераз для оценки состояния водных экосистем в мониторинге поверхностных вод суши.

Ключевые слова: экологическое состояние, активность ферментативных показателей (активность щелочной фосфатазы, активность внеклеточных эстераз сестона), водные экосистемы, экологический мониторинг, гидробиоценозы, биоиндикация, гидробиологический контроль, загрязнение, загрязняющие вещества.

Поступила в редакцию 14.05.2019

После доработки 22.11.2019

Принята к публикации 28.11.2019

Цель работы – показать актуальность применения показателей активности щелочной фосфатазы и эстераз сестона в мониторинге водных экосистем в сравнении с другими методами применения в гидрохимической практике.

Масштабы загрязнения пресных вод глобальны, а запасы пресных вод на земле существенно ограничены, поэтому загрязнение пресноводных экосистем является актуальным. Поэтому, для поверхностных вод оценка комплексного влияния загрязняющих веществ на состояние гидробиоценозов с учетом региональных и экологических особенностей водных экосистем имеет особое значение. Следовательно, для определения загрязнения водных экосистем методы биоиндикации имеют так же чрезвычайно важное значение. В методах биоиндикации используются показатели активности щелочной фосфатазы и внеклеточных эстераз. Показатели АЩФ (активность щелочной фосфатазы) и АЭ (активность эстераз) продуцируются в водные экосистемы бактериопланктоном и одноклеточными водорослями. Так как показатели АЩФ и АЭ осуществляют биогеохимический круговорот веществ, участвуют в трансформации органических соединений, то применение в мониторинге показателей АЩФ и АЭ для оценки состояния водных экосистем является наиболее актуальным в настоящий момент времени.

На все экосистемы на Земле в большей или меньшей степени оказывается антропогенная нагрузка, следовательно, в любой природной экосистеме будут происходить нарушения или трансформации. Поэтому любая экосистема оценивается по её трансформированности или нарушенности. Это характеризуется отклонением состояния экосистем от исходного, которое рассматривается в гидрохимии за «нормальное» её состояние, с учётом трансформации (разрушения) структуры и функций всех частей биосферы: атмосферы, гидросферы, педосферы, литосферы

фитоценоза, зооценоза [1]. Следовательно, при оценке состояния экосистем учитываются все структуры и функции всех частей биосферы.

На данный момент времени для оценки состояния пресноводных экосистем в гидрохимии применяют популяционный и экосистемный подходы. Популяционный подход изучает популяции отдельных видов, куда входят механизмы группообразования и иерархии, генетический состав популяций, популяционная организация вида, внутривидовые средства связи и сигнализации, консолидирующих популяцию в единое целое, пространственная структура популяции. Экосистемный подход рассматривает оценку роли организмов таких как, продуценты, консументы и редуценты, которые рассматриваются в процессе преобразования вещества и энергии в природе [2]. По глубине трансформации структурных компонентов пресноводной экосистемы можно определить уровень нарушенности данной экосистемы. Следовательно, функциональные трансформации будут следствием изменения структуры водной экосистемы и будут вторичны [1]. Так жизнь имеет многообразие форм и структур, но её биогеохимические функции однообразны [3], то, видовой состав особей, входящих в состав биоценоза, может значительно меняться без изменения характеристик его биогеохимического цикла. Установлено, что особи разных видов выполняют одну и ту же биогеохимическую работу [4]. Таким образом, к первичным изменениям структуры водной экосистемы стоит отнести функциональные изменения, а к структурным – их следствие. Следовательно, наиболее полная оценка состояния пресноводных экосистем может быть дана при комплексном подходе, учитывая характеристики структурных и функциональных показателей.

Состояние пресноводных экосистем описывается множеством признаков. Поэтому для оценки состояния водных экосистем необходимо использовать существенные признаки, такие как состав, строение, функциональность водной экосистемы и самовосстановление, то есть резистентность. В гидрохимии понятие «состояние» означает сравнение с нормой или эталоном в водной экосистеме. Каждая экосистема, как тип, имеет свою норму. Чтобы установить степень отклонения водных экосистем от «нормы» нужно сравнить наблюдаемую экосистему с «нормой». Таким образом, установление фоновых участков для водных экосистем, которые бы испытывали наименьшее антропогенное воздействие, является актуальным в практике мониторинга водных экосистем, особенно для тех пресноводных экосистем, которые испытывают высокую антропогенную нагрузку.

В мониторинге водных объектов оценка их состояния осуществляется по гидробиологическим и гидрохимическим показателям. Состояние водного объекта в зависимости от вида водопользования определяется как его характеристика по совокупности качественных и количественных показателей [5, 6]. Таким образом, для характеристики состояния водной экосистемы необходимы оценки, дающие полную всестороннюю информацию не только о составе и свойствах воды, но и о протекающих в водном объекте процессах, которые создают среду обитания для гидробионтов [7]. Ввиду отсутствия экологических нормативов (предельно допустимых экологических нагрузок) комплексное оценивание состояния экосистем на сегодняшний день невозможно. Поэтому на практике применяется подход, при котором составляющие экосистему биотическая и абиотическая компоненты и их показатели оцениваются и рассматриваются отдельно и совокупно с использованием предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ (ПДК) и классификаций в зависимости от вида водопользования [7].

По гидрохимическим показателям осуществляется контроль абиотической составляющей водных экосистем. Гидрохимические показатели оценивают качество поверхностных вод. В зависимости от количества и состава собранных аналитических данных выделяется несколько основных видов оценки: косвенные, покомпонентные

или единичные и комплексные [7]. Косвенные и единичные или покомпонентные оценки качества вод применяются в мониторинге как традиционные. Вследствие многократного увеличения антропогенной нагрузки на пресноводные экосистемы появились комплексные оценки, которые устанавливают степень и характер загрязненности вод.

Оценка водного объекта по относительным гидрохимическим показателям постоянно применяется в гидрохимии, но только в её специальных областях. Это объясняется тем, что данные показатели достаточно недавно используются и тем, что гидрохимия применяет традиционный подход.

Единичные характеристики отражают загрязненность воды отдельными ее компонентами и позволяют оценить качество воды по различным классам. Этот вид относительных показателей имеет низкий уровень обобщения.

Единичные статистические характеристики используются в гидрохимии тоже достаточно длительное время. Среди единичных статистических характеристик в гидрохимии в основном применяют такие как дисперсия, медиана, среднеарифметические, средневзвешенные величины. Результатом данных характеристик являются показатели и коэффициенты, которыми характеризуют экологическое состояние водного объекта.

Совсем недавно в гидрохимической практике стали применяться единичные или покомпонентные косвенные относительные характеристики. К настоящему времени они стали также распространены, как и статистические. К данным характеристикам относятся, например, кратность превышения ПДК, повторяемость случаев загрязненности воды и др. Данные показатели легкодоступны, конкретны, тем самым дополняют и расширяют информационную базу исходных аналитических данных.

Единичные или покомпонентные обобщенные относительные характеристики имеют четко выраженную оценочную направленность. В более ранних гидрохимических исследованиях, покомпонентные обобщенные относительные характеристики выражались в виде концентраций отдельных ингредиентов или показателей качества, таких как жесткость воды, солёность воды, иногда в виде классификаций. Так, содержание главных ионов оценивалось по степени преобладания. Для оценки минерализации поверхностных вод при этом использовалась классификация, включающая ряд интервалов её значений с оценочными характеристиками от «малой» до «очень высокой» [8].

В мониторинге водных экосистем используются относительные показатели, которые являются следствием переработки аналитических данных. Они достаточно широко оценивают состояние водного объекта. Следовательно, это способствует появлению значительного разнообразия показателей по структурным особенностям, формам выражения, их физическому содержанию, смысловой нагрузке, степени формализации, и прочее [9].

В мониторинге поверхностных вод суши применяются гидрохимические показатели, которые используют в комплексной оценке качества вод. Для комплексной оценки применяют следующие показатели: коэффициенты комплексной загрязненности воды, коэффициенты загрязненности воды, модульный коэффициент выноса загрязняющих веществ, показатели относительной продолжительности и относительных объемов загрязненного и чистого водного стока и др., которые учитывают небольшое число элементов сложного объекта [7]. При оценке качества воды применяют так же формализованные показатели, которые обеспечивают более разностороннюю и адекватную оценку качества воды [7]. К ним относятся комбинаторный индекс загрязненности воды [5], общесанитарный индекс качества воды [10], гидрохимический индекс качества воды [11], комплексная оценка степени загрязнения водоемов токсичными веществами [12], индекс качества воды [13] и др.

С каждым годом в поверхностных водах увеличивается число загрязняющих химических веществ, к которым предъявляются нормативные требования. Нормативы применяются как для питьевого водопотребления, так и для рыбохозяйственного значения. На здоровье человека и на удовлетворение его жизненных потребностей оказывают воздействие уже не столько отдельные химические вещества, содержащиеся в поверхностных водах, сколько комплекс веществ, которые одновременно присутствуют в водных объектах. Поэтому, на данный момент времени достаточно актуальной проблемой является оценка качества поверхностных вод не только по отдельным загрязняющим веществам, сколько по их комплексам.

В настоящее время в гидрохимии нет единого, общепринятого метода комплексной оценки загрязненности поверхностных вод. Однако, комплексная оценка, разработанная в Гидрохимическом институте (РД 52.24.643-2002) [5], уже внедрена в систему мониторинга России и некоторых стран СНГ. В связи с увеличением нагрузки на водные объекты в настоящее время возникла необходимость в работах, содержащих комплексную оценку качества вод, а так же комплексное оценивание качества природных вод становится обязательным в гидрохимии.

Система контроля загрязнённости водных экосистем основана на показателях предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ, а так же на сравнении концентраций загрязняющих веществ с предельно-допустимыми значениями, что является значительным недостатком системы контроля. Однако лишь для 10 % регламентируемых веществ существуют методы, которые позволяют определять их концентрации на уровне ПДК. Кроме того, в водных экосистемах образуются сложные комплексы различных растворимых или нерастворимых антропогенных химических соединений, которые в свою очередь воздействуют на организмы иначе, чем отдельные компоненты, для которых разрабатываются предельно допустимые концентрации (ПДК). [14]

В России применяется программа гидробиологического мониторинга для водных экосистем. С 1974 г. ведётся постоянный систематический контроль биотической составляющей водных объектов. В программе гидробиологического мониторинга пресноводных экосистем предусмотрены наблюдения по следующим подсистемам: фитопланктону, зоопланктону, зообентосу, перифитону, макрофитам, микрофлоре. К сожалению, дать полную оценку экологического состояния водных экосистем не представляется возможным, так как сеть наблюдений Росгидромета применяет гидробиологический контроль лишь в 20 % пунктов наблюдений.

В нашей стране оценка экологического состояния водных экосистем осуществляется по классификации В.А. Абакумова [15]. Закон Винера-Шеннона-Эшби является теоретической основой классификации В.А. Абакумова. Он отображает то, что увеличение внутреннего разнообразия биоценоза позволяет ему стабильно поддерживать высокий уровень метаболизма в широком диапазоне флуктуаций тех или иных факторов внешней среды в соответствии с обеспеченностью важнейшими жизненными ресурсами [14].

Загрязнение водных экосистем характеризуется интенсивностью метаболизма биоценозов. В водных экосистемах метаболизм биоценозов характеризуется двумя процессами: метаболическим регрессом и метаболическим прогрессом. Уменьшение интенсивности метаболизма биоценозов – метаболический регресс, увеличение интенсивности метаболизма биоценозов – метаболический прогресс. Метаболический прогресс связан с изменениями структуры биоценоза: с усложнением структуры – экологическим прогрессом, с упрощением структуры – с экологическим регрессом и с перестройкой структуры, не ведущей к ее упрощению или усложнению – экологической модуляцией. В соответствии с этой теорией при фоновом состоянии экосистем не происходит существенных изменений интенсивности метаболизма

биоценозов. Постоянное увеличение интенсивности метаболизма гидробиоценозов в водных экосистемах характеризуется антропогенным экологическим напряжением и метаболическим регрессом. Водные экосистемы, находясь в состоянии экологического напряжения, характеризуются увеличением видового разнообразия биоценозов и усложнением межвидовых отношений. Находясь в состоянии экологического регресса, в водных экосистемах происходит упрощение межвидовых отношений и снижение разнообразия биоценозов. Высокое загрязнение водных экосистем токсичными веществами способствует состоянию антропогенного метаболического регресса, которое характеризуется снижением интенсивности метаболизма биоценозов. Следовательно, полную оценку экологического состояния гидробиоценозов в мониторинге водных экосистем можно получить, применяя структурные и функциональные показатели водных экосистем.

В системе Росгидромета гидробиологический мониторинг в основном осуществляется по структурным показателям. Оценка интенсивности метаболизма биоценозов связана с определенными трудностями. Реализация на практике наиболее изученного обобщенного показателя интенсивности метаболизма – продукции и деструкции органического вещества, связана с методическими сложностями: необходимостью экспонирования проб в месте отбора в течение нескольких часов, что при современном материальном обеспечении сети наблюдений невозможно [7]. В связи с этим применение показателей интенсивности метаболизма гидробиоценозов, которые бы отличались простотой определения и высокой информативностью является на сегодняшний день актуальным. Такими показателями являются ферменты щелочная фосфатаза и внеклеточные эстеразы. Внеклеточные эстеразы и щелочная фосфатаза осуществляют взаимосвязь водных организмов со средой обитания, участвуя в трансформации жизненно важных веществ в водных экосистемах и являясь показателями их функционирования.

Так применение метода главных компонент для анализа данных экологического мониторинга в Нижнем течении р. Дон по гидрохимическим показателям показало, что если бы из расчетов были исключены АЩФ и АЭ, то классификация проб воды была бы более затруднительной [16] (рис. 1).

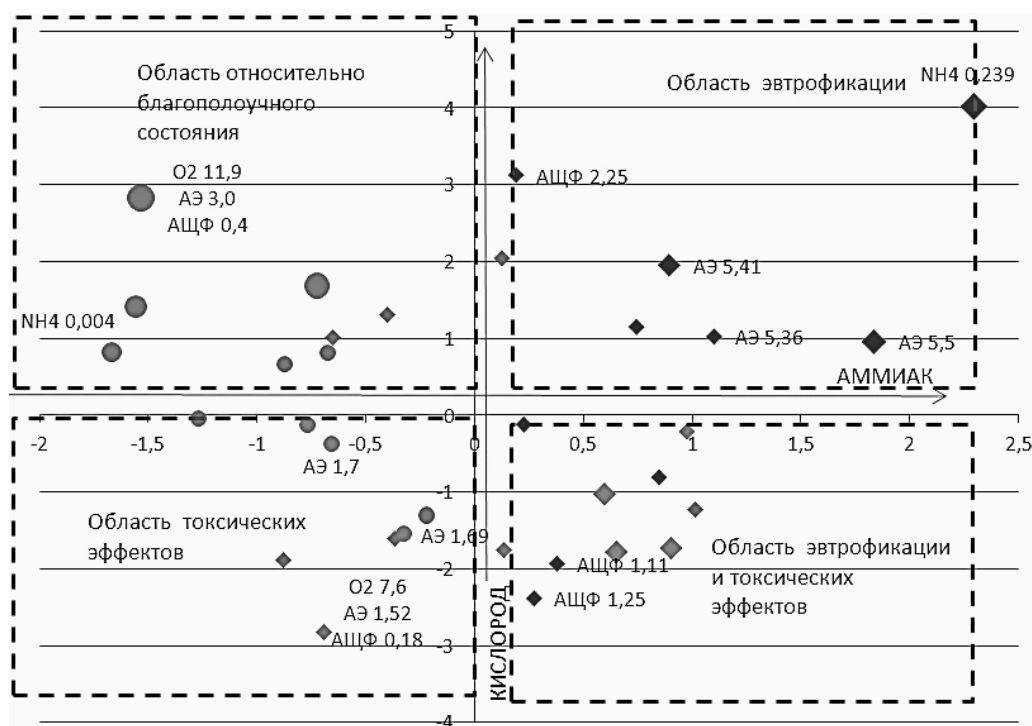


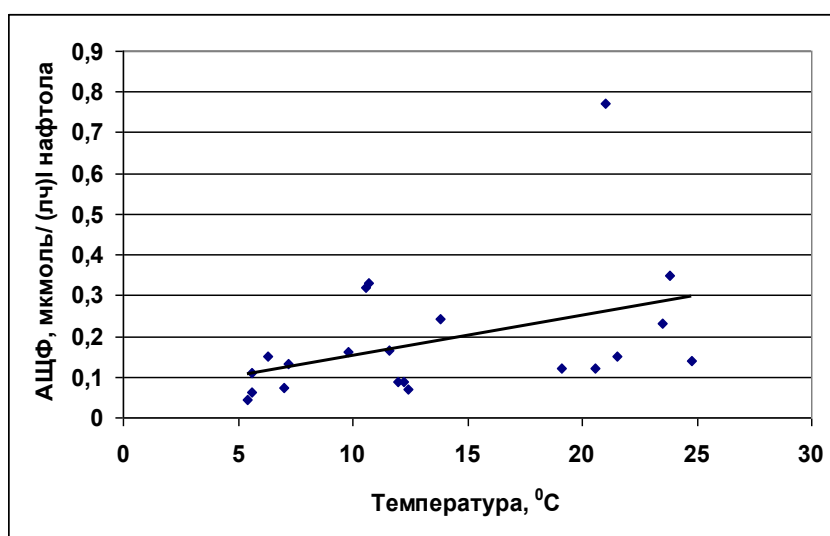
Рисунок 1 – График счетов (PC1 – PC2) [Chart of accounts (PC1 – PC2)]

При сопоставлении гидрохимических, гидробиологических и ферментативных показателей на изученных реках Ростовской области [17] установлено:

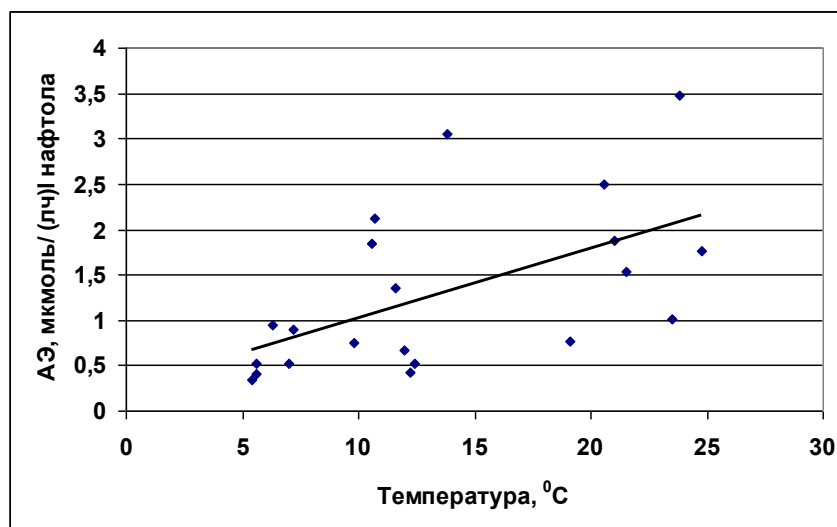
1) общая активность щелочной фосфатазы и эстераз является информативным индикатором загрязненности рек биогенными веществами, приоритетными тяжелыми металлами, нефтепродуктами, АСПАВ, органическими веществами (по БПК₅), а также состояния экосистем по микробиологическим показателям;

2) показатели активности щелочной фосфатазы и эстераз являются интегральными характеристиками ответной реакции планктонных сообществ на загрязненность воды и могут быть использованы в режимном и, в особенности, оперативном мониторинге водотоков Ростовской области;

3) показатели активности щелочной фосфатазы и эстераз наиболее информативны в период интенсивной вегетации планктонных сообществ; поздней осенью, зимой и ранней весной активность изученных ферментов существенно снижается, вследствие естественного торможения функциональной активности планктонных организмов, и связь с загрязненностью становится менее выраженной (рис. 2, 3, 4, 5).



а)



б)

Рисунок 2 – Зависимость АЩФ (а) и АЭ (б) от температуры 2002 – 2003 гг [Dependence of ASF (a) and AE (b) on 2002 – 2003 years temperature]

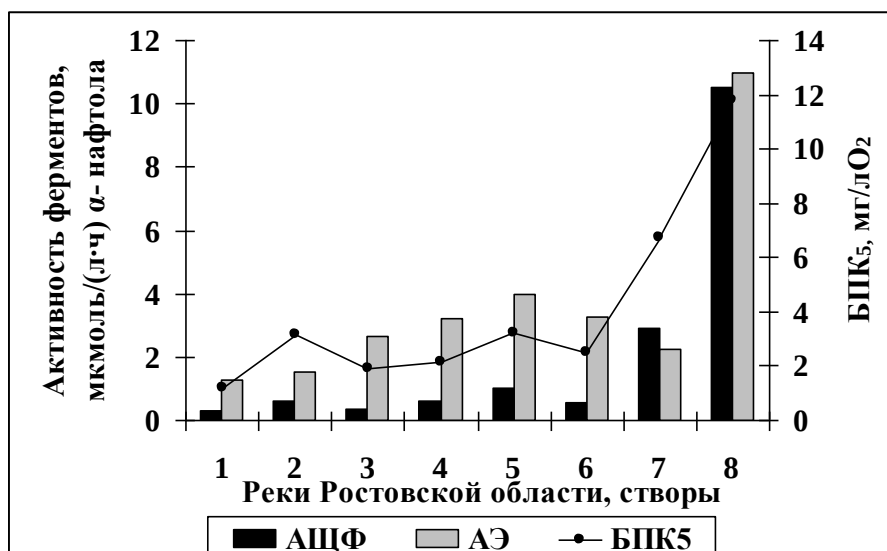
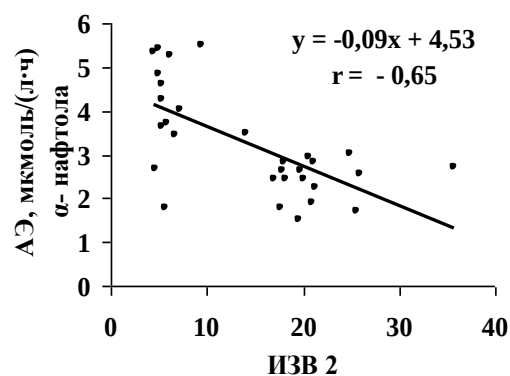
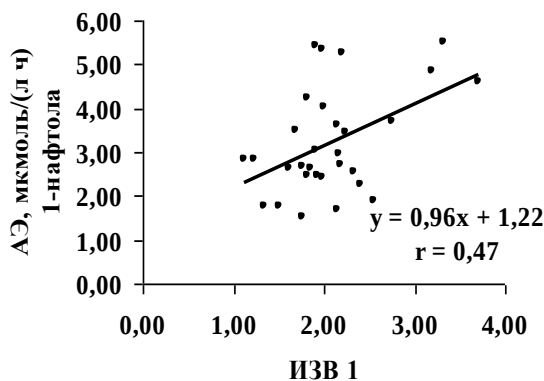
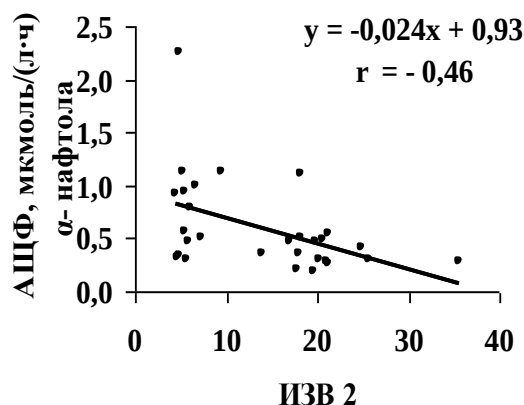
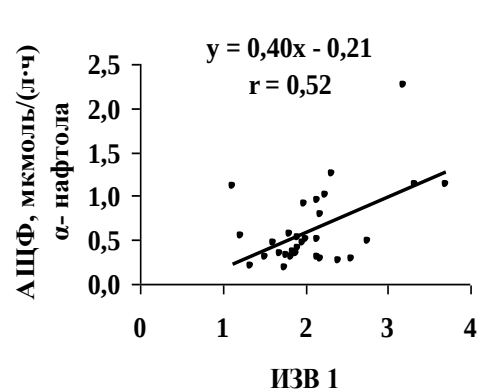


Рисунок 3 – Изменение показателей активности ферментов в водных объектах Ростовской области с разным уровнем загрязненности: 1 – р. Большая Крепкая; 2 – р. Тузлов; 3 – р. Дон, у Ростовского водозабора; 4 – р. Дон, ниже впадения р. Темерник; 5 – р. Дон, у водосброса очистных сооружений г. Ростова-на-Дону, левый берег; 6 – р. Дон, среднее значение на участке от г. Аксая до г. Азова; 7 – ручей балки Калиновой, исток, 8 – р. Темерник. [Changes of activity enzymes in water bodies of the Rostov region with different levels of pollution: 1 – the river Big Strong; 2 – river Tuzlov; 3 – the river Don, the Rostov water intake; 4 – the river Don, below the confluence of the river Temernik; 5 – the Don river, at the spillway of the treatment facilities of Rostov-on-don, the left Bank; 6 – the river Don, the average value in the area from Aksai to the town of Azov; 7 – stream beam Kalinovo, Istok, 8 – the river Temernik]



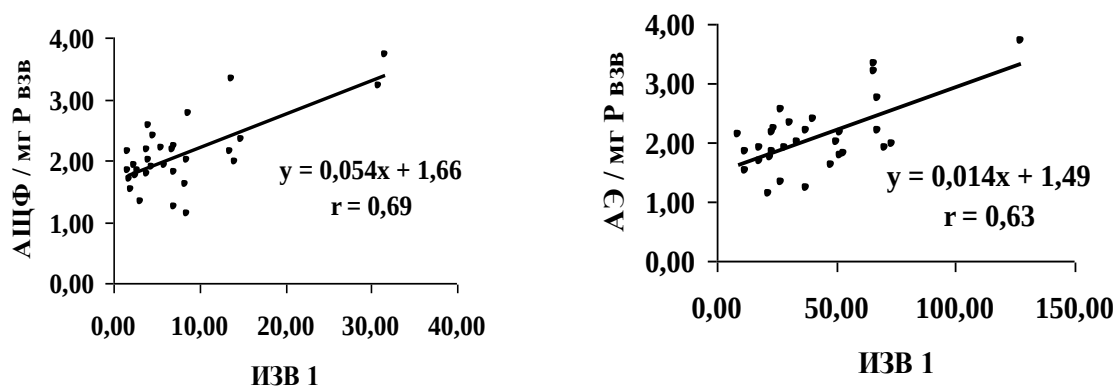


Рисунок 4 – Зависимость между показателями активности ферментов и индексами загрязнения воды (ИЗВ) в нижнем течении р. Дон в июле-сентябре 2002 года [Relationship between enzyme activity indices and water pollution indices in the lower flow of the river Don in July-September 2002]

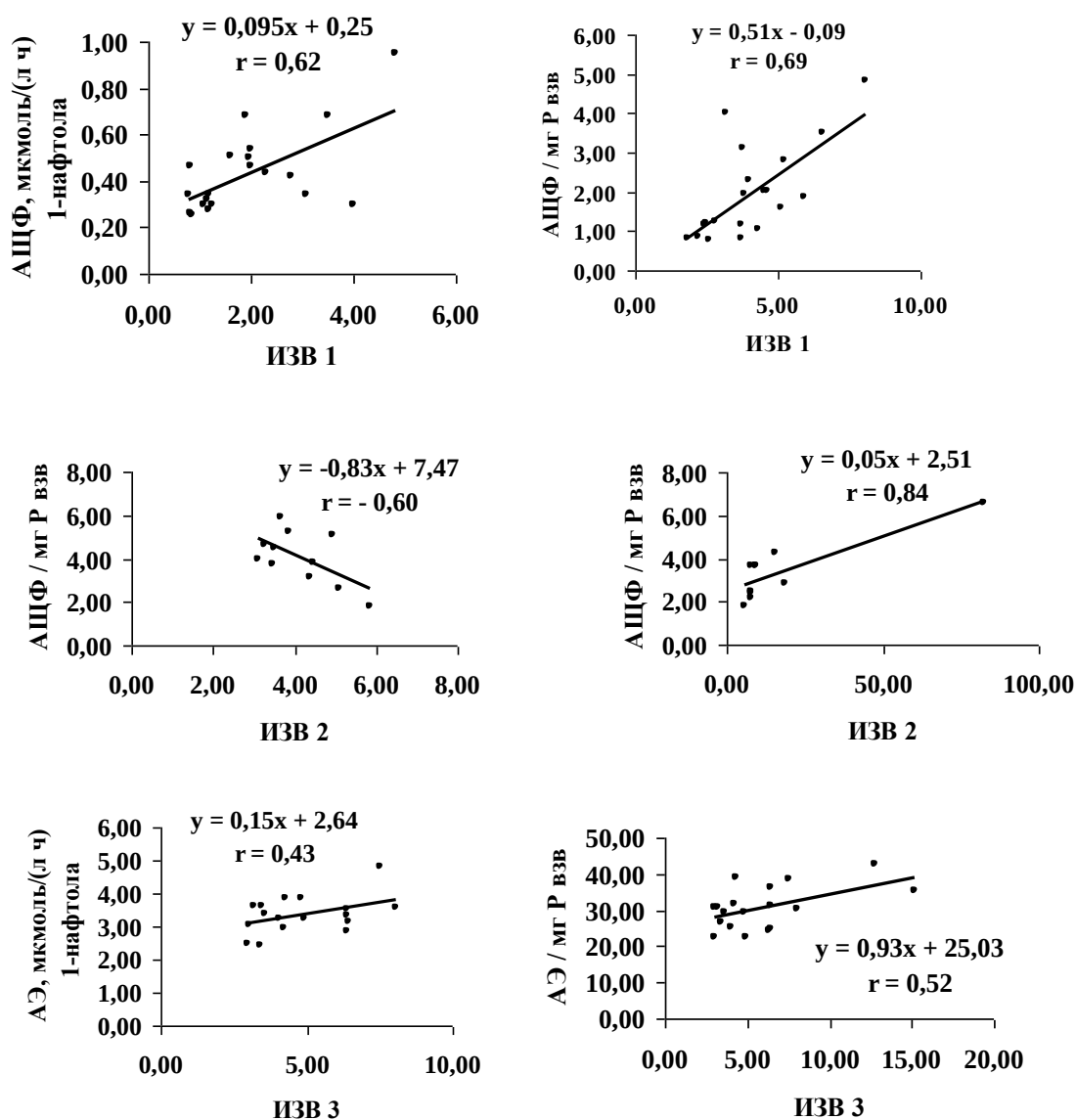


Рисунок 5 – Зависимость между показателями АЩФ и АЭ с индексами загрязнения воды (ИЗВ) в нижнем течении р. Дон в мае-июле 2003 года [Relationship between ASF and AE water pollution indices in the lower flow of the river Don in May-July 2003]

Полученные результаты позволили разработать рекомендации по использованию показателей активности ферментов в мониторинге для индикации качества водотоков Ростовской области [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кожова, О. М. Методология оценки состояния экосистем / О.М. Кожова, Л. Р. Измestьева, Б. К. Павлов, В. И. Воронин и др. – Ростов-на-Дону : ООО «ЦВВР», 2000. – 128 с.
- 2 Шварц, С. С. Эволюция биоценозов и экологическое прогнозирование / С. С. Шварц // Материалы советско-американского симпозиума по биосферным заповедникам, 1976 (доклады советских участников). – Москва, 1976. – Ч. 2. – С. 327-332.
- 3 Винберг, Г. Г. Многообразие и единство жизненных явлений и количественные методы в биологии / Г. Г. Винберг // Журнал общей биологии. – 1981. – Т. 42. – № 1. – С. 5-8.
- 4 Тимофеев-Ресовский, Н. В. О некоторых принципах классификации биохронологических единиц: вопросы классификации растительности / Н. В. Тимофеев-Ресовский // Труды Института биологии УФ АН СССР. – 1961. – Вып. 27. – С. 23-28.
- 5 РД 52.24.633-2002 Методические указания. Методические основы создания и функционирования подсистемы мониторинга экологического регресса пресноводных экосистем. Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2002 – 32 с.
- 6 Бакаева, Е. Н. Качество вод приплотинной части Цимлянского водохранилища в условиях цветения сине-зеленых микроводорослей / Е. Н. Бакаева, Н. А. Игнатова // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 1 (6). – С. 26.
- 7 Бейсуг, О. И. Методология и методы оценки состояния водных экосистем / О. И. Бейсуг, Л. М. Предеина // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 1 (10). – С. 5-9.
- 8 Емельянова В. П. К вопросу оценочного картирования в гидрохимии / В. П. Емельянова, Г. Н. Данилова, И. Д. Родзиллер // Гидрохимические материалы. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1989. – Т. 95. – С. 118-133.
- 9 Оценка качества поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям // Гидрохимические материалы. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1983. Т. 88. С. 119-120.
- 10 Новиков, Ю. В. Использование комплексных показателей при разработке гигиенической классификации водоемов по степени их загрязнения / Ю. В. Новиков, С. И. Плитман, К. О. Ласточкина, Р. М. Хвастунов // Гигиена и санитария – 1984. – № 6. – С. 11-13.
- 11 Комплексные оценки качества поверхностных вод / под ред. А. М. Никанорова. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. – 138 с.
- 12 Никаноров, А. М. Мониторинг качества вод: оценка токсичности / А. М. Никаноров, Т. А. Хоружая, Л. В. Бражникова, А. В. Жулидов. – Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 2000. – 160 с.
- 13 Гурарий, В. И. Индекс качества воды / В. И. Гурарий, А. С. Шайн // Проблемы охраны вод. – Харьков, 1973. – Вып. 4. – С. 105-114.
- 14 Абакумов, В. А. Гидробиологический мониторинг пресноводных экосистем и пути его совершенствования / В. А. Абакумов, Л. М. Суцень // Экологические модификации и критерии экологического нормирования: труды международного симпозиума, Нальчик, 1-12 июня 1990 г. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1991. – С. 41-51.
- 15 Абакумов, В. А. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / под ред. В. А. Абакумова. – Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1992. – 318 с.
- 16 Абидова Е. А. Оценка состояния водного объекта в зоне размещения РоАЭС с использованием метода главных компонент / Е. А. Абидова, О. И. Бейсуг // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4 (29). – С. 17-23.
- 17 Бейсуг О. И. Индикация качества воды в дельте Дона и малых реках Ростовской области на основе показателей активности щелочной фосфатазы и эстераз сестона : диссертация кандидата географических наук / О. И. Бейсуг – Ростов-на-Дону, 2007. – 133 с.

REFERENCES

- [1] Kozhova O.M, Izmestieva L.R., Pavlov B.K., Voronin V.I. Metodologiya ocenki sostoyaniya e`kosistem [Methodology for Assessing the State of Ecosystems: study guide]. Rostov-on-Don: TsVVR LLC, 2000. 128 p. (in Russian).
- [2] Shvarts S.S. E`volyuciya biocenozov i e`kologicheskoe prognozirovanie. Materialy` sovetsko-amerikanskogo simpoziuma po biosferny`m zapovednikam, 1976 (doklady` sovetskix uchastnikov [Evolution of Biocenoses and Ecological Forecasting. Materials of the Soviet-American Symposium

- on Biosphere Reserves 1976. Soviet participant report]. Moscow. 1976. Part 2. P. 327-332 (in Russian).
- [3] Winberg G.G. Mnogoobrazie i edinstvo zhiznenny`x yavlenij i kolichestvenny`e metody` v biologii [Diversity and Unity of Life Phenomena and Quantitative Methods in Biology]. Zhurnal obshhej biologii [Journal of Biology]. 1981. V. 42. № 1. p. 5-8. (in Russian).
 - [4] Timofeev-Resovsky N.V. O nekotory`x principax klassifikacii bioxorologicheskix edinic: voprosy` klassifikacii rastitel`nosti [Some Principles of Classification of Biochorological Units: Issues of Classification of Vegetation]. Trudy` Instituta biologii UF AN SSSR [Biology Institute of UV USSR]. 1961. V. 27. P. 23-28 (in Russian).
 - [5] RD 52.24.633-2002 Metodicheskie ukazaniya. Metodicheskie osnovy` sozdaniya i funkcionirovaniya podsystemy` monitoringa e`kologicheskogo regressa presnovodny`x e`kosistem [Guidelines. Methodical Bases of Creation and Functioning of the Subsystem of Monitoring of Ecological Regress of Freshwater Ecosystems]. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat [Saint-Petersburg: Hydrometeoizdat]. 2002. 32 p. (in Russian).
 - [6] Bakaeva E.N., Ignatova N.Ah. Kachestvo vod priplotinnoj chasti Cimlyanskogo vodoxranilishha v usloviyax czveteniya sine-zeleny`x mikrovdoroslej [Water Quality of the Dam Part of the Tsimlyansk Reservoir under the Conditions of Blue-Green Microalgae Flowering]. Global`naya yadernaya bezopasnost [Global nuclear safety]. 2013. № 1 (6). P. 26 (in Russian).
 - [7] Beisug O.I., Predeina L.M. Metodologiya i metody` ocenki sostoyaniya vodny`x e`kosistem [Methodology and Methods for Assessing the Status of Aquatic Ecosystems]. Global`naya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2014. №1 (10). P. 5-9 (in Russian).
 - [8] Emelyanova V.P., Danilova G.N., Rodziller I.D. K voprosu ocenochного kartirovaniya v gidroximii [Estimating Mapping in Hydrochemistry]. Gidroximicheskie materialy`. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrochemical Materials. Leningrad: Gidrometeoizdat]. 1989. V. 95. P. 118-133 (in Russian).
 - [9] Ocenka kachestva poverxnostny`x vod sushi po gidroximicheskim pokazatelyam [Assessment of Surface Water Quality on Land by Hydrochemical Indicators]. Gidroximicheskie materialy`. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrochemical Materials. Leningrad: Gidrometeoizdat]. 1983. V. 88. P. 119-120 (in Russian).
 - [10] Novikov Yu.V., Plitman S.I., Lastochkina K.O., Khvastunov R.M. Ispol`zovanie kompleksny`x pokazatelej pri razrabotke gigienicheskoj klassifikacii vodoemov po stepeni ix zagryazneniya [The Use of Complex Indicators in the Development of Hygienic Classification of Water Bodies according to the Degree of Their Pollution]. Gigiena i sanitariya [Hygiene and Sanitation]. 1984. № 6. P. 11-13 (in Russian).
 - [11] Kompleksny`e ocenki kachestva poverxnostny`x vod [Complex Assessments of Surface Water Quality]. Pod red. A.M. Nikanorova [Edited by A. M. Nikanorov]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrochemical materials. Leningrad: Gidrometeoizdat]. 1984. 138 p. (in Russian).
 - [12] Nikanorov A.M., Khoruzhaya T.A., Brazhnikov L.V., Zhulidov A.V. Monitoring kachestva vod: ocenka toksichnosti [Monitoring of Water Quality: Toxicity Assessment]. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat [Saint-Petersburg: Hydrometeoizdat]. 2000. 160 p. (in Russian).
 - [13] Gurariy V.I., Shine A.S. Indeks kachestva vody` [Water quality index]. Problemy` oxrany` vod [Problems of water protection]. Xar`kov [Kharkov]. 1973. Issue. 4. P. 105-114 (in Russian).
 - [14] Abakumov V.A., Sushchenya L.M. Gidrobiologicheskij monitoring presnovodny`x e`kosistem i puti ego sovershenstvovaniya [Hydrobiological Monitoring of Freshwater Ecosystems and Ways to Improve It]. E`kologicheskie modifikacii i kriterii e`kologicheskogo normirovaniya: trudy` mezhdunarodnogo simpoziuma, Nal`chik, 1-12 iyunya 1990 g. [Ecological Modifications and Criteria for Environmental Regulation: International Symposium, Nalchik, June 1-12, 1990]. Leningrad: Gidrometeoizdat [Hydrochemical materials. Leningrad: Gidrometeoizdat]. 1991. P. 41-51 (in Russian).
 - [15] Abakumov V.A. Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodny`x e`kosistem [Guide to Hydrobiological Monitoring of Freshwater Ecosystems]. Sankt-Peterburg: Gidrometeoizdat [Saint-Petersburg: Hydrometeoizdat]. 1992. 318 p. (in Russian).
 - [16] Abidova E.A., Beisug O.I. Ocenka sostoyaniya vodnogo ob`ekta v zone razmeshheniya RoAE`S s ispol`zovaniem metoda glavny`x komponent [Assessment of the State of a Water Body in the Zone of the Rostov NPP Location Using the Main Element]. Global`naya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2018. № 4 (29). P. 17-23 (in Russian).
 - [17] Beisug O.I. Indikaciya kachestva vody` v del`te Dona i maly`x rekax Rostovskoj oblasti na osnove pokazatelej aktivnosti shhelochnoj fosfatazy` i e`steraz sestona : dissertaciya kandidata geograficheskix nauk [Indication of Water Quality in the Don Delta and Small Rivers of the Rostov Region Based on Indicators of Alkaline Phosphatase Activity and Seston Esterases: Thesis of PhD in Geography]. Rostov-na-Donu [Rostov-on-Don]. 2007. 133 p. (in Russian).

The Application Urgency of Activity Indicators of Alkaline Phosphatase and Seston Esterases in Aquatic Ecosystem Monitoring

O.I. Beisug

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

ORCID iD: 0000-0001-9218-9354

WoS Researcher ID: O-6513-2018

e-mail: beisug@rambler.ru

Abstract – The paper considers assessments of aquatic ecosystem state. The analysis of existing assessments in hydrochemistry is carried out, their advantages and disadvantages are revealed. The work proves the application of indicators of alkaline phosphatase and extracellular esterase to assess the status of aquatic ecosystems in the monitoring of surface land waters.

Keywords: ecological state, enzymatic activity (alkaline phosphatase activity, sisters extracellular esterase activity), aquatic ecosystems, environmental monitoring, hydrobiocenosis, bioindication, hydrobiological control, pollution, pollutants.

.

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 51-73, 517.965

ОДНОЗНАЧНОСТЬ РЕШЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛИНЕЙНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ В МОДЕЛИ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

© 2019 В.П. Чернявский

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

В статье рассматривается функциональное линейное уравнение со сдвигом в модели радиационной защиты для процессов переноса заряженных частиц и ионизирующего излучения. Целью работы является изучение вопросов существования и однозначности решений для различных случаев, которые возникают при изменении начальных параметров модели. Анализ системы, сопутствующей функциональному уравнению, проводится методами линейной алгебры. Для случая неравенства нулю главного определителя сопутствующей системы показана корректность полученных решений; функциональное уравнение имеет единственное решение. В случае равенства нулю определителя задача полностью решена для циклов длины 2. Функциональное уравнение не имеет решений, если определитель равен нулю, а ранг расширенной матрицы равен 2. Для случая совместной системы с вырожденной матрицей получены аналитические формулы общего решения однородного и неоднородного функциональных уравнений. Эти решения зависят от коэффициентов исходного уравнения, начальной функции, порождающей цикл, и содержат произвольно выбранную функцию. Для устранения возникающей неоднозначности можно перейти к модели с невырожденной матрицей, изменив систему весовых коэффициентов модельного уравнения, или привлечь дополнительные начальные условия.

Ключевые слова: линейное функциональное уравнение, уравнение со сдвигом, итерация, цикл, сопутствующая система, ранг, однородное и неоднородное функциональное уравнение.

Поступила в редакцию 16.09.2019

После доработки 05.11.2019

Принята к публикации 06.11.2019

Введение

Методы математического моделирования применяются при изучении различных вопросов радиационной безопасности [1-3]. В одной из моделей используется линейное функциональное уравнение со сдвигом, разработанное Карлеманом [4]. Такая модель описания впоследствии развивалась [5, 6] и применялась во многих задачах, в том числе, при решении уравнений гиперболического типа [7], к которым относятся уравнения переноса заряженных частиц и ионизирующего излучения в различных материальных средах. В настоящей работе рассматриваются вопросы однозначности решений линейного функционального уравнения с циклическими итерациями аргумента (уравнения со сдвигом) [8]:

$$a_0(x)u(x) + a_1(x)u(f(x)) + a_2(x)u(f(f(x))) + \dots + a_{n-1}(x)u(\underbrace{f(f(\dots f(x)\dots))}_{n-1}) = b(x), \quad (1),$$

где $a_0(x), a_1(x), \dots, a_{n-1}(x), b(x), f(x)$ – заданные функции, определённые на множестве $X \subset R$, причём $Y \subset X$, где $Y = f(X)$ – множество значений $f(x)$; $u(x)$ – искомая

$$\underbrace{f(f(\dots f(x)\dots))}_k \neq x \text{ при } 1 \leq k < n \text{ и } \underbrace{f(f(\dots f(x)\dots))}_n = x. \quad (2)$$

$f_0(x) = x, f_1(x) = f(x), f_k(x) = \underbrace{f(f(\dots f(x)\dots))}_k, k = 1, 2, \dots, n-1,$ следовательно,

 $f_n(x) = x = f_0(x)$ — условие цикличности. Обозначим также

 $a_{k;i}(x) = a_i(f_k(x)), u_k(x) = u(f_k(x)), b_k(x) = b(f_k(x)), i, k = 1, 2, \dots, n-1.$

$$a_{0;0}(x)u_0(x) + a_{0;1}(x)u_1(x) + a_{0;2}(x)u_2(x) + \dots + a_{0;n-1}(x)u_{n-1}(x) = b_0(x). \quad (3)$$
[illegible]
$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{0;0} & a_{0;1} & \cdots & a_{0;n-2} & a_{0;n-1} \\ a_{1;n-1} & a_{1;0} & \cdots & a_{1;n-3} & a_{1;n-2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n-2;2} & a_{n-2;3} & \cdots & a_{n-2;0} & a_{n-2;1} \\ a_{n-1;1} & a_{n-1;2} & \cdots & a_{n-1;n-1} & a_{n-1;0} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, № 4(33) 2019

$$u_k(x) = \frac{\Delta_k(x)}{\Delta(x)}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1, \quad (6)$$

где $\Delta_k(x)$ – определитель, полученный из (5) заменой $k + 1$ -го столбца на столбец свободных членов. Решение уравнения (1) следует из (6) при $k = 0$: $u(x) = u_0(x) = \Delta_0(x)/\Delta(x)$, но т.к. функции $u_k(x)$ получаются последовательными итерациями: $u_{k+1}(x) = u_k(f(x))$, то формулы (6) в указанном смысле не должны противоречить друг другу.

Лемма 1

Пусть $\Delta \neq 0$, тогда решения (6) системы (4) корректны, т.е. удовлетворяют условиям

$$\frac{\Delta_{k+1}(x)}{\Delta(x)} = \frac{\Delta_k(f(x))}{\Delta(f(x))}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1,$$

Доказательство.

Подставим в (5) $f(x)$ вместо x :

$$\Delta(f(x)) = \begin{vmatrix} a_{1;0} & a_{1;1} & \dots & a_{1;n-2} & a_{1;n-1} \\ a_{2;n-1} & a_{2;0} & \dots & a_{2;n-3} & a_{2;n-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n-1;2} & a_{n-1;3} & \dots & a_{n-1;0} & a_{n-1;1} \\ a_{0;1} & a_{0;2} & \dots & a_{0;n-1} & a_{0;0} \end{vmatrix}.$$

Если последнюю строку сделать первой и последний столбец также сделать первым, то полученный в результате перестановок определитель совпадёт с определителем (5). Таким образом, $\Delta(f(x)) = (-1)^n \cdot (-1)^n \Delta(x) = \Delta(x)$. Точно так же доказывается, что если в определителе $\Delta_k(f(x))$ последнюю строку сделать первой, а последний столбец также сделать первым, то полученный определитель совпадёт с определителем $\Delta_{k+1}(x)$, значит $\Delta_k(f(x)) = (-1)^n \cdot (-1)^n \Delta_{k+1}(x) = \Delta_{k+1}(x)$, $k = 1, 2, \dots, n-2$ (при $k = n-1$ различие лишь в том, что $\Delta_{n-1}(f(x)) = (-1)^n \cdot (-1)^n \Delta_0(x) = \Delta_0(x)$). Лемма доказана.

Таким образом, если $\Delta \neq 0$, то уравнение (1) имеет единственное решение, определяемое формулой (7):

$$u(x) = \frac{\Delta_0(x)}{\Delta(x)}. \quad (7)$$

Пример 1

Решить уравнение:

$$u(x) + 2u(f(x)) + 3u(f(f(x))) + \dots + nu(\underbrace{f(f(\dots f(x)\dots)))}_{n-1}) = b(x), \quad (8)$$

где $f(x)$ – произвольная заданная функция, порождающая цикл (2) длины n . В обозначениях (1) $a_k(x) = k + 1$, $k = 0, 1, \dots, n-1$; главный определитель Δ системы (4) является циркулянтном [16] и отличен от нуля [17]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 2 & \dots & n-1 & n \\ n & 1 & \dots & n-2 & n-1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 3 & 4 & \dots & 1 & 2 \\ 2 & 3 & \dots & n & 1 \end{vmatrix} = \frac{(-1)^{n-1} n^{n-1} (n+1)}{2}.$$

Для нахождения решения (7) определитель

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} b_0 & 2 & 3 & \dots & n-1 & n \\ b_1 & 1 & 2 & \dots & n-2 & n-1 \\ b_2 & n & 1 & \dots & n-3 & n-2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n-2} & 4 & 5 & \dots & 1 & 2 \\ b_{n-1} & 3 & 4 & \dots & n & 1 \end{vmatrix}$$

разложим по первому столбцу:

$$\Delta_0 = b_0 A_{00} + b_1 A_{10} + \dots + b_{n-1} A_{n-1;0},$$

где $A_{k;0}$ – алгебраическое дополнение элемента b_k , $k = 0, 1, \dots, n-1$. Непосредственный подсчёт даёт:

$$A_{00} = \frac{(-1)^n n^{n-3} (n^2 + n - 2)}{2}, \quad A_{10} = \frac{(-1)^n n^{n-3} (n^2 + n + 2)}{2}.$$

Вычисления остальных алгебраических дополнений проводятся по единой схеме и приводят к одному и тому же результату:

$$A_{k0} = (-1)^{n-1} n^{n-3}, \quad k = 2, 3, \dots, n-1.$$

В итоге получаем единственное решение уравнения (8):

$$u(x) = \frac{2}{n^2(n+1)} \left(-\frac{n^2+n-2}{2} b_0(x) + \frac{n^2+n+2}{2} b_1(x) + b_2(x) + \dots + b_{n-1}(x) \right),$$

где $b_0(x) = b(x)$, $b_k(x) = b(\underbrace{f(\dots f(x)\dots)}_k)$, $k = 1, 2, \dots, n-1$. Отметим также, что уравнение

(8) с системой весовых коэффициентов $\{1, 2, \dots, n\}$ равносильно уравнению с системой коэффициентов $\{1, 1/2, \dots, 1/n\}$ (для установления равносильности достаточно обе части поделить на n и заменить последнее слагаемое $u(f(f(\dots f(x)\dots))) = v(x)$).

Линейное уравнение для случая $\Delta = 0$, $n = 2$

Проанализируем особенности нахождения решения задачи с $\Delta = 0$ при $n = 2$.

Уравнение (1) при $n = 2$ имеет следующий вид:

$$a_0(x)u(x) + a_1(x)u(f(x)) = b(x), \quad (9)$$

где функция $f(x)$ инволютивна, т.е. порождает цикл длины 2: $f(f(x)) = x$, а каждая из функций $a_0(x), a_1(x)$ тождественно отлична от нуля (иначе уравнение (9) становится тривиальным). Для сопутствующей уравнению системы

$$\begin{cases} a_0(x)u(x) + a_1(x)u(f(x)) = b(x) \\ a_1(f(x))u(x) + a_0(f(x))u(x) = b(f(x)) \end{cases} \quad (10)$$

главный определитель равен 0, значит, его строки пропорциональны с некоторым коэффициентом $k(x)$: $a_0(x) = k(x)a_1(f(x))$, $a_1(x) = k(x)a_0(f(x))$. Если $b(x) \neq k(x)b(f(x))$, тогда ранг расширенной матрицы $\begin{pmatrix} a_0(x) & a_1(x) & b(x) \\ a_1(f(x)) & a_0(f(x)) & b(f(x)) \end{pmatrix}$ равен двум и система (10) несовместна, следовательно, уравнение (9) не имеет решений. Пусть теперь $b(x) = k(x)b(f(x))$, т.е.:

$$\frac{a_0(x)}{a_1(f(x))} = \frac{a_1(x)}{a_0(f(x))} = \frac{b(x)}{b(f(x))} = k(x), \quad (11)$$

Ранг равен 1 и от системы (10) остаётся только уравнение (9). Метод решения, используемый в п.1, не применим. Введём функционал:

$$L[y(x)] = a_0(x)y(x) + a_1(x)y(f(x)), \quad (12)$$

который, очевидно, является линейным:

$$L[\alpha u(x) + \beta v(x)] = \alpha L[u(x)] + \beta L[v(x)] \quad (\forall \alpha, \beta \in R).$$

Запишем с помощью (12) неоднородное уравнение (9):

$$L[u(x)] = b(x), \quad x \in X, \quad (13)$$

и соответствующее ему однородное уравнение:

$$L[u(x)] = 0, \quad x \in X. \quad (14)$$

Определение

Множество функций Ω_0 называется общим решением уравнения (14) на X , если:

1) любая функция $y(x)$, $x \in X$, принадлежащая Ω_0 , является решением уравнения (14);

2) любое решение $y(x)$, $x \in X$ уравнения (14) принадлежит Ω_0 .

Аналогично определяется общее решение неоднородного уравнения (13).

Лемма 2

Общее решение однородного уравнения (14) определяется формулой (15):

$$u_0(x) = a_0(f(x))w(x) - a_1(x)w(f(x)), \quad (15)$$

или равносильной ей:

$$u_0(x) = \frac{1}{2}v(x) - \frac{a_1(x)}{2a_0(x)}v(f(x)), \quad (16)$$

где $w(x)$, $v(x)$ – произвольные на X функции.

Доказательство.

Будем искать решение уравнения (14) в виде:

$$u_0(x) = A(x)w(x) + B(x)w(f(x)),$$

где $w(x)$ – произвольная функция, а функции $A(x)$ и $B(x)$ подлежат определению. Подставим $u_0(x)$ в (14) и перегруппируем слагаемые:

$$(a_0(x)A(x) + a_1(x)B(f(x)))w(x) + (a_0(x)B(x) + a_1(x)A(f(x)))w(f(x)) = 0$$

Т.к. функция $w(x)$ произвольна, то отсюда следуют условия:

$$\begin{cases} a_0(x)A(x) + a_1(x)B(f(x)) = 0 \\ a_0(x)B(x) + a_1(x)A(f(x)) = 0, \end{cases}$$

которые можно записать в следующем виде:

$$\frac{A(x)}{B(f(x))} = \frac{B(x)}{A(f(x))} = -\frac{a_1(x)}{a_0(x)},$$

Величины $A(x)$ и $B(x)$ определяются неоднозначно. Если взять $A(f(x)) = a_0(x)$, тогда $A(x) = a_0(f(x))$, $B(x) = -a_1(x)$ и получаем формулу (15). Если же взять $A(f(x)) = 1$, тогда $A(x) = 1$, $B(x) = -a_1(x)/a_0(x)$, что соответствует равенству (16), и т.п. Но это будут равносильные представления одной и той же формулы. Так, равносильность (15) и (16) становится очевидной, если связать $v(x)$ и $w(x)$ соотношением: $v(x) = 2a_0(f(x))w(x)$. Тем самым, для любых $v(x)$ и $w(x)$ (15) и (16) являются решениями уравнения (14).

Осталось показать, что любое решение уравнения (14) содержится, например, в (16). Пусть $g(x)$ – произвольная функция, удовлетворяющая (14), тогда $-a_1(x)g(f(x))/a_0(x) = g(x)$. Теперь, чтобы убедиться, что $g(x)$ содержится в (16), достаточно в качестве $v(x)$ взять $g(x)$. Лемма доказана.

Лемма 3

Пусть $a_0(x) \neq 0$, тогда общее решение неоднородного уравнения (13) находится по формуле

$$u(x) = \frac{b(x)}{2a_0(x)} + \frac{1}{2}v(x) - \frac{a_1(x)}{2a_0(x)}v(f(x)), \quad (17)$$

где $v(x)$ – произвольная на X функция.

Доказательство.

С помощью (11) легко убедиться, что функция $u_n(x) = b(x)/(2a_0(x))$ является частным решением неоднородного уравнения (13). Добавляя к $u_n(x)$ общее решение (16) однородного уравнения, получаем: $u(x) = u_n(x) + u_0(x)$ – решение уравнения (13) для любой функции $v(x)$, входящей в $u_0(x)$, т.к. в силу линейности функционала (12):

$$L[u_n(x) + u_0(x)] = L[u_n(x)] + L[u_0(x)] = b(x).$$

Осталось доказать, что (17) содержит любое решение уравнения (13). Пусть $g(x)$ – произвольная функция, удовлетворяющая (13):

$$b(x) = a_0(x)g(x) + a_1(x)g(f(x)). \quad (18)$$

Рассматривая теперь уравнение (13) с правой частью $b(x)$, определяемой равенством (18), и подставляя (18) в (17), получим:

$$u(x) = \frac{g(x)}{2} + \frac{a_1(x)g(f(x))}{2a_0(x)} + \frac{1}{2}v(x) - \frac{a_1(x)}{2a_0(x)}v(f(x)).$$

Очевидно, что решение $g(x)$ содержится в $u(x)$, если в качестве $v(x)$ взять $g(x)$. Лемма доказана.

Пример 2

Найти все функции, удовлетворяющие уравнению:

$$\frac{x}{x-1}u(x) + xu\left(\frac{x}{x-1}\right) = \frac{x^2 - 2x + 2}{x-1}, \quad X = \mathbb{R} \setminus \{1\}. \quad (19)$$

Здесь $f(x) = \frac{x}{x-1}$ и $f(f(x)) = x$ – цикл длины 2; $b(x) = \frac{x^2 - 2x + 2}{x-1}$, $a_0(x) = \frac{x}{x-1}$, $a_1(x) = x$. Для коэффициентов уравнения выполняются условия (11) ($k(x) = 1$), но $\Delta = 0$ и формула (7) не применима. Множество всех решений уравнения (19) находим по формуле (17):

$$u(x) = \frac{x^2 - 2x + 2}{2x} + \frac{1}{2}v(x) - \frac{x-1}{2}v\left(\frac{x}{x-1}\right), \quad (x \neq 0, x \neq 1),$$

где $v(x)$ – произвольная функция.

Таким образом, в рамках примененной модели рассмотрен вопрос существования и единственности получаемых решений. Показано, что решения совместной сопутствующей системы в случае вырожденной матрицы уже при $n = 2$ содержат неоднозначность – произвольно выбранную функцию. Для устранения возникающей неоднозначности можно перейти к задаче с невырожденной матрицей, изменив систему весовых коэффициентов модельного уравнения, или привлечь дополнительные начальные условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучин, Н. Л. Математическое моделирование радиационного воздействия атомных объектов морской техники на окружающую среду и человека : диссертация доктора физико-математических наук / Н. Л. Кучин. – Санкт-Петербург, 2002. – 297 с.
2. Чирская, Н. П. Математическое моделирование свойств неоднородных структур для систем радиационной защиты / Н. П. Чирская, Е. Н. Воронина, В. Н. Милеев, Л. С. Новиков, В. В. Синолиц // Труды XXI Международной конференции «Радиационная физика твердого тела», т. 2. – Москва : ГНУ НИИ ПМТ, 2011. – С. 436-443.

3. Крюк, Ю. Е. Математические методы моделирования в оптимизации радиационной защиты / Ю. Е. Крюк, И. Е. Кунец // Вестник НТУ ХПИ. Серия: Информатика и моделирование. – Харьков : НТУ ХПИ. – 2011. – № 36. – С. 95-100.
4. Carleman, T. Sur la theorie des equations integrees et ses applications, Verhendl. Internat. Math. Kongr. Zurich, 1 (1932), P.138 – 151.
5. Литвинчук, Г. С. Краевые задачи и сингулярные уравнения со сдвигом / Г. С. Литвинчук. – Москва : Наука, 1977. – 448 с.
6. Карапетянц, Н. К. Уравнения с инволютивными операторами и их приложения / Н. К. Карапетянц, С. Г. Самко. – Ростов-на-Дону : Издательство Ростовского университета, 1988. – 187 с.
7. Василевский, Н. Л. Об одном классе сингулярных интегральных уравнений с инволюцией и его применениях в теории краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных. II / Н. Л. Василевский, А. А. Карелин, П. В. Керекеша, Г. С. Литвинчук // Дифференциальные уравнения. – 1977. 13:11. – С. 2051-2062.
8. Антоневиц, А. Б. Линейные функциональные уравнения: операторный подход / А. Б. Антоневиц. – Минск : Издательство «Университетское», 1988. – 232 с.
9. Московский государственный университет. Справочник 2000. – Москва : Издательство Московского университета, 2000. – 240 с.
10. Агаханов, Н. Х. Всероссийские олимпиады школьников по математике 1993-2006 / Н. Х. Агаханов, И. И. Богданов, П. А. Кожевников, О. К. Подлипский, Д. А. Терешин. – Москва : МЦНМО, 2007. – 472 с.
11. Бродский, Я. С. Функциональные уравнения / Я. С. Бродский, А. К. Слипенко. – Киев : Вища школа, 1983. – 96 с.
12. Полянин, А. Д. Справочник по интегральным уравнениям: Точные решения / А. Д. Полянин, А. В. Манжиров. – Москва : Издательство «Факториал», 1998. – 432 с.
13. Прасолов, В. В. Задачи по алгебре, арифметике и анализу / Прасолов В. В. – Москва : МЦНМО, 2007. – 608 с.
14. Мальцев, А. И. Основы линейной алгебры / А. И. Мальцев. – Москва : Наука, 2005. – 470 с.
15. Курош, А. Г. Курс высшей алгебры / А. Г. Курош. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 432 с.
16. Фаддеев, Д. К. Лекции по алгебре / Д. К. Фаддеев. – Санкт-Петербург : Лань, 2002. – 416 с.
17. Фаддеев, Д. К. Сборник задач по высшей алгебре / Д. К. Фаддеев, И. С. Соминский. – Москва : Наука, 1977. – 288 с.

REFERENCES

- [1] Kuchin N.L. Matematicheskoe modelirovanie radiatsionnogo vozdeistvia atomnikh objectov morskoi tehniki na okrudjaiushuiu sredu [Mathematical Modeling of the Radiation Effect of Atomic Objects of Marine Technology on the Environment and Humans]. Dissertatsiya doktora fiziko-matematicheskikh nauk [Dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences]. Sankt-Peterburg [Saint-Petersburg]. 2002. 297 p. (in Russian).
- [2] Chirskaya N.P., Voronina E.N., Mileev V.N., Novikov L.S., Sinolits V.V. Matematicheskoe modelirovanie svoystv neodnorodnykh struktur dlia system radiatsionnoi zashiti [Mathematical Modeling of the Properties of Heterogeneous Structures for Radiation Protection Systems]. Moskva. Trudi XXI Mezhdunarodnoi konferentsii «Radiatsionnaia fizika tverdogo tela» [Moscow. Proceedings of the XXI International Conference «Radiation Solid State Physics»]. 2011. v. 2. P. 436-443 (in Russian).
- [3] Kriuk J.E., Kunets I.E. Matematicheskie metody modelirovania v optimizatsii radiatsionnoi zashiti [Mathematical Modeling Methods in Optimization of Radiation Protection]. Kharkov. Vestnik NTU KhPI. Seria: Informatika i modelirovanie [Bulletin of the National Technical University Kharkov Polytechnic Institute. Series: Computer Science and Modeling]. 2011. № 36. P. 95-100 (in Russian).
- [4] Carleman T. Sur la theorie des equations integrees et ses applications, Verhendl. Internat. Math. Kongr. Zurich. 1 (1932). P.138-151 (in French).
- [5] Litvinchuk G.S. Kraevye zadachi i singuliarnye uravnenia so sdvigom [Boundary Value Problems And Singular Equations with Shift]. Moscow. Pub. Nauka [Publishing House Science]. 1977. 448 p. (in Russian).
- [6] Karapetiants N.K., Samko S.G. Uravnenia s involiutivnymi operatorami i ikh prilodjenia [Equations with Involution Operators and their Applications]. Postov-na-Donu. Izdatelstvo Rostovskogo universiteta [Rostov on Don. Rostov University Publishing House]. 1988. 187 p. (in Russian).
- [7] Vasilevsky N.L., Karelin A.A., Kereksha P.V., Litvinchuk G.S. Ob odnom klasse singuliarnykh uravneni' i ego primeneniakh v teorii kraevykh zadach dlia differentsialnykh uravneni' v chastnykh proizvodnykh. II [A Class of Singular Integral Equations with Involution and its Applications in the

- Theory of Boundary Value Problems for Partial Differential Equations. II]. *Differentsial'ny'e uravneniya* [Differential equation]. 1977, 13:11. P. 2051-2062 (in Russian).
- [8] Antonevich A.B. *Lineinnye funktsional'nye uravneniya: operatornyi podhod* [Linear Functional Equations: Operator Approach]. Minsk. Izdatelstvo Universitetskoe [Publishing House University]. 1988. 232 p. (in Russian).
 - [9] Moskovskiy Gosudarstvennyy Universitet. *Spravochnik 2000* [Moscow State University. Handbook 2000]. Moskva. Izdatelstvo Moskovskogo universiteta [Moscow. Moscow University Press]. 2000. 240 p. (in Russian).
 - [10] Agakhanov N.H., Bogdanov I.I., Kodjeynicov P.A., Podlipsky O.K., Tereshin D.A. *Vserossi'skie olimpiadi shkolnikov po matematike 1993-2006* [All-Russian Mathematics Olympiads 1993-2006]. Moscow. MCCME. 2007. 472 p. (in Russian).
 - [11] Brodskiy J.S., Slipenko A.K. *Funktsional'nye uravneniya* [Functional Equations]. Kiev. Pub. Visha shkola [High school]. 1983. 96 p. (in Russian).
 - [12] Poliyayin A.D., Manzhirov A. V. *Spravochnik po integral'nim uravneniyam: Tochnye resheniya* [Handbook of Integral Equations: Exact Solutions]. Moscow. Pub. Factorial. 1998. 432 p. (in Russian).
 - [13] Prasolov V.V. *Zadachi po algebre, arifmetike i analizu* [Problems in Algebra, Arithmetic and Analysis]. Moscow. MCCME. 2007. 608 p. (in Russian).
 - [14] Mal'tsev A.I. *Osnovy lineinoi algebra* [The Basics of Linear Algebra]. Moscow. Pub. Nauka [Publishing House Science]. 2005. 470 p. (in Russian).
 - [15] Kurosh A. G. *Kurs vishei algebri* [Course in Higher Algebra]. Sankt-Peterburg [Saint-Petersburg]. Pub. Lan' [Publishing House «Doe»]. 2019. 432 p. (in Russian).
 - [16] Faddeev D.K. *Leksii po algebre* [Lectures on Algebra]. Sankt-Peterburg [Saint-Petersburg]. Pub. Lan' [Publishing House "Doe"]. 2002. 416 p. (in Russian).
 - [17] Faddeev D.K., Sominsky I.S. *Sbornik zadach po vishei algebre* [Collection of Problems in Higher Algebra]. Moscow. Pub. Nauka [Publishing House Science]. 1977. 288 p. (in Russian).

Unambiguity of Decisions When Using Linear Functional Equation in the Radiation Protection Model

V.P. Cherniavsky

*Sarov Physical Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Dukhov St., 6, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia 607186
ORCID iD: 0000-0002-1628-2271
e-mail: mattutor@mail.ru*

Abstract – The paper considers a functional linear equation with a shift in the radiation protection model for the transport of charged particles and ionizing radiation. The aim of the work is to study the questions of the existence and uniqueness of solutions for various cases that arise when the initial parameters of the model change. The analysis of the system accompanying the functional equation is carried out by linear algebra methods. For the case of the inequality to zero of the main determinant of the accompanying system, the correctness of the obtained solutions is shown; the functional equation has a unique solution. If the determinant vanishes, the problem is completely solved for cycles of length 2. The functional equation has no solutions if the determinant is zero and the rank of the extended matrix is 2. For the case of a joint system with a degenerate matrix, analytical formulas for the general solution of a homogeneous and inhomogeneous functional equation are obtained. These solutions depend on the coefficients of the initial equation, the initial function generating the cycle, and contain an arbitrarily chosen function. To eliminate the ambiguity that arises, one can go to a model with a non-degenerate matrix by changing the system of weight coefficients of the model equation, or use additional initial conditions.

Keywords: linear functional equation, shift equation, iteration, cycle, associated system, rank, homogeneous and inhomogeneous functional equation.

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

УДК 621.791 : 621.039 : 620.18

**ЛИКВАЦИОННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ И СВАРИВАЕМОСТЬ
СТАЛИ 10ГН2МФА**

© 2019 Е.И. Колоколов*, С.А. Томилин*, М.Е. Жидков**

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

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

В статье показано, что ликвационная неоднородность, свойственная заготовкам из стали 10ГН2МФА, вызывает образование в них участков, обогащенных легирующими элементами, примесями и неметаллическими включениями, что приводит к явно выраженной структурной неоднородности и различной склонностью к рекристаллизации при обработке давлением, образованию закалочных структур, а также горячих трещин в зонах термического влияния в ходе выполнения наружных валиков при автоматической сварке под флюсом. Подобное поведение может проявляться и в металле сварного шва при повышенном тепловложении, и других отклонениях в технологии, вызывающих образование крупнодендритной структуры.

Ключевые слова: ликвационная неоднородность, свариваемость стали, термокинетическая диаграмма, бейнит, мартенситно-аустенитная составляющая, горячие микротрещины ликвационного происхождения, склонность к рекристаллизации при обработке металлов давлением.

Поступила в редакцию 27.09.2019

После доработки 28.10.2019

Принята к публикации 07.11.2019

При изготовлении корпусного оборудования реакторных установок типа ВВЭР, как правило, применяют стали двух типов: 15Х2НМФА и 10ГН2МФА. Первые используют для изделий более высокого класса прочности – корпусов и крышек реактора, а вторые для менее прочных – в основном для парогенераторов, компенсаторов давления и труб главного циркуляционного контура (ГЦК). Технологии обработки заготовок и полуфабрикатов из этих сталей, например, сварка и термическая обработка, подобны. Так, температуры их нагрева при отпуске практически не отличаются и обычно составляют 620–650⁰С; допускается проведение отпуска вплоть до 670⁰С [1]. Макро- и микроструктура, а также механические свойства этих сталей отличаются уже более заметно.

В поковках стали 10ГН2МФА заметна ликвационная неоднородность (рис. 1), выражающаяся в наличии участков различной степени травимости. При этом с уменьшением сечения заготовок формируется все более выраженная полосчатая структура, состоящая из таких участков.



Рисунок 1 – Ликвационная неоднородность поковок из стали 10ГН2МФА (более темные участки содержат больше углерода и сильнее легированы), $\times 100$ [Liquidation heterogeneity of forgings from 10GN2MFA steel (darker sections contain more carbon and are more alloyed), $\times 100$]

В поковках из стали 15Х2НМФА подобный эффект заметно слабее. Еще одно не достаточно выясненное различие – гарантированные значения $T_{\text{ко}}$ основного металла и швов. Для стали 10ГН2МФА они одинаковы и составляют от минус 10 до плюс 15 $^{\circ}\text{C}$ для разных изделий, в то время как для основного металла стали 15Х2НМФА $T_{\text{ко}}$ равна от минус 90 до минус 40 $^{\circ}\text{C}$, а для швов – не ниже минус 25 $^{\circ}\text{C}$. По содержанию углерода и типу легирования $T_{\text{ко}}$ должны быть ниже у стали 10ГН2МФА. Поэтому причины ее более высоких нормативных температур и для швов и для основного металла по сравнению со сталью 15Х2НМФА не совсем понятны.

Рассмотрим причины появления ликвационной неоднородности в малоуглеродистых низколегированных сталях. Согласно Н.П. Бунину [2], очень сильно ликвируют **S** и **P**, слабее (в 3-5 раз) **C**, **As**, **V**, **Mo**, а для **Si**, **Cr**, **Mn** и **Ni** ликвация практически не выражена. На рисунке 2 показан участок диаграммы равновесия системы **Fe – C**, соответствующий температурам интервала кристаллизации мало- и среднеуглеродистых сталей. Для сплавов с концентрацией $C \leq 0,1\%$, к которым относится и сталь 10ГН2МФА, первичная кристаллизация (для сплава **K₁** от точки 1 до точки 2) завершается на линии **A–H**. В этих сплавах формируется дендритная структура δ -феррита. В процессе первичной кристаллизации избыточный углерод и содержащиеся в расплаве атомы легкоплавких примесей (в первую очередь **S** и **P**, а также **As** и содержащиеся в стали **V** и **Mo**) и неметаллические включения выталкиваются в остаточные объемы жидкости, в то время как **Si**, **Mn** и **Ni** распределены равномерно. К моменту окончания кристаллизации все ликвирующие элементы сосредоточены на границах дендритов. В этом заключается одно из проявлений дендритной ликвации. Для сплавов с $C > 0,1\%$ на линии **H–J–B** первичная кристаллизация прерывается перитектическим превращением. Этот процесс осуществляется с выделением тепла, ускоряющего диффузию, и для сплава, соответствующего точке **J**, заключается в том, что выделившийся феррит взаимодействует с оставшимся расплавом, в результате чего во всем объеме сплава образуется аустенит, в котором растворяется избыточный углерод. Это приводит к тому, что дендритная ликвация в таких сплавах выражена значительно слабее. По содержанию углерода сталь 15Х2НМФА практически совпадает с точкой **J**, т.е. все сказанное выше о сплавах с $C > 0,1\%$ относится и к ней.

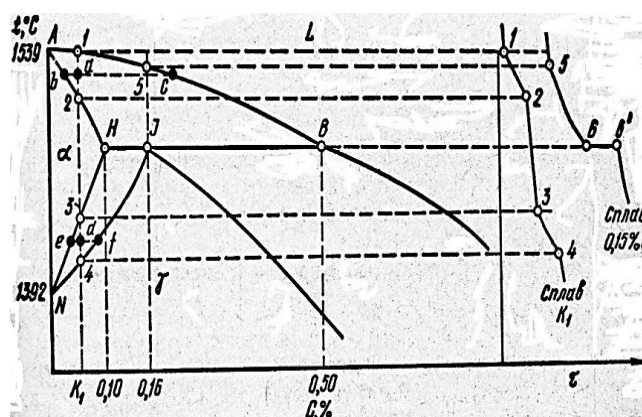


Рисунок 2 – Схема превращений в низко- и среднеуглеродистых сталях при кристаллизации согласно диаграмме равновесия $Fe - C$ [The scheme of transformations in low- and medium-carbon steels during crystallization according to the $Fe - C$ equilibrium diagram]

Приведенная схема превращений несколько упрощена, однако она показывает основную причину формирования дендритной ликвации в сталях 10ГН2МФА, а также мест сосредоточения примесей и неметаллических включений в закристаллизованном металле. Последующая при охлаждении двойная перекристаллизация при полиморфных превращениях, а также аналогичные и другие превращения при обработке давлением, «размазывают» химическую и структурную неоднородность, которая приобретает вид, характерный для имеющих поковок. Более темные участки (см. рис. 1) из-за ликвации содержат большее количество таких карбидообразующих элементов, как V и Mo . Микротвердость более темных участков выше, так как здесь присутствуют различные формы бейнита. Для описания появления таких микроструктур удобно использовать термокинетические диаграммы (ТКД), на которых более легированные темные участки соответствуют появлению более легированных бейнитных структур. На рисунке 3 приведены термокинетические диаграммы, характерные для малоуглеродистых низколегированных сталей с различным содержанием легирующих элементов [3]. В стали 12ГН3МФ, более легированной Ni , устойчивость аустенита выше, больше твердость бейнита, критическая точка A_1 – ниже.

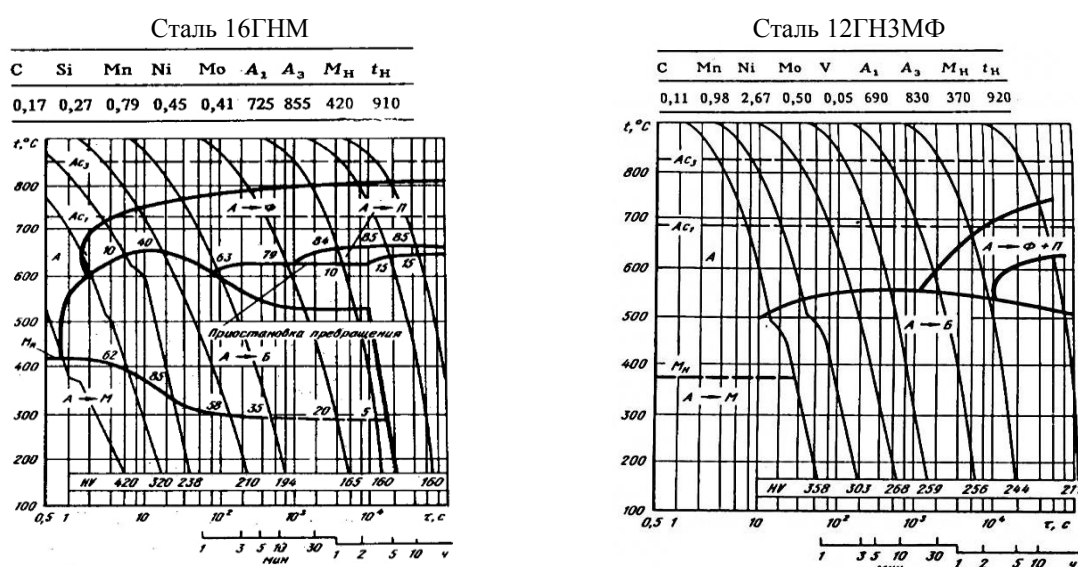
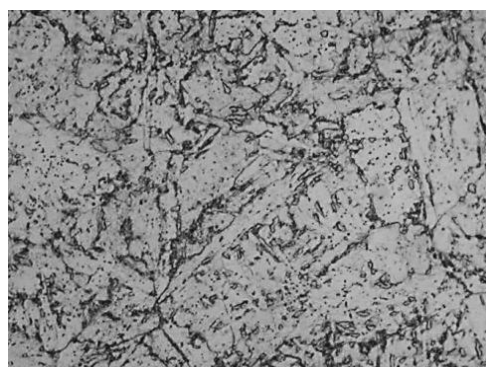
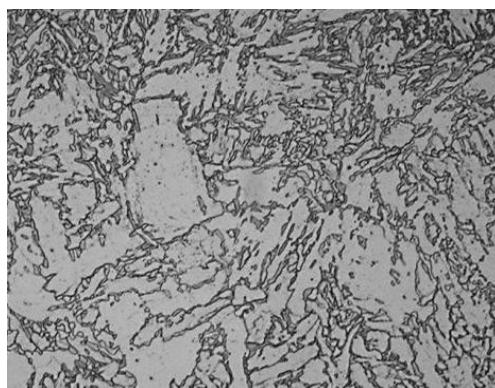


Рисунок 3 – Термокинетические диаграммы, характерные для малоуглеродистых низколегированных сталей с различным содержанием легирующих элементов [3] [Thermokinetic diagrams characteristic of low-carbon low-alloy steels with different content of alloying elements [3]]

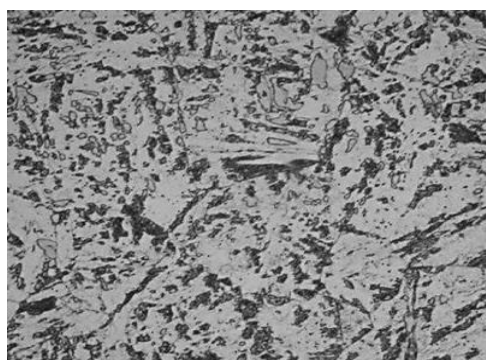
Ликвационная неоднородность может привести к локальному снижению критической точки A_1 в обогащенных легирующими элементами-аустенитообразователями участках. При проведении отпуска в интервале 660-670⁰С сталей или их сварных соединений из-за пониженной критической точки A_1 в сталях типа 10ГН2МФА в этих участках происходит частичное полиморфное превращение феррита в аустенит. При переходе в межкритический интервал образуются островки аустенита, которые при последующем охлаждении испытывают мартенситное превращение. Образуется так называемая мартенситно-аустенитная составляющая (МАС), наличие которой повышает прочность и ухудшает ударную вязкость [4]. На рисунке 4 приведены микроструктуры стали 10ГН2МФА с различной морфологией и содержанием МАС. Это обстоятельство необходимо учитывать при назначении режимов термической обработки данной стали и ее сварных соединений.



а



б



в

Рисунок 4 – Мартенситно-аустенитная составляющая (МАС): а) в виде цепочек, а также отдельных светлых вытянутых островков, x500; б) скелетная структура, x200; в) отдельные частицы МАС (светлые) и трооститная составляющая (темная) в ферритной матрице, x500 [The martensitic-austenitic component (MAC): a) in the form of chains, as well as individual light elongated islands, x500; b) skeletal structure, x200; c) individual MAC particles (light) and troostite component (dark) in a ferrite matrix, x500]

При проведении горячей обработки давлением изделий из стали 10ГН2МФА, например, штамповки донышек, гибки колен трубопроводов ГЦК, ликвационная неоднородность может привести к рекристаллизационным процессам, изменяющим их механические свойства. При нагреве под штамповку происходит частичное растворение микролегирующих частиц карбидов ванадия (VC), в результате чего начинается неконтролируемый рост аустенитных зерен в участках обедненных легирующими элементами [5]. На рисунке 5 показан результат частичной рекристаллизации, выявленной при анализе микроструктуры после гибки колен. Для выработки технологических рекомендаций по данному вопросу необходимо проведение специального исследования.

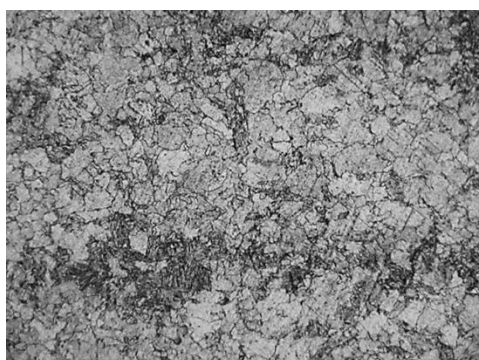
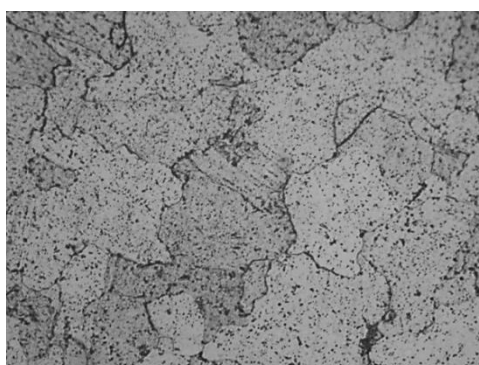
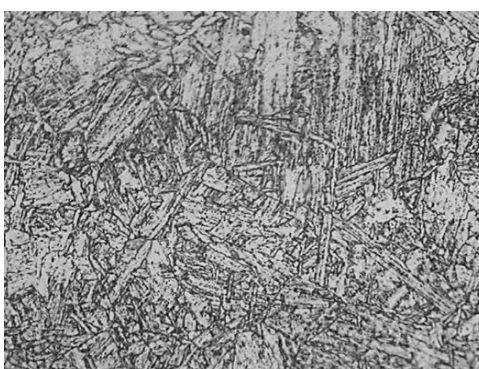
*a**б**в*

Рисунок 5 – Частичная рекристаллизация в структуре стали 10ГН2МФА после нагрева для гибки колен:

a) общий вид – светлые зерна, в которых прошла рекристаллизация, темные зерна в виде полос – рекристаллизации не было, $\times 100$; *б*) бейнитная структура, выявляемая после рекристаллизации, $\times 500$; *в*) игольчатый бейнит в не рекристаллизованных участках, $\times 500$ [Partial recrystallization in the structure of 10GN2MFA steel after heating for bending: a) general view is light grains in which recrystallization took place, dark grains in the form of stripes mean no recrystallization, $\times 100$; b) bainitic structure detected after recrystallization, $\times 500$; c) needle bainite in unrecrystallized areas, $\times 500$]

При сварке, попавшие в высокотемпературную область зоны термического влияния (ЗТВ) участки, обогащенные углеродом и легирующими элементами, а также примесями и неметаллическими включениями, могут вести себя по-разному [6, 7]. Как правило, эти участки более твердые и сильнее травятся. Если в таком участке, прилегающем к линии сплавления, присутствуют неметаллические включения (как правило, они комплексные), здесь произойдет подплавление и образуются горячие микротрещины ликвационного происхождения [8]. Они, в частности, могут образоваться при выполнении наружных горизонтальных валиков или приварке креплений вблизи кольцевых швов, если в соответствующей обечайке присутствуют такие включения, или в случае применения режимов сварки с повышенной погонной энергией [7]. На рис. 6 приведена макроструктура выявленного дефекта данного типа, а на рис. 7 – надрывы, образующиеся при вскрытии такого дефекта в процессе испытаний на загиб, и общий вид излома данного образца (горячая трещина – сверху).

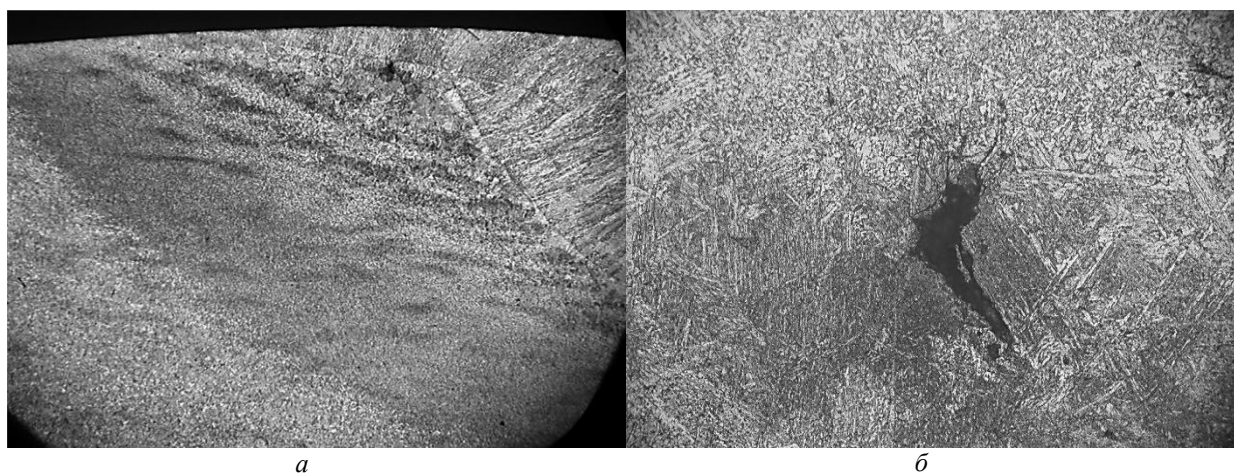


Рисунок 6 – Горячие микротрещины, которые могут образовываться на линии сплавления при наложении валика, параллельного поверхности поковки, а) общий вид (вверху - валик с дефектом на линии сплавления), x20; б) горячая микротрещина при большем увеличении (в верхней части трещины видны «усики» нераскрывшейся трещины, распространяющиеся в шов), x200 [Hot microcracks that can form on the fusion line when applying a roller parallel to the forging surface, a) general view (above is a roller with a defect on the fusion line), x20; b) a hot microcrack with a larger increase (in the upper part of the crack, “antennae” of an unopened crack propagating into the seam are visible), x200]

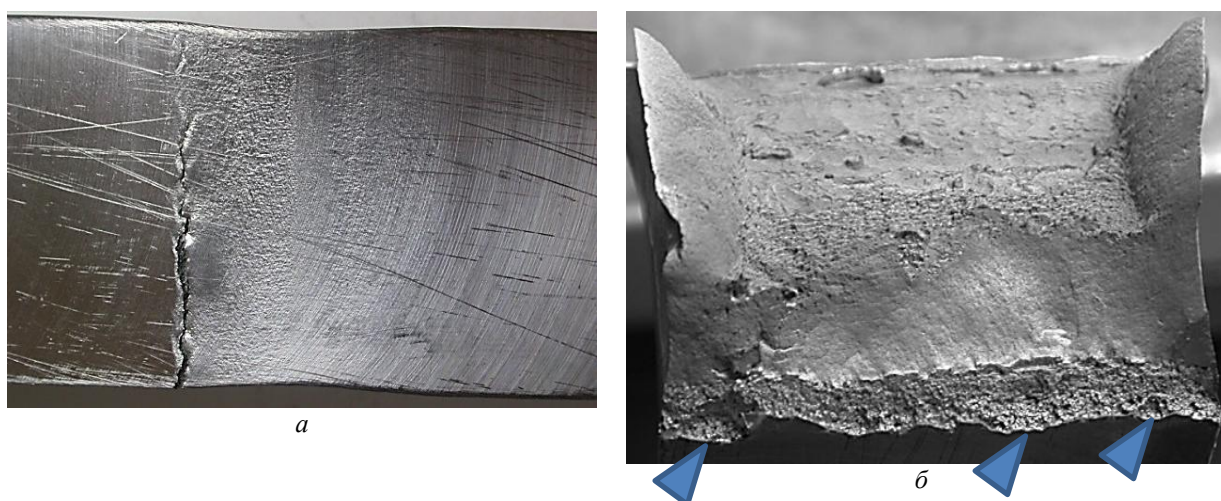


Рисунок 7 – Трещина на гибовом образце: а) место образования трещины; б) вскрытая в результате изгиба трещина (стрелками указаны очаги горячих трещин) [Crack on the bending sample: a) the place of crack formation; b) crack opened as a result of bending (arrows indicate hot spots)]

На рисунке 8 приведены микрофрактографические признаки выявленной трещины. Общий вид дефекта представлен на рисунке 8а и имеет общее крупнозернистое межзеренное строение, отражающее структуру зоны перегрева, характерную для основного металла у линии сплавления. Очагами являются объемные микродефекты в виде оплавленных полостей в области скопления неметаллических включений (рис. 8б). Прилегающие к очагу участки с межзеренным строением покрыты разветвленными включениями вырожденной эвтектики (рис. 8в). Эти эвтектики образовались в результате растворения сульфидной части комплексных включений или глобулярных сульфидов, расположенных в прилегающей зоне. Образовавшаяся по границам крупных зерен пленка расплава снижает когезивную прочность таких границ и они раскрываются под воздействием усадочных напряжений [9, 10]. Отсутствие признаков деформации на вскрывшихся границах (рис. 8, в) свидетельствует о наличии в расплаве сегрегирующих легкоплавких элементов, ослабляющих эти границы [8, 10]. Периферийная часть дефекта представлена участками вязкого межзеренного разрушения (рис. 8, г), частично образовавшегося при температурах высокого отпуска, частично при вскрытии дефекта перед исследованием.

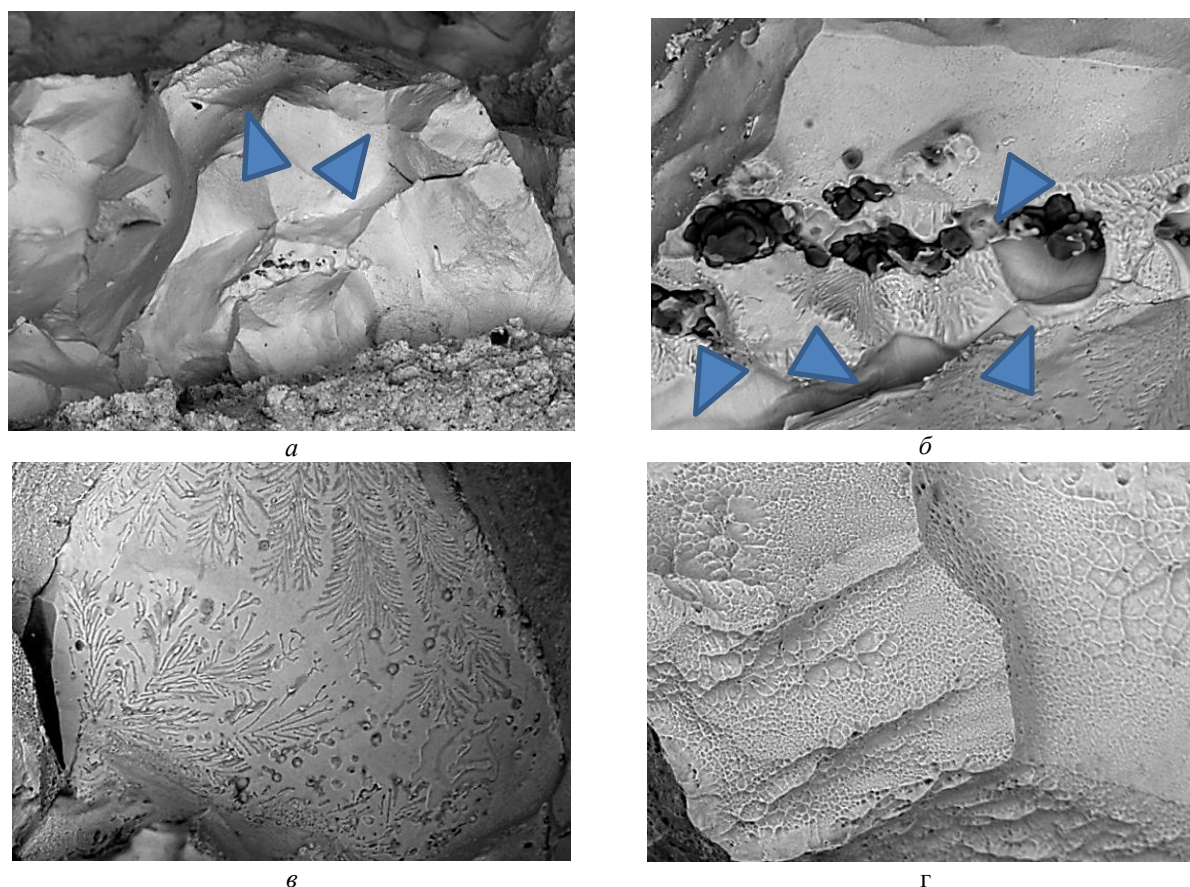


Рисунок 8 – Микрофрактография горячих трещин ликвационного происхождения в ЗТВ у линии сплавления валика, выполненного автоматической сваркой под флюсом при сварке стали 10ГН2МФА:
 а) общий вид горячей трещины, имеющей межзеренное строение (в центре – очаг в виде скопления неметаллических включений; внизу – участок вязкого разрушения металла шва (см. рис. 5а), x180;
 б) очаг горячей трещины (стрелками показаны оплавленные поверхности), x1800;
 в) дендриты вырожденной сульфидной эвтектики на оплавленных границах зерен, x1500;
 г) вязкое межзеренное разрушение на периферии горячей трещины в зоне, указанной стрелками на рисунке 8а, x1800 [Microfractography of hot seams of liquidation origin near the roll fusion line, performed by automatic submerged arc welding when welding 10GN2MFA steel: a) a general view of a hot crack having an intergranular structure (in the center there is a focus in the form of accumulation of non-metallic inclusions; below is a section of viscous fracture of weld metal (see Fig. 5a), x180; b) hot crack area (arrows indicate melted surfaces), x1800; c) dendrites of a degenerate sulfide eutectic at the fused grain boundaries, x1500; d) viscous intergranular fracture at the periphery of a hot crack in the zone indicated by arrows in Figure 8a, x1800]

Еще один фактор, отрицательно влияющий на свариваемость, – наличие примесей легкоплавких составляющих во флюсах, применяемых при автоматической сварке под флюсом (АСФ). В настоящее время нормативная документация (НП-104-18) не предусматривает такого контроля сварочных материалов [11]. В результате, вследствие ликвации при формировании крупных дендритов при сварке, может произойти снижение ударной вязкости из-за междендритного хрупкого разрушения образцов, испытанных после проведения послесварочного отпуска (рис. 9). Это выявляется при микрофрактографических исследованиях на растровом электронном микроскопе.

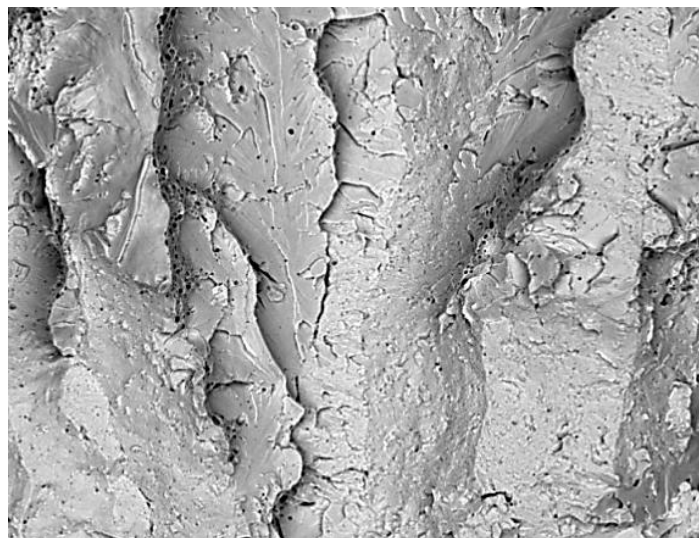


Рисунок 9 – Появление в изломе металла шва междендритного хрупкого разрушения наряду со сколом: РЭМ, x500 [The appearance of the dendritic brittle fracture along with the chip in the fracture of the weld metal: x500]

Существует два способа предотвращения указанного явления. Первый – уменьшение размера первичных дендритов, снижающее концентрацию охрупчивающих примесей с одновременным повышением прочности путем измельчением зерна. Этого можно добиться технологическими приемами, направленными на снижение тепловложения или путем перемешивания металла сварочной ванны, а также модифицированием шва. Еще более радикальные способы – замена применяемого флюса на чистый керамический, применение порошковых проволок с модифицирующими добавками [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баландин, Ю. Ф. Конструкционные материалы АЭС / Ю.Ф. Баландин [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.
2. Бунин, Н. П. Металлография / Н. П. Бунин, А. А. Баранов. – Москва : Металлургия, 1970. – 256 с.
3. Попов, Л. Е. Диаграммы превращений аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана / Л. Е. Попов, А. А. Попова. – Москва : Металлургия, 1991. – 503 с.
4. Колоколов, Е. И. Обеспечение хрупкой прочности листов из стали 10ГН2МФА / Е. И. Колоколов, А. М. Паук // Методы анализа брака при производстве изделий машиностроения: тезисы докладов отраслевой научно-технической конференции. – Волгодонск, 1990. – С. 40-41.
5. Частухин, А. В. Закономерности процессов рекристаллизации аустенита совершенствование технологии контролируемой прокатки микролегированных трубных сталей повышенной хладостойкости : автореферат диссертации кандидата технических наук / А. В. Частухин. – Москва, 2017. – 24 с.
6. Гладштейн, Л. И. Слоистое разрушение сталей и сварных соединений / Л. И. Гладштейн, П. Д. Одесский, И. И. Ведяков. – Москва : Интермет Инжиниринг, 2009. – 256 с.

7. Носов, С. И. Исследование склонности сварных соединений перлитных сталей к растрескиванию при термической обработке для снятия напряжений / С. И. Носов, А. В. Федоров, Ю. В. Нечаев, А. С. Зубченко // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 6. – С. 2-10.
8. Явойский, В. И. Неметаллические включения и свойства стали / В. И. Явойский, Ю. И. Рубенчик, А. П. Окенко. – Москва : Metallurgiya, 1980. – 176 с.
9. Гривняк, И. Свариваемость сталей / И. Гривняк; перевод со словацкого Л. С. Гончаренко; под редакцией Э. Л. Макарова. – Москва : Машиностроение, 1984. – 216 с.
10. Губенко, С. И. Неметаллические включения в стали / С. И. Губенко, С. П. Ошкадеров. – Киев : Наукова Думка, 2016. – 528 с.
11. НП-104-18 Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Москва: Ростехнадзор, 2018. – 260 с.
12. Колоколов, Е. И. Обеспечение конструктивной прочности сварных соединений реакторных установок посредством применения новых сварочных материалов и технологий / Е. И. Колоколов, С. А. Томилин, В. В. Шишов // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 3(24). – С. 77-90.

REFERENCES

- [1] Balandin Yu.F. [and others] Konstrukcionny`e materialy` AE`S [NPP Structural Materials]. Moskva: Energoatomizdat [Moscow: Energoatomizdat,]. 1984. 280 p. (in Russian).
- [2] Bunin N.P., Baranov A.A. Metallografiya [Metallography]. Moskva: Metallurgiya [Moscow: Metallurgy]. 1970. 256 p. (in Russian).
- [3] Popov L.E., Popova A.A. Diagrammy` prevrashhenij austenita v stalyax i beta-rastvora v splavax titana [Diagrams of Austenite Transformations in Steels and Beta-Solution in Titanium Alloys]. Moskva : Metallurgiya [Moscow: Metallurgy]. 1991. 503 p. (in Russian).
- [4] Kolokolov E.I., Pauk A.M. Obespechenie xrupkoj prochnosti listov iz stali 10GN2MFA [Ensuring Brittle Strength of 10GN2MFA Steel Sheets]. Metody` analiza braka pri proizvodstve izdelij mashinostroeniya: tezis` dokladov otraslevoj nauchno-texnicheskoj konferencii [Methods of Analysis of Defects in the Production of Mechanical Engineering Products: Abstracts of the Industry Scientific and Technical Conference]. Volgodonsk. 1990. P. 40-41 (in Russian).
- [5] Chastukhin A.V. Zakonomernosti processov rekristallizacii austenita sovershenstvovanie tehnologii kontrolirovemoj prokatki mikrolegirovanny`x trubny`x stalej pov`shennoj xladostojkosti : avtoreferat dissertacii kandidata texnicheskix nauk [Regularities of Austenite Recrystallization Processes Improvement of Technology of Controlled Rolling of Micro-Alloyed Tube Steels of Increased Cold Resistance: Thesis Abstract of PhD in Engineering]. Moskva [Moscow]. 2017. 24 p. (in Russian).
- [6] Gladstein L.I., Odessky P.D., Vedyakov I.I. Sloistoe razrushenie stalej i svarny`x soedinenij [Layered Destruction of Steels and Welded Joints]. Moskva: Internet Inzhiniring [Moscow: Internet Engineering]. 2009. 256 p. (in Russian).
- [7] Nosov S.I., Fedorov A.V., Nechaev Yu.V., Zubchenko A.S. Issledovanie sklonnosti svarny`x soedinenij perlitny`x stalej k rastreskivaniyu pri termicheskoj obrabotki dlya snyatiya napryazhenij [Investigation of the Tendency of Welded Joints of Pearlite Steels to Cracking during Heat Treatment for Stress Relief]. Tyazheloe mashinostroenie [Heavy Engineering]. 2017. № 6. P. 2-10 (in Russian).
- [8] Yavoysky V.I., Rubenchik Yu.I., Okenko A.P. Nemetallicheskie vklyucheniya i svoystva stali [Nonmetallic Inclusions and Properties of Steel]. Moskva: Metallurgiya [Moscow: Metallurgy]. 1980. 176 p. (in Russian).
- [9] Grivnyak I. Svarivaemost` stalej [Weldability of Steels]. Perevod so slovaczskogo L.S. Goncharenko; pod redakciej E`L. Makarova [Translated from Slovak by L.S. Goncharenko; edited by E.L. Makarov]. Moskva: Mashinostroenie [Moscow: Mashinostroenie]. 1984. 216 p. (in Russian).
- [10] Gubenko S.I., Oshkaderov S.P. Nemetallicheskie vklyucheniya v stali [Nonmetallic Inclusions in Steel]. Kiev: Naukova Dumka. 2016. 528 p. (in Russian).
- [11] NP-104-18 Svarka i naplavka oborudovaniya i truboprovodov atomny`x e`nergeticheskix ustanovok [Welding and Surfacing of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants]. Moskva: Rostekhnadzor [Moscow: Rostekhnadzor]. 2018. 260 p. (in Russian).
- [12] Kolokolov E.I. Tomilin S.A., Shishov V.V. Obespechenie konstruktivnoj prochnosti svarny`x soedinenij reaktorny`x ustanovok posredstvom primeneniya novy`x svarochny`x materialov i tehnologij [Ensuring Structural Strength of Welded Joints of Reactor Plants through the Use of New Welding Materials and Technologies]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2017. № 3(24). P. 77-90 (in Russian).

Liquation Heterogeneity and Weldability of 10GN2MFA Steel

© 2019 E.I. Kolokolov ^{*1}, S.A. Tomilin ^{*2}, M.E. Zhidkov ^{**3}

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

***“Atommash” branch of “AEM Technologies” JSC in Volgodonsk, Volgodonsk, Rostov Region, Russia*

¹ ORCID iD: 0000-0003-2134-3638

e-mail: E.I.Kolokolov@yandex.ru

² ORCID iD: 0000-0001-8661-8386

Wos Researher ID: G-3465-2017

e-mail: SATomilin@mephi.ru

³ e-mail: Zhidkov_ME@atommash.ru

Abstract – The article shows that the segregation heterogeneity inherent in 10GN2MFA steel preforms causes the formation of sections enriched with alloying elements, impurities and nonmetallic inclusions, which leads to a pronounced structural heterogeneity and different tendency to recrystallize during pressure treatment, the formation of quenching structures, and hot cracks in the heat affected zones during the execution of the outer rollers during automatic submerged arc welding. Such behavior can also appears in the weld metal with increased heat input, and other deviations in technology that cause the formation of a large dendrite structure.

Keywords: segregation heterogeneity, steel weldability, thermokinetic diagram, bainite, martensitic-austenitic component, hot microcracks of segregation origin, a tendency to recrystallization during metal forming.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 539.3

**К ВОПРОСУ ОБ ОБОСНОВАННОЙ ФОРМЕ НАСЛЕДСТВЕННОЙ
ВЯЗКОУПРУГОСТИ С ОДНИМ ЯДРОМ ПОЛЗУЧЕСТИ**

© 2019 А.С. Кравчук^{*}, А.И. Кравчук^{**}

^{*}Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

^{**}Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Установлено, что если исходные уравнения наследственной вязкоупругости в развернутом виде содержали два независимых оператора вязкоупругости, соответствующих осевой и поперечной деформациям ползучести, то запись в компонентах девиаторов уравнений состояния будет содержать уже три различных ядра вязкоупругости, определенных композициями исходных двух операторов. Эти три оператора могут совпадать с точностью до вещественного множителя только в случае, когда выполняется гипотеза Арутюняна о постоянстве поперечной деформации (т.е. постоянстве коэффициента Пуассона) во время ползучести. Тела с подобным вязкоупругим поведением принято называть квазиупругими. С учетом результатов исследований, а также того, что до настоящего времени экспериментально устанавливалось только ядро ползучести при осевом растяжении и никогда не устанавливалось ядро поперечной ползучести, в настоящее время решать задачи наследственной ползучести за пределами применения гипотезы Арутюняна не представляется возможным. Также очевидно, что оператор объемной деформации не может быть тождественным, поскольку определяется композицией операторов ползучести. Применение же некоторыми авторами в своих исследованиях гипотезы о тождественности оператора не имеет под собой ни математических, ни физических оснований. В случае нелинейной вязкоупругости (или вязкоупругопластичности), с достаточной для практики точностью следует просто линеаризовать с помощью секущего модуля уравнение состояния и свести эти задачи к уже исследованному в данной статье случаю линейной вязкоупругости.

Ключевые слова: квазиупругость, наследственная вязкоупругость, ядро ползучести, релаксация, гипотеза Арутюняна.

Поступила в редакцию 09.10.2019

После доработки 16.10.2019

Принята к публикации 21.10.2019

Введение

Не смотря на большое число публикаций, посвященных вязкоупругому поведению материалов [1, 2], до настоящего времени в литературе практически отсутствовали попытки систематического исследования самих уравнений наследственной вязкоупругости. Даже статья авторов [3] не в полной мере ответила на вопросы, возникающие при решении задач вязкоупругости.

Авторами [3] ранее уже отмечалось, что гипотеза о чистой упругости объемной деформации вязкоупругого тела [2] выглядит совершенно искусственно. Однако формальных обоснований, кроме физической логики и рассуждений, основанных на суперпозиции, представлено не было.

В данной статье впервые систематически сделан переход от уравнений наследственной вязкоупругости Ржаницына [1] к уравнениям в виде развернутой записи девиаторов. Это позволило установить, что исходя из двух независимых операторов вязкоупругости для продольной и поперечной деформации в развернутой

записи наследственных уравнений состояния исследователь обязан рассмотреть три различные ядра для вязкоупругого поведения материала при переходе к записи этих же уравнений, но в компонентах девиаторов. При этом эти ядра могут совпадать, но только в случае использования гипотезы Арутюняна [4] о постоянстве поперечной деформации, т.е. постоянстве коэффициента Пуассона.

Учитывая, что по испытаниям в настоящее время доступны только данные по ползучести (или релаксации) при осевом растяжении образцов, гипотеза Арутюняна является единственно возможной гипотезой для решения вязкоупругих задач в настоящее время.

Преобразование основных уравнений

Запишем общие уравнения изотропной вязкоупругости [1] с использованием компонент деформаций по Коши в Декартовой системе координат $\{\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}\}$ с использованием операторов:

$$\begin{aligned}\Lambda^{-1} \epsilon_{11} &= \frac{1}{E} \cdot \{\epsilon_{11} - \nu \cdot \Omega \epsilon_{22} + \sigma_{33}\}, \\ \Lambda^{-1} \epsilon_{22} &= \frac{1}{E} \cdot \{\epsilon_{22} - \nu \cdot \Omega \epsilon_{11} + \sigma_{33}\}, \\ \Lambda^{-1} \epsilon_{33} &= \frac{1}{E} \cdot \{\epsilon_{33} - \nu \cdot \Omega \epsilon_{22} + \sigma_{11}\}, \\ \epsilon_{ij} &= \frac{1}{G} \cdot \Lambda \epsilon_{ij}, \quad (i \neq j; i = \overline{1,3}; j = \overline{1,3}) \\ \Lambda \epsilon &= f \epsilon + \int_0^t f \epsilon \cdot \Gamma_E \epsilon \cdot \tau \cdot d\tau, \quad \Lambda^{-1} \epsilon = f \epsilon - \int_0^t f \epsilon \cdot R_E \epsilon \cdot \tau \cdot d\tau, \\ \Omega \epsilon &= f \epsilon + \int_0^t f \epsilon \cdot \Gamma_\nu \epsilon \cdot \tau \cdot d\tau,\end{aligned}\tag{1}$$

где E – модуль упругости;

ν – коэффициент Пуассона;

$\Gamma_E \epsilon \cdot \tau$ – ядро ползучести при простейших нагружениях (растяжении/сжатии или сдвиге);

$R_E \epsilon \cdot \tau$ – резольвентное ядро релаксации при растяжении/сжатии или сдвиге;

$\Gamma_\nu \epsilon \cdot \tau$ – ядро поперечной ползучести образца при одноосном нагружении.

Сложим первые три уравнения системы (1) для нормальных деформаций:

$$\Lambda^{-1} \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} = \frac{1}{E} \cdot \{\epsilon_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} - 2 \cdot \nu \cdot \Omega \epsilon_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}\}.\tag{2}$$

Используя тождественный оператор $I f = f$, уравнение (2) можно переписать:

$$\begin{aligned}\Lambda^{-1} \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33} &= \frac{1}{E} \cdot \{\epsilon_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} - 2 \cdot \nu \cdot \Omega \epsilon_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}\} = \\ &= \frac{1}{E} \cdot \{\epsilon - 2 \cdot \nu \cdot \Omega \epsilon\}_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}.\end{aligned}\tag{3}$$

Разделим на 3 уравнение (2) и вычтем результат из первого уравнения системы (1):

$$\Lambda^{-1} \left[\varepsilon_{11} - \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3} \right] = \frac{1}{E} \mathbf{\Lambda} \circ \mathbf{\Lambda} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega} \left[\sigma_{11} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \right].$$

Далее по аналогии для всех нормальных деформаций из системы (1) можно получить:

$$\varepsilon_{ii} - \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3} = \frac{1}{E} \Lambda \circ \mathbf{\Lambda} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega} \left[\sigma_{ii} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \right], \mathbf{\Lambda} = \overline{1,3} \quad (4)$$

Дополняя уравнения (3) и (4) уравнениями для сдвиговых деформаций, выводим полную систему уравнений состояния для наследственной вязкоупругости в развернутой записи компонентов девиаторов:

$$\varepsilon_{ii} - \frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}{3} = \frac{1}{E} \Lambda \circ \mathbf{\Lambda} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega} \left[\sigma_{ii} - \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \right] \mathbf{\Lambda} = \overline{1,3}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{G} \cdot \Lambda \mathbf{\Lambda}_{ij}, \quad (i \neq j; i = \overline{1,3}; j = \overline{1,3}), \quad (6)$$

$$\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = \frac{1}{E} \cdot \Lambda \circ \mathbf{\Lambda} - 2 \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega} \mathbf{\Lambda}_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}. \quad (7)$$

Выводы

Очевидно, что если уравнения (1) содержали два независимых оператора вязкоупругости с двумя различными ядрами $\Gamma_E \mathbf{\Lambda} \tau$ и $\Gamma_v \mathbf{\Lambda} \tau$, то явная запись в девиаторах уравнений состояния (5)-(7) будет содержать уже три различных ядра вязкоупругости, соответствующих различным операторам $\Lambda \circ \mathbf{\Lambda} + \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega}$, Λ , $\Lambda \circ \mathbf{\Lambda} - 2 \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega}$. Эти три оператора могут совпадать с точностью до вещественного множителя только в случае когда оператор Ω является тождественным, т.е. тогда когда выполняется гипотеза Арутюняна [4] о постоянстве поперечной деформации (т.е. постоянстве коэффициента Пуассона) во время ползучести. Тела с подобным вязкоупругим поведением принято называть квазиупругими [1].

С учетом всего сказанного, а также того, что до настоящего времени экспериментально устанавливалось только ядро $\Gamma_E \mathbf{\Lambda} \tau$ оператора Λ (или резольвентное ему ядро $R_E \mathbf{\Lambda} \tau$) и никогда не устанавливалось ядро поперечной ползучести $\Gamma_v \mathbf{\Lambda} \tau$, в настоящее время решать задачи наследственной ползучести за пределами применения гипотезы Арутюняна [4] не представляется возможным.

Также очевидно, что оператор $\Lambda \circ \mathbf{\Lambda} - 2 \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega}$ в (7) не может быть с тождественным с точностью до мультипликативной константы, поскольку и оператор Λ , и оператор $\mathbf{\Lambda} - 2 \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega}$ никогда не могут быть взаимобратными (Λ и Ω – операторы ползучести).

Применение же некоторыми авторами [2] в своих исследованиях гипотезы о тождественности оператора $\Lambda \circ \mathbf{\Lambda} - 2 \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{\Omega}$ не имеет под собой ни математических, ни физических оснований.

Из работы авторов [3] видно, что если решать краевую задачу вязкоупругости для невесомого квазиупругого (гипотеза Арутюняна) тела при постоянных граничных

условиях по перемещениям, исследователь получит чистую релаксацию в твердом теле без ползучести, а при решении краевой задачи с постоянными краевыми напряжениями будет рассматриваться случай чистой ползучести без релаксации.

Так, например, если рассмотреть осесимметричную задачу Буссинеска о воздействии постоянной вертикальной сосредоточенной силы на упругое полупространство, которое дает решение для вертикальных перемещений поверхности полупространства в виде функции $w(r, t)$, то решение задачи наследственной квазиупругости будет определяться выражением:

$$w(r, t) = \left(1 + \int_0^t \Gamma_E(\tau) d\tau \right).$$

Исключение составляют только контактные задачи вязкоупругости с изменяющейся областью контакта [4-6]. Из-за изменяющейся области контакта в этих задачах будет присутствовать и ползучесть, и релаксация.

В связи с этим полученные другими авторами [2, 7-9] решения для вязкоупругости при использовании гипотезы тождественности с точностью до коммутативной константы оператора $\Lambda \circ (-2 \cdot \nu \cdot \Omega)$, приводящее к наличию обоих процессов и релаксации, и ползучести [2, 10, 11], даже при постоянных краевых условиях нельзя считать достоверными.

Более того, очевидно, что в случае нелинейной вязкоупругости (или вязкоупругопластичности [2, 7, 9, 11]), с достаточной для практики точностью следует просто линеаризовать, аналогично [12] с помощью секущего модуля уравнение состояния и свести эти задачи к уже исследованному в данной статье случаю линейной вязкоупругости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржаницын, А. Р. Теория ползучести / А. Р. Ржаницын. – Москва : Стройиздат, 1968. – 418 с.
2. Горшков, А. Г. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 576 с.
3. Кравчук, А. С. Общие уравнения пространственной и плоской задач механики твердого тела в случае использования модели квазиупругого поведения изотропного вязкоупругого материала / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук // Машиностроение : сетевой электронный научный журнал. – 2017. – Том 5, №1. – С. 3-10. – URL : <http://www.indust-engineering.ru/issues/2017/2017-1.pdf> (дата обращения: 21.09.2019)
4. Кравчук, А. С. Механика контактного взаимодействия / А. С. Кравчук, А. В. Чигарев. – Минск : Технопринт, 2000. – 196 с.
5. Кравчук, А. С. Простейшая модель индентирования криволинейных биологических объектов конечных размеров / А. С. Кравчук, С. А. Чижик, А. И. Кравчук // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – № 4. – URL: <http://apriori-journal.ru/seria2/4-2014/Kravchuk-Chizhik-Kravchuk.pdf> (дата обращения: 21.09.2019)
6. Кравчук, А. С. Прикладные контактные задачи для обобщенной стержневой модели покрытия / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук. – Санкт-Петербург : Научные технологии, 2019. – 221 с. – URL: http://publishing.intelgr.com/archive/core_model.pdf (дата обращения: 21.09.2019)
7. Старовойтов, Э. И. Вязкоупругопластические слоистые пластины и оболочки / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2002. – 343 с.
8. Плескачевский, Ю. М. Деформирование металлополимерных систем / Ю. М. Плескачевский, Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая. – Минск : Беларуская навука, 2004. – 342 с.
9. Журавков, М. А. Механика сплошных сред. Теория упругости и пластичности / М. А. Журавков, Э. И. Старовойтов. – Минск : БГУ, 2011. – 543 с.
10. Плескачевский, Ю. М. Механика трехслойных стержней и пластин, связанных с упругим основанием / Ю. М. Плескачевский, Э. И. Старовойтов, Д. В. Леоненко – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 560 с.

11. Starovoitov, E.I. Nagiyev, F.B. Foundations of the theory of elasticity, plasticity and viscoelasticity. Apple Academic Press, Toronto, New Jersey, Canada, USA, 2012. – 346 p.
12. Кравчук, А. С. Решение физически нелинейной задачи Ляме для толстостенного цилиндра / А. С. Кравчук, А. И. Кравчук, С. Н. Лопатин // Наука и бизнес: пути развития. – 2018. – № 5(83). – С. 11-16.

REFERENCES

- [1] Rzhantsyn A.R. Teoriya polzuchesti [Theory of Creep]. Moskva: Strojizdat [Moscow: Stroyizdat]. 1968. 418 p. (in Russian).
- [2] Gorshkov A.G. Starovoitov E.I., Yarovaya A.V. Mexanika sloisty`x vyazkoupругoplasticheskix e`lementov konstrukcij [Mechanics of Layered Viscoelastic Structural Elements]. Moskva: FIZMATLIT [Moscow: FIZMATLIT]. 2006. 576 p. (in Russian).
- [3] Kravchuk A.S., Kravchuk A.I. Obshhie uravneniya prostranstvennoj i ploskoj zadach mexaniki tverdogo tela v sluchae ispol'zovaniya modeli kvaziupругogo povedeniya izotropnogo vyazkoupругogo materiala [General Equations of Spatial and Plane Problems of Solid Mechanics in the Case of Using a Model of Quasi-Elastic Behavior of an Isotropic Viscoelastic Material]. Mashinostroenie: setevoy e`lektronny`j nauchny`j zhurnal [Russian Internet Journal of Industrial Engineering]. 2017. V 5, № 1. P. 3-10. URL : <http://www.indust-engineering.ru/issues/2017/2017-1.pdf> (in Russian).
- [4] Kravchuk A.S., Chigarev A.V. Mexanika kontaktnogo vzaimodejstviya [Mechanics of Contact Interaction]. Minsk : Texnoprint [Minsk: Technoprint]. 2000. 196 p.
- [5] Kravchuk A.S., Chizhik S.A., Kravchuk A.I. Prostejshaya model' indentirovaniya krivolinejnyx biologicheskix ob"ektov konechnyx razmerov [The Simplest Model of Indentation of Curvilinear Biological Objects of Finite Dimensions]. APRIORI. Seriya: Estestvennye i texnicheskie nauki [APRIORI. Series: Natural and Technical Sciences]. 2014. № 4. URL: <http://apriori-journal.ru/seria2/4-2014/Kravchuk-Chizhik-Kravchuk.pdf> (in Russian).
- [6] Kravchuk A.S., Kravchuk A.I. Prikladnye kontaktnye zadachi dlya obobshhennoj sterzhnevoj modeli pokrytiya [Applied Contact Problems for a Generalized Rod Model of Coverage] Sankt-Peterburg: Naukoemkie tehnologii [Saint Petersburg: High Technologies]. 2019. 221 p. URL: http://publishing.intelgr.com/archive/core_model.pdf (in Russian).
- [7] Starovojtov E. I. Vyazkoupругoplasticheskie sloistye plastiny i obolochki [Viscoelastic Plastic Laminated Plates and Shells] Gomel': BelGUT [Gomel: BelGUT]. 2002. 343 p. (in Russian).
- [8] Pleskachevskij Yu.M., Starovojtov E.I., Yarovaya A.V. Deformirovanie metallopolimernyx sistem [Deformation of Metal-Polymer Systems]. Minsk: Belaruskaya navuka [Minsk: Belarusian Science]. 2004. 342 p. (in Russian).
- [9] Zhuravkov M.A., Starovotov E.I. Mexanika sploshnyx sred. Teoriya uprugosti i plastichnosti [Continuum Mechanics. Theory of Elasticity and Plasticity]. Minsk: BGU [Minsk: BSU]. 2011. 543 p. (in Russian).
- [10] Pleskachevskij Yu.M., Starovojtov E.I., Leonenko D.V. Mexanika trexslajnyx sterzhnej i plastin, svyazannyx s uprugim osnovaniem [Mechanics of Three-Layer Rods and Plates Associated with an Elastic Base]. Moskva: FIZMATLIT [Moscow: FIZMATLIT]. 2011. 560 p. (in Russian).
- [11] Starovoitov E.I., Nagiyev F.B. Foundations of the Theory of Elasticity, Plasticity and Viscoelasticity. Apple Academic Press, Toronto, New Jersey, Canada, USA, 2012. 346 p.
- [12] Kravchuk A.S., Kravchuk A.I., Lopatin S.N. Reshenie fizicheski nelinejnoj zadachi Lyame dlya tolstostennogo cilindra [Solution of the Physically Nonlinear Lyame Problem for a Thick-Walled Cylinder]. Nauka i biznes: puti razvitiya [Science and Business: Ways of Development]. 2018. № 5(83). P. 11-16 (in Russian).

To the Issue of the Valid Form of Hereditary Viscoelasticity with One Creep Kernel

A.S. Kravchuk^{*1}, A.I. Kravchuk^{**2}

^{*}Polytechnic Research Institute, a branch of the Belarusian National Technical University, Independence Avenue, 65, Minsk, Republic of Belarus 220013

^{**}Belarusian State University, Independence Avenue, 4, Minsk, Republic of Belarus 220030

¹ ORCID iD: 0000-0002-4730-7769

Wos Researcher ID: AAB-7774-2019

e-mail: ask_belarus@inbox.ru

² ORCID iD: 0000-0002-6105-4200

Wos Researcher ID: AAB-7880-2019

e-mail: anzhelika.kravchuk@gmail.com

Abstract – It is established that if the original equations of hereditary viscoelasticity in the traditional form contained two independent viscoelastic operators corresponding to the axial and transverse creep strains, then the record in the components of the deviators of the state equations will already contain three different viscoelastic kernels defined by the compositions of the original two operators. These three operators can coincide up to a real factor only when the Harutyunyan hypothesis about the constancy of transverse deformation (i.e., the constancy of the Poisson's ratio) during creep is fulfilled. Body with a similar viscoelastic behavior are called quasi-elastic. Taking into account the results of studies, as well as the fact that until now only the creep kernel has been experimentally established under axial tension and the transverse creep kernel has never been defined, it is currently not possible to solve the problems of hereditary creep beyond the application of the Harutyunyan hypothesis. It is also obvious that the volumetric strain operator cannot be identical, since it is determined by the composition of the creep operators. The application by some authors in their studies of the hypothesis of the identity of the operator has no mathematical or physical grounds. In the case of nonlinear viscoelasticity (or viscoelastic plasticity), with sufficient accuracy for practice, one should simply linearize the equation of state using the secant module and reduce these problems to the case of linear viscoelasticity already studied in this article.

Keywords: Quasi-elasticity, hereditary viscoelasticity, creep core, relaxation, Harutyunyan hypothesis.

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

УДК 004.94

**МОДЕЛЬ ДЛЯ ТЕПЛОВОГО РАСЧЁТА ФОРМИРОВАНИЯ
ВИРТУАЛЬНОГО СВАРНОГО ШВА**

© 2019 В.В. Кривин, В.Я. Шпицер, В.А. Толстов, В.Т. Саункин

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

В статье рассматривается разработка модифицированного метода конечных элементов для расчётов параметров виртуального процесса сварки и геометрических характеристик виртуального сварного соединения в режиме реального времени. Показано представление сварного соединения в виде массива вертикальных конечных элементов квадратного сечения с подвижной горизонтальной границей твёрдой и расплавленной частей. В результате разработки получены возможности для визуализации сварного соединения и расчёта его параметров.

Ключевые слова: математическое моделирование, сварочный процесс, тепловая модель, метод конечных элементов, модификация метода конечных элементов, тренажёр ручной дуговой сварки, визуализация сварного шва, оценка параметров шва, обработка в реальном времени, расчёт тепловых потоков.

Поступила в редакцию 14.10.2019

После доработки 29.10.2019

Принята к публикации 13.11.2019

В настоящее время обучение навыкам ведения процесса ручной дуговой сварки (РДС) осуществляется выполнением контрольных сварных соединений (КСС). Качество КСС проверяется после завершения процесса с помощью различных разрушающих и не разрушающих методов контроля.

Основными проблемами обучения сварщика РДС на реальном процессе являются: трудоемкость, высокая цена оборудования для некоторых методов контроля и невозможность контроля процесса в реальном времени.

Одним из решений проблемы является применение, по крайней мере, для некоторых этапов обучения сварщиков тренажёрных систем, которые позволяют выработать первоначальные навыки при оперативной оценке качества ведения сварки. Современные информационные технологии и средства виртуальной реальности позволяют создавать тренажёры с широкими возможностями. Одной из таких систем является мультимедийный тренажёр для обучения РДС, разрабатываемый на кафедре «Информационные и управляющие системы» Волгодонского инженерно-технического института НИЯУ МИФИ [1, 2].

Существенным преимуществом такого способа обучения является возможность неоднократно воспроизвести виртуальный процесс сварки и подвергнуть всестороннему анализу данные о процессе (характеристики движений торца электрода относительно разделки, ток и напряжение сварки, параметры проплавления в любом сечении виртуального шва и др.) [3, 4]. Форма выбора параметров упражнения показана на рисунке 1.

Имитация сварочного процесса основана на числовой модели распределения тепла, плавления металла и формирования сварного шва. Входными данными модели

являются перемещения имитатора держателя электрода, регистрируемые устройством координатного слежения (УКС) NaturalPoint TrackIR.

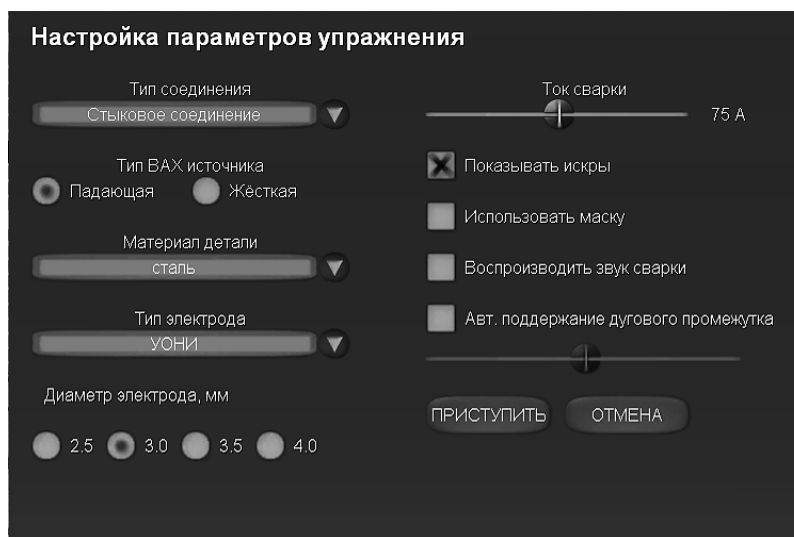


Рисунок 1 – Настройка параметров упражнения [Exercise setting up]

С помощью УКС осуществляется регистрация координат держателя электрода, по которым рассчитываются координаты конца электрода и углы его наклона. Координаты подаются в ЭВМ, и по ним рассчитывается длина дуги, по которой определяются ток сварки и напряжение на дуге [5, 6]. Выполнение упражнения начинается после нажатия кнопки «Приступить». Точка просмотра устанавливается над центром детали, направление – ортогонально детали. На рисунке 2 показано, как формируется виртуальный сварной шов.

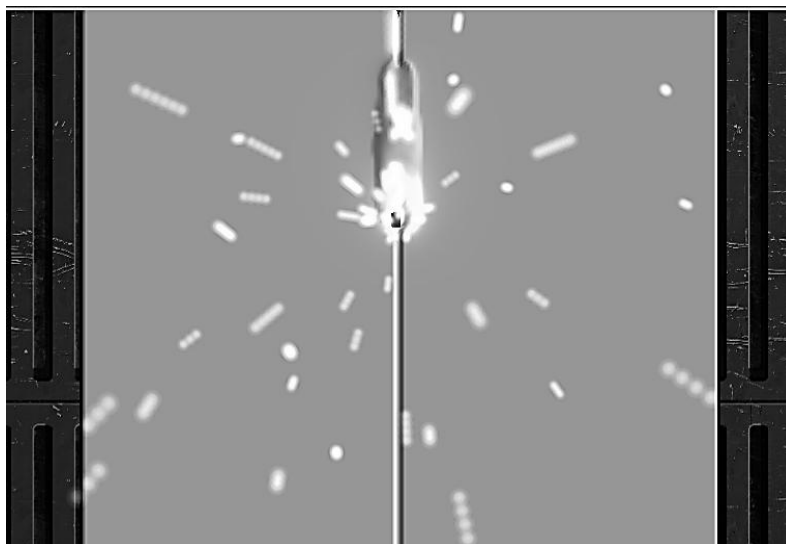


Рисунок 2 – Формирование виртуального шва [Virtual joint modeling]

Особенностью тренажера является возможность просмотреть повторно весь сеанс сварки, причем можно изменять точку зрения (положение камеры), замедлять, ускорять и останавливать воспроизведение. Есть также возможность видеть разрез сварочной ванны, в том числе – движущийся вместе с камерой. На разрезе расплав и твердый металл представлены прозрачными, непрозрачны только границы расплава – верхняя и нижняя, как показано на рисунке 3. Это позволяет наблюдать за формированием, как поверхности шва, так и его корня.

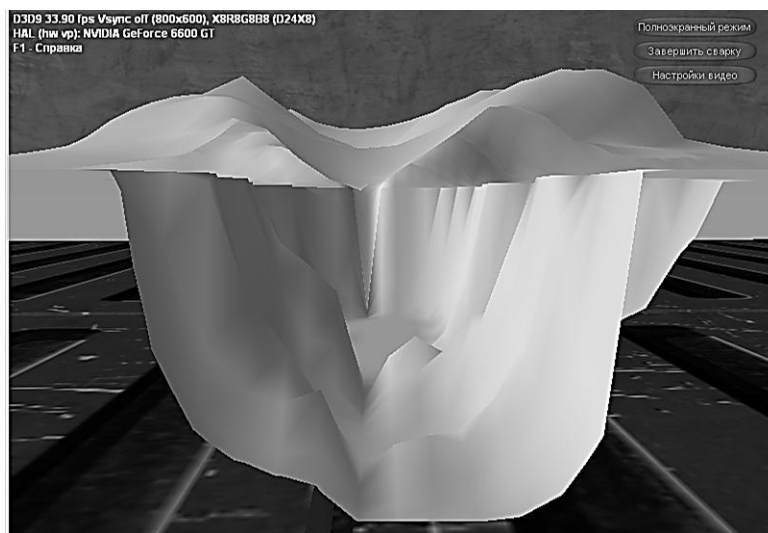


Рисунок 3 – Поверхности виртуального шва [Surfaces of virtual joint]

Для решения тепловой задачи в реальном времени используется метод конечных элементов (МКЭ) [7]. Рассмотрим подробнее особенности используемой в тренажере модели. В текущей версии рассматривается горизонтальное расположение плоской заготовки (плиты). Конечные элементы (КЭ) в модели – это вертикальные стержни, на которые плита разбита квадратной сеткой, определенной на ее поверхности.

В отличие от стандартного МКЭ в конечных элементах учитываются три слоя с различной температурой: верхняя и нижняя поверхности, и поверхность плавления/кристаллизации (рис. 4) [8, 9, 10].

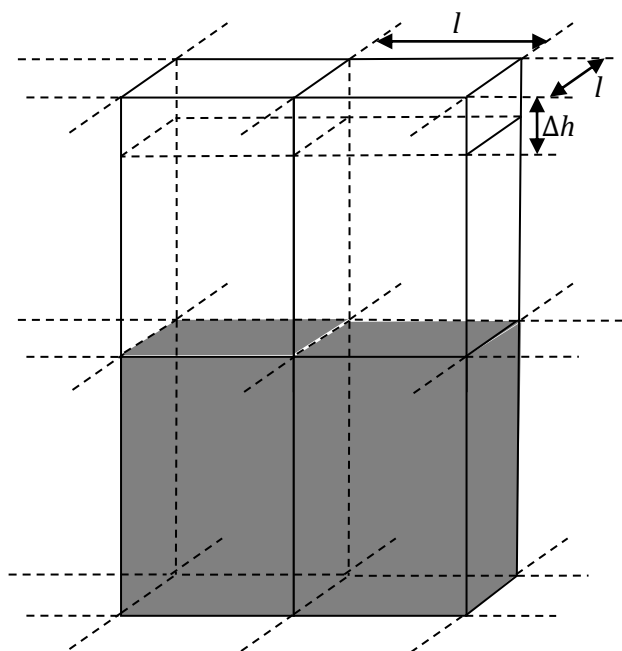


Рисунок 4 – Горизонтальная передача тепла между конечными элементами [Horizontal thermal transmission between finite elements]

Между слоями распределение температуры аппроксимируется линейно. Отсюда количество тепла (Дж), например, в расплавленной и твердой частях стержня равно:

$$Q_p = c\rho_p l^2 h_p \left(\Theta_p + \Theta_{nl} \right) / 2, \quad (1)$$

$$Q_{ms} = c\rho_{ms} l^2 h_{ms} \left(\Theta_{ms} + \Theta_{nl} \right) / 2, \quad (2)$$

где Q_p и Q_{mv} – количество тепла в расплаве и твердой части стержня (Дж);
 $c\rho_p$ и $c\rho_{mv}$ – объёмная теплоёмкость расплава и твердой части стержня (Дж/(м³·°K));
 l – размер клетки сетки (м);
 h_p и h_{mv} – высоты расплава и твердой части стержня соответственно (м);
 Θ_p , Θ_{mv} и Θ_{nl} – температуры верхнего, нижнего и среднего слоев соответственно (°K).

В частном случае полного расплавления/кристаллизации нижние/верхние два слоя сливаются.

Передача тепла между элементами моделируется в два этапа: горизонтальная передача (между элементами соответствующих слоев соседних стержней) и вертикальная (внутри стержней) [11, 12]. Рассмотрим горизонтальную передачу тепла:

$$\Delta Q = \Delta t \lambda_p S \frac{\Delta \Theta}{l}, \quad (3)$$

где ΔQ – количество переданного тепла (Дж);
 Δt – прошедшее время (сек);
 λ_p – теплопроводность расплава (Вт/(м·°K));
 S – площадь сечения, через которое передается тепло (м²);
 $\Delta \Theta$ – разница температур между соседними КЭ (°K).

В тонком слое толщиной Δh количество переданного тепла от стержня 1 к стержню 2 равно:

$$\Delta Q_{12p} = \Delta t \lambda_p l \Delta h \frac{\Theta_{1p} - \Theta_{2p}}{l}, \quad (4)$$

где ΔQ_{12} – тепло переданное от стержня 1 к стержню 2 (Дж);
 Δh – толщина рассматриваемого слоя (м);
 Θ_{1p} – температура верхней поверхности расплава в стержне 1 (°C);
 Θ_{2p} – температура верхней поверхности расплава в стержне 2 (°C).

Тепло, полученное стержнем 2 от всех четырех, окружающих его:

$$\Delta Q_{2p} = \Delta t \lambda_p l \Delta h \frac{\sum \Theta_p - 4\Theta_{2p}}{l}, \quad (5)$$

где $\sum \Theta_p$ – сумма температур в соответственном слое четырех соседних стержней (°C).

Соответствующее изменение температуры (°C) в верхнем слое стержня 2:

$$\Delta \Theta_{2p} = \frac{l}{c\rho_p l^2 \Delta h} \Delta t \lambda_p l \Delta h \frac{\sum \Theta_p - \Theta_{2p}}{l} = \Delta t \lambda_p \frac{\sum \Theta_p - \Theta_{2p}}{l^2 c\rho_p}. \quad (6)$$

По уравнениям (3-6) определяется изменение температуры и в других двух слоях, а поскольку температуры между слоями линейно аппроксимированы, то и во всех точках между ними. Уравнение (6) линейно, поэтому линейное изменение температуры между слоями сохраняется. Следует учитывать, что температура среднего слоя в случае полного расплавления/кристаллизации, т.е. при слиянии слоёв, отличается от температуры плавления.

Рассмотрим вертикальную передачу тепла (рис. 5).

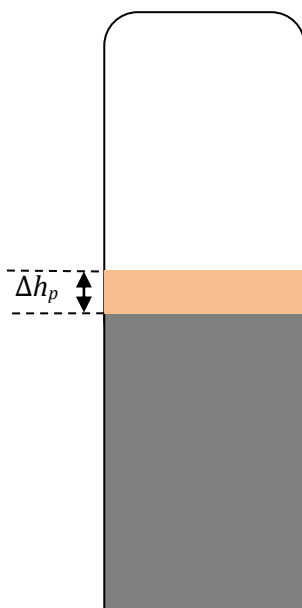


Рисунок 5 – Вертикальная передача тепла [Vertical thermal transmission]

В этой ситуации надо учесть плавление/кристаллизацию металла, т.е. движение границы расплава. Запишем условия баланса тепла на границе кристаллизации:

$$\Delta Q_p + \Delta Q_{nl} + \Delta Q_{ms} = 0. \quad (7)$$

Градиенты на границе определим из линейной аппроксимации распределения температур между слоями:

$$\Delta Q_p = \Delta t \lambda_p S (\Theta_p - \Theta_{nl}) / h_p, \quad (8)$$

$$\Delta Q_{ms} = \Delta t \lambda_{ms} S (\Theta_{ms} - \Theta_{nl}) / h_{ms}, \quad (9)$$

$$\Delta Q_{nl} = -\mu_{nl} S \Delta h_p, \quad (10)$$

где μ_{nl} – удельная теплота плавления (дж/м³).

Решая систему, получаем:

$$\Delta t \lambda_p S (\Theta_p - \Theta_{nl}) / h_p - c_{nl} S \Delta h_p + \Delta t \lambda_{ms} S (\Theta_{ms} - \Theta_{nl}) / h_{ms} = 0,$$

$$\Delta h_p = -\Delta t \frac{\lambda_p (\Theta_p - \Theta_{nl}) / h_p + \lambda_{ms} (\Theta_{ms} - \Theta_{nl}) / h_{ms}}{c_{nl}}.$$

Зная $\Delta Q_p, \Delta Q_{nl}, \Delta Q_{ms}$ и Δh_p , подставляем новые значения Q_p, Q_{ms}, h_{nd} и h_p в (1-2) и находим новые Θ_p, Θ_{ms} . В случае полного расплавления/кристаллизации решение аналогично, но в качестве среднего слоя выбирается геометрический центр стержня. В настоящей статье не рассмотрены реализованные в текущей версии тренажера аспекты стержневой трехслойной модели, связанные с гидродинамикой сварочной ванны.

Предложенная упрощенная модель позволяет рассчитывать распределение тепла в заготовке в реальном времени и обеспечивает реалистичное изображение формирующегося шва. В режиме последующего анализа показывается подвижный

разрез шва с имитацией прозрачного расплава, что позволяет как преподавателю, так и ученику наблюдать появление дефектов соединения или их отсутствие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мультимедийный тренажер для ручной дуговой сварки / В. В. Кривин [др.] // Сварочное производство. – 2010. – № 5. – С. 57-59.
2. Компьютерный тренажер для обучения навыкам сварки при изготовлении и монтаже конструкций энергетического машиностроения. Отчет НИОКР (промежуточный) : 50.41.25 / НИЯУ МИФИ; руководитель А. А. Тямалов; исполнители В. В. Кривин [и др.] – Волгоград, 2014. – 176 с. – № ГР 114102740077. – инв. № 08.03-08.01-01.
3. Моделирование сигналов параметров виртуального сварочного процесса / В. В. Кривин [др.] // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». – 2014. – Т. 3, № 1. – С. 53-57.
4. Сысоев, Ю. С. Моделирование плавления электрода при разработке компьютерных 3D-тренажеров для обучения ручной дуговой сварке / Ю. С. Сысоев, В. В. Кривин, В. А. Толстов // Сварочное производство. – 2017. – № 10 – С. 12-17.
5. Использование устройства координатного слежения Trackir для измерения координат электрода в мультимедийном тренажере сварщика РДС / В. В. Кривин [др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 3(12). – С. 73-77.
6. Метрологический анализ устройства координатного слежения по его математической модели / В. В. Кривин [др.] // Наука XXI века : сборник научных статей по итогам Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12 апреля 2016 г. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 68-70.
7. Уточненная математическая модель сварного шва для мультимедийного тренажера сварщика / М. Ю. Виниченко [и др.] // Сварочное производство. – 2015. – № 11. – С. 17-20.
8. Виниченко, М. Ю. Проверка адекватности тепловой модели стержневых конечных элементов для расчета виртуального шва / М. Ю. Виниченко, В. А. Толстов, В. В. Кривин // Динамика научных исследований: Материалы VII Международной научно-практической конференции. Перемышль, 5-17 июля 2011 г. – Польша, Перемышль : Наука и исследования, 2011. – С. 31-34.
9. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций / С. А. Куркин [и др.] – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 454 с.
10. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар ; перевод с английского. – Москва : Энергоатомиздат, 1984 – 152 с.
11. Трофимова, Т. И. Курс физики. 11-е изд. / Т. И. Трофимова. – Москва : Академия, 2006. – 560 с.
12. Кривин, В. В. Расчёт параметров виртуального сварного шва в тренажере сварщика / В. В. Кривин, М. Ю. Виниченко, В. А. Толстов // Безопасность АЭС и подготовка кадров : тезисы докладов XII Международной конференции (Обнинск, 4-7 окт. 2011 г.). – Обнинск, 2011. – С. 110-112.

REFERENCES

- [1] Krivin V.V., Sas A.V., I.O. Ishigov et al. Mul'timedijny`j trenazher dlya ruchnoj dugovoj svarki [Multimedia Simulator for Manual Arc Welding]. Moscow. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 2010. №5. P. 57-59 (in Russian).
- [2] Tyamalov A.A. et al. Komp'yuterny`j trenazher dlya obucheniya navy`kam svarki pri izgotovlenii i montazhe konstrukcij e`nergeticheskogo mashinostroeniya. Otchet o NIOKP (promezhutoch.) [Computer Training System for Manual Arc Welding Skills Used in Energetic Machine Production And Mounting. The Interim Report about Scientific Investigation and Empirical Construction]. Grant number: 114102740077. MEFPhI. Volgograd. 2014. 176 p. (in Russian).
- [3] Krivin V.V., Vinichenko S.M., Tolstov V.A. et al. Modelirovanie signalov parametrov virtual'nogo svarochnogo processa [Modeling of Parametric Signals of Virtual Welding Process]. Moscow. Vestnik natsionalnogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI». 2014. V.3. №1. P. 53-57 (in Russian).
- [4] Sysoev Yu.S., Krivin V.V., Tolstov V.A. Modelirovanie plavleniya e`lektroda pri razrabotke komp'yuterny`x 3D-trenazherov dlya obucheniya ruchnoj dugovoj svarke [The Modeling of Node Molding during Development of 3D Computerized Simulators for Manual Arc Welding Training]. Moscow. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 2017. №10. P. 12-17 (in Russian).
- [5] Krivin V.V., Ishigov I.O., Tolstov V.A. Ispol'zovanie ustrojstva koordinatnogo slezheniya Trackir dlya izmereniya koordinat e`lektroda v mul'timedijnom trenazhyore svarshhika RDS [The TRACKIR Coordinate Tracking Device Usage For Measurement Of Electrode Coordinates In The

- Multimedia Training System For Manual Arc Welding]. [Global Nuclear Safety]. 2014. №3. p.73-77 (in Russian).
- [6] Krivin V.V., Ishigov I.O., Tolstov V.A. et al. Metrologicheskij analiz ustrojstva koordinatnogo slezheniya po ego matematicheskoj modeli [The Metrological Analysis of Coordinate Tracking Device throw it's Mathematical Model] [Works of the Science-Practical Conference «Science of XXI Centuty»]. St. Petersburg. 2016. P. 68-70 (in Russian).
- [7] Vinichenko M.Yu., Ishigov I.O., Krivin V.V. et al. Utochnennaya matematicheskaya model` svarnogo shva dlya mul`timedijnogo trenazhera svarshhika [The Refined Welding Joint Model for Multimedia Training System]. Moscow. Svarochnoe proizvodstvo [Welding Production]. 2015. №11. P. 17-20 (in Russian).
- [8] Vinichenko M.Yu., Ishigov I.O., Krivin V.V. Proverka adekvatnosti teplovoj modeli sterzhnevny`x konechny`x e`lementov dlya rascheta virtual`nogo shva [The Adequacy Check of Finite Element Model for Welding Joint Calculation] [Works of the VII International Science-Practical Conference «Dynamics of Scientific Investigations»]. Poland. Przemysl. Nauka i Studia [Science and Investigations]. 2011. P. 31-34 (in Russian).
- [9] Kurkin S.A., Hovov M.V., Aksyonov Yu.N. et al. Komp`yuternoe proektirovanie i podgotovka proizvodstva svarny`x konstrukcij [Computer Development and Preparation for the Production of Welded Constructions]. Moscow : Izdatel'stvo MGTU im N.E`. Bauman [Bauman Moscow State Technical University Publishing]. 2002. 454 p. (in Russian).
- [10] Patankar S. Chislenny`e metody` resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti [Numerical Method of Solving Heat Transfers and Fluid Dynamics]. Moscow. E`nergoatomizdat [Atom Energy Publishing], 1984, 152 p. (in Russian).
- [11] Trofimova, T.I. Kurs fiziki. 11-e izd. [Physics Course. 11-th edition]. Moscow. Akademiya [Academy]. 2006. 560 p. (in Russian).
- [12] Krivin V.V., Vinichenko M.Yu., Tolstov V.A. Raschyot parametrov virtual`nogo svarnogo shva v trenazhyore svarshhika [The Calculation of Virtual Welding Joint in Multimedia Training System] [Works of the XII International Conference «Nuclear Power Plant Safety and Personnel Training»]. Obninsk. 2011. P. 110-112 (in Russian).

The Model for Thermal Calculation of Virtual Welding Joint Formation

V.V. Krivin¹, V.Y. Shpitser², V.A. Tolstov³, V.T. Saunkin⁴

*Volgodonsk Engineering-Technical Institute – Branch of NRNU «MEPhI»,
Lenina street, 73/94, Volgodonsk, Russia 347360*

¹ORCID: 0000-0003-0903-0786

WoS ResearcherID: E-2267-2018

e-mail: vvkrivin@mephi.ru

²ORCID: 0000-0002-5051-5091

e-mail: shpitser@mephi.ru

³ORCID: 0000-0001-7144-5195

WoS ResearcherID: F-1032-2017

e-mail: v-tolstov-2017@mail.ru

⁴ORCID: 0000-0002-3462-4853

WoS ResearcherID: F-3352-2017

e-mail: saunkin@mail.ru

Abstract – The article deals with development of modified finite element method for real-time calculations of virtual welding parameters and virtual welding joint geometric properties. The representation of welding joint as array of square-based columns, with movable horizontal separator between solid and molded parts, is shown. The development causes the result as opportunities for visualization of welding joint and its calculations.

Keywords: mathematical modeling, welding process, thermal model, finite elements method, modified finite elements method, manual arc welding simulator, welding joint visualization, estimation of joint parameters, real-time processing, thermal flow calculation.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.52

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ КВ В БЫСТРЫХ
РЕАКТОРАХ С МОХ-ТОПЛИВОМ СТРЕМЯСЬ К
МИНИМАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ НПЭР**

© 2019 А.К. Арутюнян, С.Б. Выговский, А.Г. Хачатрян

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В данной работе приведены результаты численных исследований возможности увеличения безопасности путем применения разных видов топлива и топливного сочетания для реакторов БН с натриевым теплоносителем. Целью данной работы является исследование и обнаружение топлива или топливного сочетания с наилучшими технико-экономическими показателями и условиями безопасности для реакторной установки БН-800, которое позволит улучшить не только экономические показатели, но и эффективность всего предреакторного цикла. Так как со временем во всем мире обостряются проблемы, связанные с уменьшением количества ^{235}U , которые приводят к повышению его цены и увеличению количества, накопленного Pu , который в начальном времени был получен в рамках военной промышленности. На сегодняшний день от переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) ВВЭР и РБМК уже возникает необходимость искать пути, которые будут направлены на компенсирование этих явлений с приоритетом надежной и безопасной эксплуатации ядерной установки. Как показатель надежной и безопасной эксплуатации ЯЭУ, в рассмотренном случае является НПЭР (Натриевый Пустотный Эффект Реактивности). Получение высоких значений этой величины приводит к снижению безопасной эксплуатации ЯЭУ и заставляет искать не только пути повышения КВ, но и пути, которые приведут к получению минимальных значений НПЭР с максимальным КВ. В расчетах, направленных на уменьшение НПЭР минимальным значением КВ принято считать $\text{КВ} \geq 0,95$. В работе рассмотрены влияние нескольких важнейших факторов на эксплуатационные характеристики реактора и на экономические показатели. Этими факторами являются использование разных видов топлива и топливных сочетаний, геометрические размеры реактора, распределение обогащенного топлива в активной зоне, а также изменение удельного объема топлива в разрешенных пределах. Рассмотрев влияние геометрических размеров на НПЭР, был изменен размер активной зоны за счет изменения удельного тепловыделения и объемной доли топлива. В активную зону введено топливо, ядра которого можно сказать не имеют спектральную зависимость от количества натрия. Исследования проводились на базе программного комплекса Time26 и N3D. Так же для расчетов использовались программы Excel и Mathcad.

Ключевые слова: коэффициент воспроизводства, коэффициент неравномерности, топливный цикл, активная зона, натриевый пустотный эффект реактивности.

Поступила в редакцию 26.06.2019

После доработки 23.09.2019

Принята к публикации 27.09.2019

Введение

Реактор БН-800 отличается от реактора БН-600 рядом значительных усовершенствований, направленных на повышение надежности и безопасности, в частности [1]:

- изменена конструкция активной зоны реактора, в которую для уменьшения натриевого пустотного эффекта реактивности вместо верхнего воспроизводящего экрана в выходную часть ТВС введена натриевая полость в сочетании с последовательно размещенным поглощающим экраном;

– система аварийной защиты из 9 поглощающих стержней, функционирующих на активном принципе (размыкание удерживающих их электромагнитных муфт по сигналу аварийной защиты), дополнена тремя гидравлически взвешенными в потоке натрия поглощающими стержнями, работающими на пассивном принципе;

– в нижнюю часть корпуса реактора введено устройство для удержания расплавленной активной зоны;

– для повышения надежности аварийного теплоотвода от реактора через основные контуры и парогенераторы традиционная схема дополнена независимой системой аварийного теплоотвода через воздушные теплообменники, подключенные ко второму контуру параллельно парогенераторам [2].

Разработчики проектов быстрых натриевых реакторов неоднократно обращались к анализу и обсуждению проблемы положительного натриевого пустотного эффекта реактивности (НПЭР) и его влияния на безопасность реактора. Одним из эффективных решений, направленных на снижение положительного НПЭР, которое принято в проекте реактора БН-800, является создание так называемой «натриевой полости» над активной зоной. Это увеличивает утечку нейтронов в случае удаления натрия из активной зоны и вводит отрицательную реактивность [3]. Натриевая полость располагается на месте верхнего торцевого экрана и представляет собой пустые чехлы ТВС. Аналогичное решение принято и в новом проекте реактора большой мощности БН-1200 [4].

Методы исследования и теоретическая значимость работы

Чтобы определить, какой вид топлива более приемлем со стороны коэффициента воспроизводства, был проведен нейтронно-физический расчет реактора на быстрые нейтроны с 800МВт электрической мощностью (БН-800). Геометрические размеры рассчитанного реактора не отличаются от реактора БН-800, расположенного в Белоярской атомной станции, которая выдала свой первый ток в энергосистему России 10.12.2015 года и бесперебойно работает до сих пор. Параметры активной зоны БН-800 с Мох топливом приведены в работе [5].

Активная зона, окружена боковым экраном толщиной 40 см [6]. Были выбраны 8 видов топлива:

1. $U^{(35,38)}O_2 \equiv U$
2. $Pu^{39}O_2 \equiv Pu$
3. $(U^{33} + Th^{32})O_2 \equiv U + Th$
4. $(Pu^{(39,40)} + (U^{38}))O_2 \equiv O + U$
5. $(Pu^{(39,40)} + (U^{(35,38)}))O_2 \equiv O + U(\pi)$
6. $(Pu^{(39,40,41,42)} + U^{38})O_2 \equiv \Xi + U$
7. $(Pu^{(39,40,41,42)} + U^{(35-38)})O_2 \equiv \Xi + U(\pi)$
8. $(Pu^{(39,40,41,42)} + Th^{32})O_2 \equiv \Xi + Th$

1 – представляет собой традиционный диоксид урана; 2 – чистый диоксид 239-ого плутония; 3 – оксидное топливо в активной зоне ^{233}U и ^{232}Th , а в боковом экране чистый ^{232}Th ; 4 – оксидное топливо с оружейным плутонием, в состав, которого входит ^{239}Pu – 93 % и ^{240}Pu – 7 % и чистый ^{238}U ; 5 – оружейный плутоний с природным ураном ^{238}U = 99,29 % и ^{235}U = 0,71 %; 6 – энергетический плутоний, который состоит из ^{239}Pu = 60 %, ^{240}Pu = 25 %, ^{242}Pu = 11 %, ^{242}Pu = 4% и чистый ^{238}U ; 7 – энергетический плутоний с природным ураном; 8 – энергетический плутоний с торием.

Таблица 1 – Расчет для свежего и средноизотопического состава топлива [Calculation for fresh and medium isotope composition of fuel]

$K_{эфф} = 1$	U	Pu	O + U	O+U(п)	Э + U	Э+U(п)	U+Th	Э+Th
X %	15,09	11,98	12,52	12,22	14,99	14,17	12,7	17,92
Kr	1,73	1,75	1,73	1,75	1,75	1,75	1,91	1,93
K _{ср}	1,69	1,71	1,71	1,71	1,71	1,71	1,88	1,83
KB _{Аз}	0,644	0,913	0,952	0,918	1,046	1,023	0,867	0,997
KB _{Бэ}	0,133	0,165	0,162	0,166	0,18	0,177	0,107	0,138
KB _р	0,777	1,078	1,114	1,084	1,226	1,2	0,974	1,135
НПЭР	-0,0049	0,0123	0,0138	0,0125	0,0131	0,0123	-0,0046	0,0149
β	0,00747	0,00315	0,00314	0,0033	0,00337	0,00352	0,0039	0,00299
KB _{Азср}	0,701	0,887	0,925	0,902	1,0022	0,984	0,835	0,963
KB _{Бэср}	0,145	0,173	0,173	0,179	0,119	0,188	0,115	0,142
KB _{рср}	0,846	1,063	1,098	1,081	1,192	1,172	0,95	1,105
НПЭР _с	-0,0008	0,0151	0,0162	0,0152	0,0158	0,0151	-0,0045	0,0142
β ср	0,00685	0,0031	0,0031	0,0032	0,0033	0,0034	0,0038	0,003

С точки зрения безопасности самыми хорошими видами топлива однозначно являются чистый диоксид урана и уран-ториевая смесь. Для свежего состава, НПЭР получается даже отрицательным. Во время кампании с накоплением плутония в диоксиде урана НПЭР постепенно увеличивается, но не превышает долю запаздывающих нейтронов. Однако таким образом коэффициент воспроизводства получается слишком маленьким, сравнимым с коэффициентами остальных видов топлива. Как видно из таблицы 1, энергетический плутоний с чистым ^{238}U имеет самый большой коэффициент воспроизводства в активной зоне и получается больше единицы. Но с экономической точки зрения отчистка или обеднение урана - затратный процесс, и для поддержания реактора в критичном состоянии необходимо чуть увеличить обогащение топлива по сравнению с энергетическим плутонием с природным ураном.

Рассмотрим влияние геометрических размеров на KB и НПЭР. Для исследования приведем несколько активных зон с разными геометрическими размерами. Начнем с увеличения диаметра активной зоны за счет уменьшения энергонапряженности реактора.

Из этих рассматриваемых вариантов оптимальным выбором активной зоны является $q_v = 300$ кВт/л. С увеличением диаметра активной зоны увеличивается KB и, чем больше, тем лучше. Однако это приводит к уменьшению KB в боковом экране, что уменьшает его эффективность. Уменьшение утечки нейтронов из активной зоны приводит к уменьшению начального обогащения топлива, что с точки зрения экономики очень выгодно, но приводит к увеличению НПЭР. Сейчас рассмотрим влияние отношения высоты к диаметру активной зоны на KB и НПЭР.

Проведенные расчеты показали, что значение НПЭР отрицательно для чистого диоксида урана, но значение KB очень маленькое ($KB = 0,661$), и для удержания критичности реактора необходимо большое количество делящихся материалов сравнительно с МОХ-топливом. В дальнейшем его больше рассматривать не будем.

Был проведен расчет для выравнивания радиального тепловыделения. Активная зона можно разделить на две зоны: зона малого обогащения (ЗМО) и зона большого обогащения (ЗБО). Можно выбрать толщины ЗМО и ЗБО из условия равенства объемов обеих зон, тогда $\Delta R(\text{ЗМО}) = R_{\text{Аз}} / \sqrt{2}$; $\Delta R(\text{ЗБО}) = R_{\text{Аз}} - \Delta R(\text{ЗМО})$ или из каких-либо иных соображений. Затем был выбран «скачок» обогащений, т.е. отношение обогащения топлива в ЗБО к обогащению топлива в ЗМО, например, $x(\text{ЗБО}) / x(\text{ЗМО})$. Для этого мы выбрали, как делящий материал энергетического плутония в первом случае с природным ураном, так и с торием во втором случае, и разделили активную зону на 3 зоны, стремясь приблизить значение K_r к единице. Расчеты

показали, что выравнивание энерговыделения приводит к уменьшению КВ; при использовании тория также уменьшается НПЭР реактора.

Как уже известно, КВ можно увеличить с помощью увеличения объемной доли топлива в 1 см³. Для увеличения объемной доли топлива необходимо сделать теплогидравлический расчет. Так как МОХ-топливо не обладает высокой теплопроводностью, необходимо тщательно рассмотреть каждую деталь. Его температура плавления очень высокая, но из-за маленькой теплопроводности перепад температуры в топливном сердечнике получается слишком большим и в течении кампании реактора, то есть с глубиной выгорания, она всегда поднимается и уже в конце кампании достигает своего максимального значения. Требуется определить степень увеличения и запас до температуры плавления. Только за счет этого можно увеличить объемную долю.

Термическое расширение и теплопроводность

Коэффициенты термического расширения топлива и оболочки определяют величину зазора между ними при выходе ТВЭЛ на мощность. Коэффициенты термического расширения UO₂, PuO₂ и МОХ-топливо имеют близкие значения и могут быть с высокой степенью точности описаны следующими выражениями (1), (2).

$$L(T) = L(273) \cdot (9,9672 \cdot 10^{-1} + 1,179 \cdot 10^{-5} \cdot T - 2,429 \cdot 10^{-9} \cdot T^2 + 1,219 \cdot 10^{-12} \cdot T^3) \quad (1)$$

$$\alpha_{cp} = 1,1833 \cdot 10^{-5} - 5,013 \cdot 10^{-9} \cdot T + 3,756 \cdot 10^{-12} \cdot T^2 - 6,125 \cdot 10^{-17} \cdot T^3 \quad (2)$$

Для высокого температурного интервала (вплоть до температуры плавления):

После расширения и распухания топлива уменьшается газовый зазор и уже в конце кампании, когда температура внутри таблетки достигает своего максимального значения, газовый зазор между оболочкой и таблеткой почти исчезает и за счет этого перепад температуры уменьшается и достигает минимума. Температурный режим в центре таблетки не превышает предполагаемую температуру.

Теплопроводность твердого (U+Pu)O₂, плотностью 95% теоретический определяется из следующего соотношения(3) [7].

$$\lambda(T) = 1,158 \cdot \left(\frac{100}{6,548 + 23,533 \cdot t} + \frac{6400}{t^{5/2}} \cdot \exp\left(-\frac{16,35}{t}\right) \right) \quad (3)$$

Формула Хардинга и Мартина (Harding and Martin) (3) широко используется в компьютерных программах для расчета температуры топлива, а также служит основой для других соотношений, где $t=T/1000$, T температура в К, а множитель 1,158 необходим для пересчета значений коэффициента теплопроводности образцов (U+Pu)O₂ с 95 на 100 % от теоретической плотности (ТП). Это выражение справедливо для температуры от 298 до 3120 К.

С помощью этого выражения можно получить распределение температуры по радиусу в топливном сердечнике соответственно среднему и максимальному напряжению топливного сердечника (4).

$$T_{на}^{то}(z) = T_{ср}^{теп} + x \cdot q_{10} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_0}\right) \cdot R_T \quad (4)$$

$$T_{на}^{max}(z) = T_{max}^{теп} + x \cdot q_{10}^{10} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H_0}\right) \cdot R_T$$

где X – доля генерированного тепла в ТВЭЛах. Его принято считать 0,9 [8], R_T является

общим термическим сопротивлением ТВЭЛа [9].

$$R_T = \frac{1}{\pi \cdot d_{ТВЭЛ} \cdot \alpha(z)} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ТВЭЛ}}{d_{ТВЭЛ} - 2 \cdot \delta_{об}}\right)}{2\pi\lambda_{об}} + \frac{\ln\left(\frac{d_{ТВЭЛ} - 2 \cdot \delta_{об}}{d_{топл}}\right)}{2\pi\lambda_{г.з.}} \quad (5)$$

Но как показывал эксплуатационный опыт при работе реактора коэффициент теплопроводности λ падает из-за накопления продуктов деления. Зависимость λ от глубины выгорания (Bu), облученного твердым $(U + Pu)O_2$ с плотностью 95% от теоретического значения можно оценить выражением(6) [10].

$$\lambda_{топл} = [0,1148 + 0,0035 \cdot Bu + 2,475 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 0,00333 \cdot B) \cdot T]^{-1} \quad (6)$$

где T является локальной температурой топлива в $^{\circ}C$;

Bu – локальное выгорание топлива в 100 МВт·сут/кг.

Высокая концентрация горючего в ТВЭЛах БН делает особенно острой проблему энергонапряженности, но одновременно снижает вероятность поглощения нейтронов конструкционными материалами, теплоносителем (что облегчает его выбор) и осколками деления. В этом отношении высокое обогащение способствует сохранению высоких значений КВ в реальных конструкциях. Высокая концентрация горючего вызывает необходимость достижения глубокого выгорания горючего, как по экономическим соображениям, так и с точки зрения темпов воспроизводства [11].

Исходя из результатов проведенного расчета, смогли уменьшить диаметр центрального отверстия от 1,8 мм до 0,8 мм. Максимальная температура, которая получается в поверхности центрального отверстия топливного сердечника, для максимально напряженного и выгоравшего топлива не больше $2426^{\circ}C$, что вполне находится в допущенном интервале.

Из теплогидравлического расчета получили, что можно увеличить объемную долю топлива с $\epsilon_T = 0,4588$ до $\epsilon_T = 0,4952$ за счет центрального отверстия без изменения внешнего диаметра таблетки и оболочки соответственно. Сейчас проведем тот же нейтронно-физический расчет уже с новым, более массивным топливом. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблице 2 – Нейтронно-физический расчет для более массивного топлива [Neutron-physical calculation for more massive fuel]

$K_{эфф} = 1$ $q_v = 300$ Вт/л	$\Sigma + U(n)$	$\Sigma + Th$
$X_{ЗМО/ЗСО/ЗВО} - \%$	11,72/12,22 /17,65	14,29/15,18/20,54
КГ	1,11	1,11
КВ _{Аз}	1,104	1,062
КВ _{Бз}	0,267	0,269
КВ _Р	1,371	1,33
НПЭР	0,0184	0,0216
КВ _{Азс}	1,043	1,013
КВ _{Бзс}	0,236	0,222
КВ _{Рс}	1,28	1,235
НПЭР _с	0,0233	0,0209
β	0,0035	0,0033

Как предполагали, увеличение объемной доли приводит к увеличению КВ. В средноизотопическом составе КВ активной зоны получается больше единицы, НПЭР в первом варианте увеличивается, а при тории немного падает.

Рассмотрим еще один вариант, поскольку торий тоже обладает высокими показателями, как сравнительно высокий КВ и сравнительно маленький НПЭР. Его можно добавить в топливо вместе с ^{238}U , как воспроизводящий материал с энергетическим плутонием. Результаты исследования приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты проведенного расчета [Calculation results]

$K_{\text{эфф}} = 1$	Th = 0	Th = 12,5	Th = 0,25	Th = 0,5	Th = 0,75	Th = 1
X %	11,79/14,74	12,29/15,41	12,69/15,97	13,51/16,7	14,04/17,69	14,56/18,33
K_T	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
$K_{B\Delta}$	1,117	1,121	1,123	1,115	1,1	1,076
$K_{B\Delta}$	0,227	0,231	0,235	0,234	0,233	0,23
K_{Bp}	1,343	1,352	1,358	1,35	1,333	1,306
НПЭР	0,0186	0,0218	0,0231	0,0243	0,024	0,0218
β	0,0035	0,0035	0,0034	0,0034	0,0034	0,0032
$K_{B\Delta c}$	1,056	1,064	1,066	1,06	1,045	1,022
$K_{B\Delta c}$	0,213	0,201	0,199	0,195	0,191	0,188
$K_{Bp c}$	1,269	1,264	1,264	1,314	1,236	1,21
НПЭР	0,0232	0,0248	0,0256	0,0256	0,0243	0,0211
β_c	0,0034	0,0034	0,0033	0,0033	0,0033	0,0033

Из таблицы 3 видно, что увеличение количества тория в топливе сначала приводит к увеличению КВ, а потом к падению. Но с увеличением количества тория увеличивается доля делящегося материала, необходимого для поддержания реактора в критическом состоянии.

Натриевый пустотный эффект реактивности

Удаление натрия из БН с большой активной зоной приводит к значительной положительной реактивности. Этот маловероятный случай возможен при неконтролируемой аварии, когда вскипанию и выбросу натрия предшествует уменьшение теплосъема. Этим они отличаются от тепловых реакторов, а также от быстрых газоохлаждаемых реакторов (что является одним из принципиальных аргументов в пользу последних).

Натриевый коэффициент реактивности обнаруживает сильную пространственную зависимость. При удалении натрия из центра активной зоны возникает большая положительная реактивность, при удалении из периферийных областей, напротив - отрицательная. Для понимания этого явления следует учесть действие четырех возникающих при этом эффектов:

1. Уменьшение доли нейтронов в области низких энергий;
2. Увеличение утечки нейтронов;
3. Исключение захвата в натрии;
4. Изменение самоэкранирования нейтронных сечений.

Первые два эффекта велики и противоположны по знаку. Два последних сравнительно малы. Следовательно, реактивность за счет удаления натрия в основном определяется разностью двух больших чисел. Это обстоятельство существенно затрудняет точный расчет реактивности. Прежде чем рассматривать каждый эффект в отдельности, кратко обсудим расчетную методику.

Расчет натриевого пустотного коэффициента реактивности

Энергетическая зависимость ценности нейтронов в большом быстром реакторе с оксидным топливом показана на рисунке 1. Там же изображена энергетическая зависимость величины η , испытывающая подъем при энергиях, превышающих примерно 10 кэВ. В данном случае на графике отложена эффективная величина η , т.е. учитывающая реакции в делящихся и сырьевых нуклидах. Крутой подъем при энергиях

свыше 1 МэВ объясняется пороговым делением сырьевых нуклидов, тогда как подъем при низких энергиях отражает преимущественный рост сечения деления делящихся нуклидов по сравнению с сечением захвата нейтронов сырьевыми нуклидами.

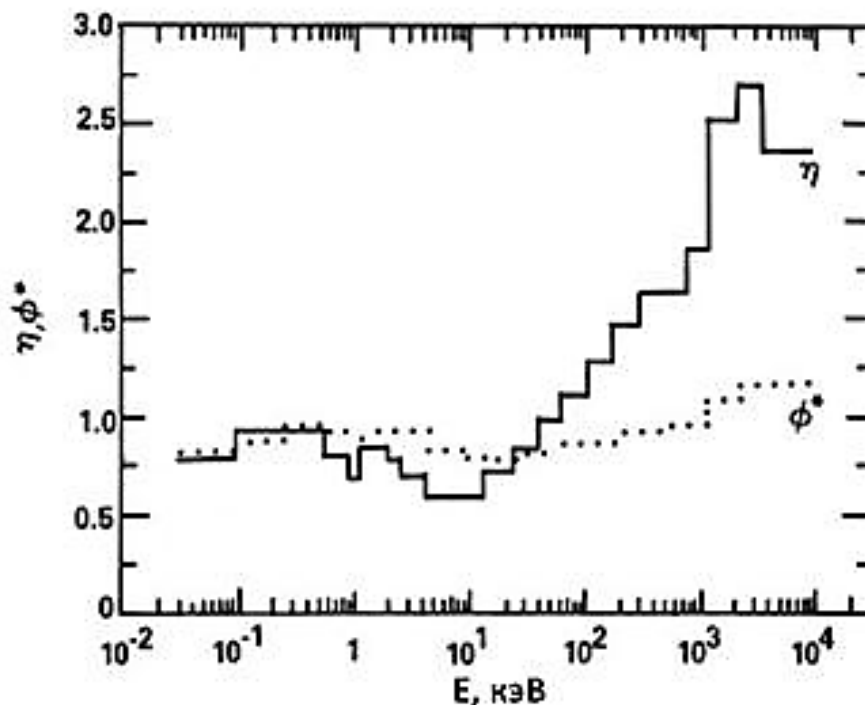


Рисунок 1 – Энергетическая зависимость сопряженного потока Φ^* и величины η в БН большой мощности с оксидным топливом [Energy dependence of the conjugate flux Φ^* and the magnitude of η in high-power BN with oxide fuel] [12, 13]

Поскольку в БН деление плутония зависит от энергии нейтрона, увеличивается η . Как показано в рисунке 1 спектр нейтронов при удалении натрия из активной зоны становится жестким и соответственно НПЭР существенно увеличивается.

Проведенные расчеты по теории возмущения для двух типов топлива U и Pu получили следующие результаты.

Таблица 4 – НПЭР по теории возмущения [SVRE perturbation theory]

H = 60 см R = 196,8 см	U	Pu
$\Delta K_{\text{раду.те.}}$	$-2,297 \cdot 10^{-3}$	$-1,7435 \cdot 10^{-3}$
$\Delta K_{\text{ак.уте}}$	$-6,653 \cdot 10^{-3}$	$-6,785 \cdot 10^{-3}$
$\Delta K_{\text{захват}}$	$1,966 \cdot 10^{-3}$	$1,6996 \cdot 10^{-3}$
$\Delta K_{\text{спектор}}$	$6,729 \cdot 10^{-3}$	$2,0963 \cdot 10^{-2}$
$\Sigma \Delta K$	$-2,55 \cdot 10^{-4}$	$1,413 \cdot 10^{-2}$

Методы уменьшения натриевого пустотного коэффициента

Исходя из выше полученных результатов попробуем уменьшить НПЭР тория-урановой смеси. Как показали результаты получившиеся с теории возмущения, самый главный положительный эффект для плутониевого топлива имеет спектральное составляющее. Бороться с НПЭР можно лишь увеличением утечки из активной зоны. Этого можно достигать только уменьшением объема активной зоны, что со своей стороны приведет к падению КВ, увеличит температуру топлива, что в нашем случае находится в максимальном значении. Необходимо проводить дополнительный теплогидравлический расчет, чтобы определить возможности и увеличить начальное обогащение топлива, что нежелательно.

Рассмотрим уран-ториевую топливу, попробуем уменьшить НПЭР с помощью увеличения утечки нейтронов из активной зоны; высоту активной зоны берем 88 см, а не 105 см, как считали наверху. Это позволит уменьшить НПЭР за счет увеличиваемой аксиальной утечки, но таким образом минимальное значение КВ не должно быть меньше 0,95. Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Зависимости КВ и НПЭР-а от размеров АЗ [Dependence of KW and SVRE -a on the size of the reactor core]

H = 0,88 м H _{эфф} = 0,32 м	q _v Вт/см ³	КВ _{АЗ}	КВ _{БЭ}	R см	НПЭР
	480	0,978	0,222	128	0,0188
	430	0,985	0,207	135,73	0,0192
	400	0,99	0,197	140,73	0,0194
	350	0,998	0,18	150,45	0,0198
	300	1,008	0,163	162,5	0,0203

Как видно из таблицы, при уменьшении объема активной зоны существенно падает НПЭР, также падает КВ и требуется увеличить обогащение, чтобы реактор держать в критическом состоянии. Однако здесь возникает необходимость нового теплогидравлического расчета. Поскольку все эти результаты получены для более массивного топлива, появляется необходимость проводить расчет заново, чтобы выявить возможность увеличить удельное тепловыделение из единичного объема. Когда энерганапряженность была 300 Вт/см³, мы увеличили объёмную долю топлива до $\epsilon_T = 0,4952$ и максимальную температуру в центре для максимально напряжённого ТВЭЛа получили 2426°C. Теперь посмотрим, насколько можно увеличить удельное энерговыделение и соответственно уменьшить объем активной зоны. Результаты приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Зависимость КВ и НПЭР от доли топлива в 1 см³ [Dependence of KW and SVRE on the share of fuel in 1 sm³]

q _v Вт/см ³	δ _{ц.о.} мм	T °C ε = 0,4952	T = 2450 °C ε _{допущ.}	КВ	НПЭР
480	1,8	4108	0,4588	0,94	0,0188
430	1,5	3596	0,4726	0,96	0,0193
400	1,39	3306	0,477	0,97	0,0195
350	1,03	2850	0,4894	1,029	0,02
300	0,8	2426	0,4952	1,049	0,0203

Поскольку на НПЭР в основном главную роль играет спектральное составляющее, рассмотрим такие варианты, где в двухзонном реакторе в зоне малого обогащения загружается ²³⁵U вместе с ⁰Pu (оружейный плутоний) и ⁹Pu (энергетический плутоний) по процентам, как делящийся материал, а как пассивный ²³⁸U и ²³²Th. На спектр значительно влияет количество ²⁴⁰Pu. Этот элемент имеет большую зависимость количества испускаемых нейтронов при одном акте деления от энергии. Поскольку он, как и ²³⁸U имеет пороговое значение деления, в случае аварии с течением натрия увеличивается его сечение деления и соответственно количество образовавшихся нейтронов [14]. И поскольку процентное содержание ²⁴⁰Pu в оружейном и энергетическом плутонии разные, (7%, 25%) рассмотрим, как будет влиять на НПЭР количество добавляемого ²³⁵U. В зоне большого обогащения в первом случае загружается МОХ-топливо на основе ⁰Pu, а в других случаях Э + U(п), Э + Th. Результаты расчета приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчета [Calculation results]

$K_{эфф} = 1$ $K_r = 1,15$ $q_v = 300$ Вт/л	^{235}U 50% O + U(п)	^{235}U 50% Э + U(п)	^{235}U 50% Э + Th
$X_{ЗМО/ЗБО} - \%$	11,35 / 12,38	11,89 / 15	12,97 / 16,43
$K_{В\Delta}$	0,937	0,969	0,967
$K_{В\Delta}$	0,194	0,227	0,203
$K_{В\rho}$	1,131	1,196	1,17
НПЭР	0,0152	0,0144	0,0178
$K_{В\Delta c}$	0,907	0,96	0,93
$K_{В\Delta c}$	0,19	0,198	0,185
$K_{В\rho c}$	1,097	1,158	1,115
НПЭР _c	0,02	0,0198	0,0174
β	0,0041	0,0043	0,0041

Как следует из таблицы 7 при равных количествах урана КВ и НПЭР уменьшаются в разных долях.

Поскольку на НПЭР, в основном, главную роль играет спектральное составляющее, рассмотрим варианты, где в двузонном реакторе в зоне малого обогащения загружается ^{235}U вместе с ^{238}U (энергетический плутоний) по процентам, как делящийся материал, а как пассивный ^{238}U и ^{232}Th – 25%. Результаты в таблице 8.

Таблица 8 – Зависимость КВ и НПЭР от количества ^{235}U [Dependence of KW and SVRE on the amount of ^{235}U]

$K_r < 1,17$	$X_{ЗМО}$	$X_{ЗБО}$	$K_{ВЗМО}$	$K_{ВЗБО}$	$K_{В\Delta}$	НПЭР
U 0,71%	12,41	14,75	1,124	0,977	1,056	0,0232
U 10%	12,43	14,66	1,086	0,98	1,035	0,0225
U 20%	12,41	14,62	1,05	0,977	1,016	0,0218
U 30%	12,42	14,51	1,017	0,975	0,997	0,0213
U 40%	12,49	14,35	0,98	0,979	0,98	0,0205
U 50%	12,44	14,32	0,957	0,963	0,961	0,0198
U 60%	12,45	14,304	0,918	0,973	0,945	0,0193

Расчет зависимости НПЭР по радиусу двузонной активной зоны для одного ТВСа, когда в ЗМО добавляется ^{235}U по процентам с ^{238}U как делящийся материал, а как пассивный ^{238}U и ^{232}Th – 25%. Результаты показаны графическим образом на рисунке 2.

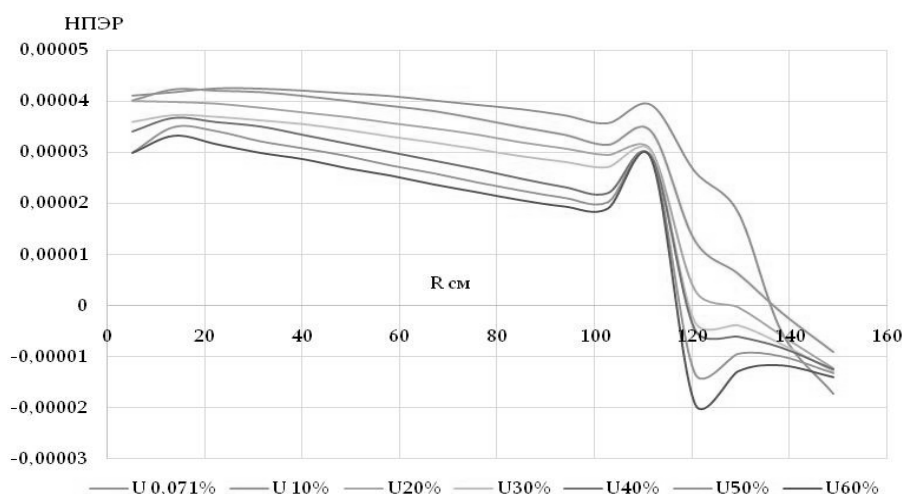


Рисунок 2 – Зависимость НПЭР по радиусу активной зоны для одного ТВСа [SVRE dependence on the core radius for a fuel assembly]

Заключение

При появлении плутония НПЭР растет и превышает долю запаздывающих нейтронов в 5-7 раз, что приводит к мгновенному росту цепной реакции. Проведенные расчеты для уменьшения НПЭР путем уменьшения объема активной зоны, а также с добавлением ^{235}U в энергетическом плутонии дали приблизительно одинаковые результаты: уменьшение НПЭР в 1,2 раза. В первом случае это было за счет увеличения удельного тепловыделения, которое выгодно по экономическим критериям (маленькая АЗ – маленькие капитальные и эксплуатационные затраты). Во втором случае, когда энерговыделение сравнительно невелико можно, не меняя размеры, получить сравнительно малый НПЭР, который оправдан с точки зрения безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, И. А. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах / И. А. Кузнецов, В. М. Поплавский. – Москва : ИздАт, 2012. – 632 с.
2. Ашурко, Ю. М. Исследование влияния натриевого пустотного эффекта реактивности на безопасность быстрого натриевого реактора большой мощности / Ю. М. Ашурко, К. А. Андреева, И. В. Бурьевский, А. В. Волков, В. А. Елисеев [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 3. – С. 5-14.
3. Matveev, V. I., Chebescov, A. N., Cerny, V. A. Studies, development and justification of core with zero sodium void reactivity effect of the BN-800 reactor. International Topical Meeting, Obninsk, Russia, Oct. 37, 1994. Proceedings Volume 1. P. 145-159.
4. Поплавский, В. М. Исследование влияния пустотного эффекта реактивности на техникоэкономические характеристики и безопасность перспективного быстрого реактора / В. М. Поплавский, В. И. Матвеев, В. А. Елисеев // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. Вып. 4. С. 230-235.
5. Ринейский, А. А. Инжиниринг энергоблока с реактором на быстрых нейтронах БН-800 / А. А. Ринейский // Атомные стратегии. – 2006. – № 23. – С. 49-60
6. Апсэ, В. А. Использование программы TIME26 в курсовом проектировании быстрых реакторов и электроядерных установок / В. А. Апсэ, А. Н. Шмелев. – Москва : Издательство МИФИ, 2008. – 63 с.
7. Калинин, Б. А. Ядерные топливные материалы / Б. А. Калинин, П. А. Платонов, И. И. Чернов, Я. И. Штромбах // – Москва : Издательство МИФИ, 2008. – Т. 6, ч. 2. – 672 с.
8. Kannan, I. Power Reactors. NPTEL, Mechanical Engineering. – URL: <https://nptel.ac.in/courses/112101007/1> (the date of circulation: 04/27/2019).
9. Дементьев, Б. А. Ядерные энергетические реакторы / Б. А. Дементьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.
10. Kuzmin, A. V., Yurkov I.O., M. M. Thermal conductivity coefficient UO₂ of theoretical density and regular stoichiometry : Thermophysical Basis of Energy Technologies. MATEC Web of Conferences. Tomsk, Jan. 2017
11. Орлов, В. В. Реакторы на быстрых нейтронах / В.В. Орлов // Атомная энергия. – 1976. – Т. 36 – С. 343-354.
12. Hummel, H. H., Okrent, D. Reactivity Coefficients in Large Fast Power Reactors. – American Nuclear Society. 1970. 386 P.
13. Уолтер, А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах /А. Уолтер, А. Рейнольдс. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 623 с.
14. Николаев М. Н. Плутоний / М. Н. Николаев // Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского. – URL: www.ippe.ru/libr/pdf/94pu.pdf (дата обращения: 27.04.2019).

REFERENCES

- [1] Kuznetsov I.A., Poplavskiy V.M. Bezopasnost' AES s reaktorami na bystrykh neytronakh [Safety of NPPs with Fast Neutron Reactors]. Moskva. IzdAt. [Moscow IzdAt], 2012. 632 p. (in Russian).
- [2] Ashurko YU.M., Andreyeva K.A., Bur'yevskiy I.V., Volkov A.V., Yeliseyev V.A., Yegorov A.V., Kuznetsov I.A., Korobeynikova L.V., Matveyev V.I., Solomonova N.V., Khomyakov YU.S., Tsarapkina A.N. Issledovaniye vliyaniya natriyevogo pustotnogo effekta reaktivnosti na bezopasnost' bystrogo natriyevogo reaktora bol'shoi moshchnosti [Investigation of the Influence of the Sodium Void Reactivity Effect on the Safety of a Fast High-Power Sodium Reactor]. Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika [News of Universities. Nuclear Energy]. 2014. № 3. P.

- 5-14 (in Russian).
- [3] Matveev V.I., Chebescov A.N., Cerny V.A. Studies, Development and Justification of Core with Zero Sodium Void Reactivity Effect of the BN-800 Reactor. International Topical Meeting, Obninsk, Russia, Oct. 37, 1994. Proceedings Volume 1. P. 145-159.
 - [4] Poplavskiy V.M., Matveyev V.I., Yeliseyev V.A. Issledovaniye vliyaniya pustotnogo effekta reaktivnosti na tekhnikoekonomicheskiye kharakteristiki i bezopasnost' perspektivnogo bystrygo reaktora [Investigation of the Influence of Void Reactivity Effect on the Technical and Economic Characteristics and Safety of a Promising Fast Reactor]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. – 2010. T. 108, issue 4. P. 230-235 (in Russian).
 - [5] Rineyskiy A. A. Inzhiniring energobloka s reaktorom na bystrykh neytronakh BN-800 [Engineering Unit with Fast Neutron Reactor BN-800]. Atomnyye strategii [Atomic Strategies]. 2006. № 23. P. 49-60 (in Russian).
 - [6] Apse V.A. Shmelev A.N. Ispol'zovaniye programmy TIME26 v kursovom proyektirovanii bystrykh reaktorov i elektroyadernykh ustanovok [The Use of the TIME26 Program in Course Design of Fast Reactors and Power Plants]. Moskva [Moscow]. MEPhI Publishing house 2008. 63 p. (in Russian).
 - [7] Kalin B.A. Platonov P.A., Chernov I.I., Shtrombakh YA.I. Yadernyye toplivnyye materialy [Nuclear Fuel Materials]. Moskva [Moscow]: Izd-vo MIFI 2008. T. 6, ch. 2. 672 p. (in Russian).
 - [8] Kannan. I. Power Reactors [Electronic Resource]. NPTEL, Mechanical Engineering. URL: <https://nptel.ac.in/courses/112101007/1> (the date of circulation: 04.27.2019).
 - [9] Dement'yev B.A. Yadernyye energeticheskiye reaktory [Nuclear Power Reactors]. Moskva [Moscow]. Energoatomizdat, 1984. 280 p. (in Russian).
 - [10] Kuzmin A.V., Yurkov M.M. Thermal conductivity coefficient UO_2 of theoretical density and regular stoichiometry. Thermophysical Basis of Energy Technologies. MATEC Web of Conferences. Tomsk, Jan. 2017.
 - [11] Orlov V.V. Reaktory na bystrykh neytronakh [Fast Neutron Reactors]. Atomnaya energiya [Atomic Energy]. 1976. T. 36. P. 343-354 (in Russian).
 - [12] Hummel H.H., Okrent D. Reactivity Coefficients in Large Fast Power Reactors. American Nuclear Society. 1970. 386 p.
 - [13] Uolter A., Reynol'ds A. Reaktory-razmnozhiteli na bystrykh neytronakh [Fast Neutron Breeder Reactors]. Moskva [Moscow]. Energoatomizdat, 1986. 623 p. (in Russian).
 - [14] Nikolayev M.N. Plutoniyy [Plutonium], [Electronic resource]. Fiziko-energeticheskiy institut imeni A.I. Leypunskogo [A. I. Leipunsky Institute of Physics and Energy]. URL: www.ippe.ru/libr/pdf/94pu.pdf (date of treatment 27.04.2019).

Study Ways to Increase KW in Fast Reactors with MOX Fuel Aiming for the Minimum of Sodium Void Reactivity Effect

A. Harutyunyan¹, S.B. Vygovskiy², A. Khachatryan³

National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute (NRNU MEPhI), Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 1154091

¹ORCID iD: 0000-0003-1281-0791

Publons: Aram Harutyunyan

e-mail: aram5041@outlook.com

²ORCID iD: 0000-0002-9995-1222

WoS Researcher ID: P-5608-2018

e-mail: vigovskii@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0002-1785-5342

WoS Researcher ID: P-5318-2018

e-mail: artsrn-khachatryan@mail.ru

Abstract – This work presents the results of numerical studies on the possibility of increasing the maximum safe using different kinds of fuel for sodium-cooled BN reactors. The purpose of this work is to study and detect fuel or fuel combination with the best technical and economic indicators and safety conditions for the BN-800 reactor plant which not only increases the economic indicators but also the efficiency of the entire pre-reactor cycle. For some time now, the problems associated with a decrease in the amount of U^{235} resulted in an increase in price and an increase in the amount of accumulated Pu initially achieved in the military industry. However,

since the reprocessing of spent nuclear fuel (SNF) by WWER and RBMK, ways must be sought to compensate for these phenomena with the priority of reliable and safe operation of a nuclear facility. An indicator of reliable and safe operation of nuclear power plants in the case under consideration is SVRE (sodium void reactivity effect). Achieving high values of this value leads to a decrease in the secure operation of NPPs and forces us not only to find ways to increase the RF, but also ways that result in minimal values for SVRE with maximum RF. In the calculations aimed at the reduction of SVRE it is assumed that the minimum value of KW is $KW \geq 0,95$. The paper examines the effects of several important factors on reactor performance and economic performance. These factors include the use of different fuels and fuel combinations, the geometric dimensions of the reactor, the distribution of enriched fuel in the core, and the change in specific fuel volume within allowable limits. The influence of geometrical dimensions on the SVRE is considered, the size of the core is changed due to a change in the specific heat release and the volume fraction of the fuel. In the core fuel is introduced which nuclei have no spectral dependence on the amount of sodium.

Keywords: reproduction coefficient, irregularity coefficient, fuel cycle, active zone, sodium void reactivity effect.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.384.039

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ CFD МОДЕЛИ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ ТВС

© 2019 К.Н. Проскуряков, А.В. Аникеев, И. Афшар, Д.А. Писарева

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Разработана картограмма изменения собственной частоты колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) в активной зоне реактора для прогнозирования условий роста вибраций тепловыделяющих сборок (ТВС) ВВЭР-1200. Определение средней температуры и давления теплоносителя в активной зоне в номинальном режиме проведено путем применения известных результатов расчета, полученных при использовании теплогидравлической трехмерной CFD- модели реактора ВВЭР-1200. Показано, что совпадение СЧКДТ с частотой вибраций ТВС возможно лишь при определенных значениях давления и температуры теплоносителя, а усиление вибраций происходит только в области температур, соответствующих полосе пропускания относительно выявленного значения СЧКДТ. Показано, что на разных этапах пуска реактора возможно усиление изгибных колебаний ТВС-2М.

Ключевые слова: частота, колебания, давление, теплоноситель, вибрации, износ.

Поступила в редакцию 26.06.2019

После доработки 16.09.2019

Принята к публикации 27.09.2019

Введение

Проблема выявления и устранения причин аномальных вибраций тепловыделяющих сборок (ТВС) является актуальной для всех стран, эксплуатирующих АЭС. В настоящее время во всех ведущих в атомной энергетике странах мира реализуется «Концепция нулевого дефекта тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ)» [1, 2]. Её целью является минимизация выхода радиоактивных продуктов деления из ТВЭЛ. Уменьшение циклических нагрузок и вибраций необходимо для увеличения кампании топлива, совершенствования топливного цикла и, как следствие, для сокращения объемов радиоактивных отходов, подлежащих переработке и захоронению.

В результате колебаний теплоносителя возникают циклические изгибные деформации оболочек ТВЭЛ. Образование и развитие дефектов в результате: коррозионно-усталостных процессов и динамического взаимодействия оболочек ТВЭЛов с дистанционирующими решетками (ДР) приводит к фреттинг-износу и повреждениям твердыми частицами (дебриз – износ) оболочек в зоне их контакта с пуклевками ДР [3-5]. Циклические напряжения в зоне крепления хвостовиков ТВЭЛов в нижней опорной решетке, способствуют инициированию и дальнейшему развитию механического износа хвостовиков [6].

Результаты исследований надежности ТВС, после трех циклов их работы на АЭС Вульф Крик, приведены в [3]. В работе [7] проведено моделирование процесса возбуждения больших вихрей вниз по течению от смесительной решётки с использованием техники, применяемой в вычислительной гидродинамике (LES-модель турбулентности в коммерческих CFD программах). В работе [8] выполнено моделирование LES движения больших вихрей в пространстве, окружающем один

стержень. Для вычисления вибрации топливного стержня использованы турбулентные нагрузки. В работах [9-11] рассматривались модели фреттинг изнашивания в местах контакта ДР с ТВЭЛ для PWR, а также влияние условий закрепления ТВЭЛ на их вибрацию. В работе [12] проведена верификация результатов исследования пучка стержней. В работе [13] выполнены CFD расчеты. Для этого исследования были использованы сетки с 7, 16 и 60 миллионами элементов. Показано, что результаты расчетов могут быть использованы для определения действующих на ТВЭЛ сил и для последующего динамического анализа.

Прогнозирование условий роста вибраций ТВС ВВЭР-1200

В работе [14] разработан и применен теплогидравлический трехмерный CFD-код модели реактора ВВЭР-1200, содержащий ~1 млрд. ячеек. Разработанная модель позволяет определять распределение температуры и давления теплоносителя в реакторе. Обработка результатов расчета позволяет получить ряд параметров, характеризующих работу реакторной установки: распределение расходов на входе и на выходе из активной зоны, распределение подогревов в ТВС, коэффициентов гидравлического сопротивления элементов проточного тракта реактора и т.д. На рисунке 1 показано распределение давления и температуры по CFD модели реактора

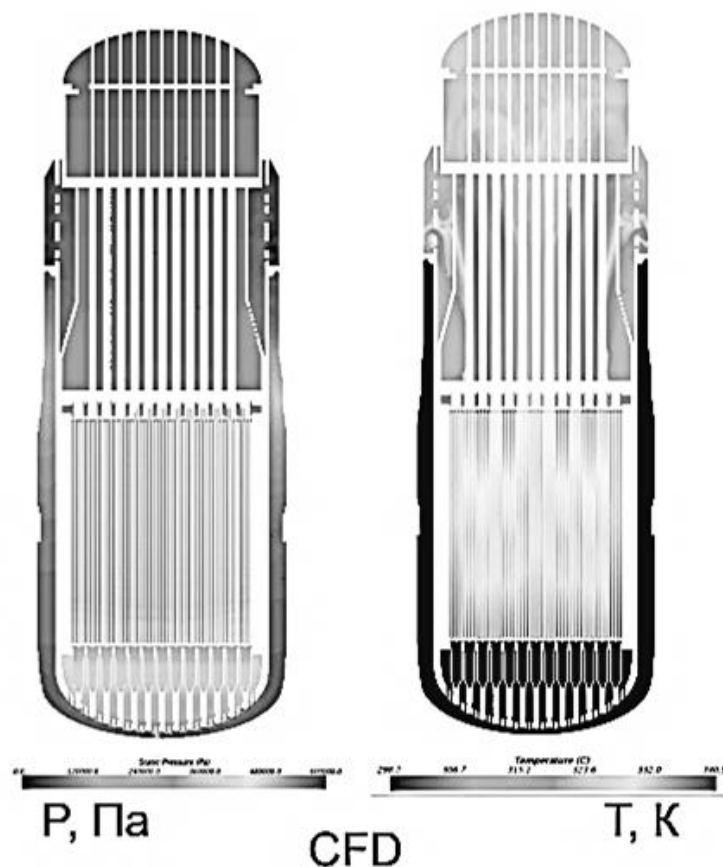


Рисунок 1 – Распределение давления и температуры по CFD модели реактора [The distribution of pressure and temperature in the CFD reactor model]

Давление теплоносителя по сечению CFD модели активной зоны показано на рисунке 1, расчет скорости звука в теплоносителе и его плотности проведены с использованием программы WaterSteamPro [16], разработанной и внедренной НИУ «МЭИ».

Величины теплогидравлических параметров в расчетной модели ТВС по высоте активной зоны взяты согласно данным из таблицы 1. [14].

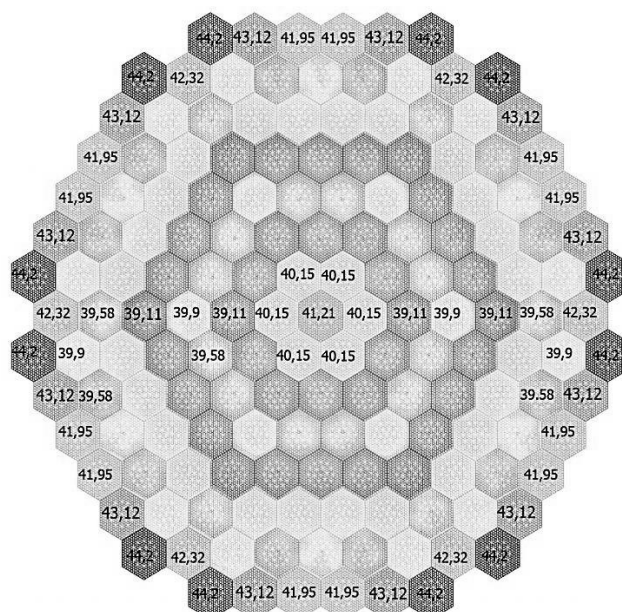


Рисунок 3 – Картограмма СЧКДТ при номинальном режиме, Гц [Cartogram of NFCPO at the nominal mode, Hz]

Результаты расчета СЧКДТ, представленные на рисунке 3, указывают на отсутствие в номинальном режиме эксплуатации реактора ВВЭР-1200 условий, необходимых для возникновения резонансных колебаний ТВС-2М с потоком теплоносителя.

Усиление изгибных колебаний ТВС-2М на этапах пуска реактора

Проведены сопоставление результатов расчетов СЧКДТ CFD модели с собственной частотой колебаний макета ТВС-2М, частота которого, в зависимости от формы колебания [17], варьируется в диапазоне от 5 Гц до 35,5 Гц.

В этой работе выявлено, что при эксплуатации влияющим фактором на вибрации ТВЭЛов оказывает расход теплоносителя. В таблице 3 приведены собственные частоты колебаний макета ТВС-2М [17]. Источником вибрации в теплоносителе являются локальные возмущения потока теплоносителя. Однако влияние температуры теплоносителя на вибрации ТВС не было обнаружено.

Таблица 3 – Собственные частоты колебаний макета ТВС-2М [Natural frequencies of FA-2M layout]

Форма колебаний	Частота ТВС – 2М, Гц
1-я изгибная	5
1-я крутильная	8
2-я изгибная	10,5
2-я крутильная	16
3-я изгибная	16,5
3-я крутильная	24
4-я изгибная	23
5-я изгибная	28,5
6-изгибная	35,5

Известно, что при воздействии внешнего источника возмущений с частотой в 2 раза превышающую частоту собственных колебаний объекта возникает резкое увеличение амплитуды колебаний объекта.

В таблице 4 приведены значения параметров теплоносителя, при которых величина СЧКДТ в активной зоне в два раза больше собственных частот вибраций ТВС-2М, а

также при которых они равны четырехкратной частоте оборотов главного циркуляционного насоса (ГЦН).

Таблица 4 – Параметры теплоносителя, при которых СЧКДТ в два и в четыре раза превышает частоту вибрации ТВС [The parameters of the coolant where NFCDO is two or four times higher than the frequency of fuel assembly vibration]

Форма колебаний	Частота вибраций ТВС-2М, Гц	Двукратная частота возмущающих воздействий, Гц	Четырехкратная частота возмущающих воздействий, Гц	Скорость звука в теплоносителе, м/с	Температура при P=8 МПа, °C	Температура при P=10 МПа, °C	Температура при P=12 МПа, °C	Температура при P=16 МПа, °C
3-я изгибная	16,5	-	66	1471,4	160	159	161	167
4-я изгибная	23,0	46	-	1025,8	280	283	285	290
5-я изгибная	28,0	56	-	1248,8	230	233	235	240
6-я изгибная	35,5	71	-	1583,3	80	83	84	90

Данные, приведенные в таблице 4, указывают на то, что на некоторых этапах пуска реактора ВВЭР-1000 возможно усиление изгибных колебаний ТВС-2М, и что этот фактор необходимо учитывать при анализе остаточного ресурса и обеспечения допустимого износа в результате процесса фреттинг-коррозии.

Показано, что совпадение СЧКДТ и вибраций ТВС возможно лишь при определенном значении средней температуры теплоносителя в активной зоне и только в области температур, соответствующих полосе пропускания относительно выявленного значения СЧКДТ.

В работе [18] проведены исследования вибраций в потоке теплоносителя с температурой 20-40 °C и с максимальным проектным расходом через ТВС.

Пульсации давлений по амплитуде превосходили максимальные приемлемые амплитуды при пусконаладочных измерениях на ВВЭР-1000 примерно на 10-20%.

Во время исследования с помощью лазерных виброметров через прозрачные окна в колонке стенда измерялась вибрация ТВЭЛов, возбуждаемая потоком. Совместно проводилось измерения вибраций одного и того же ТВЭЛа в двух направлениях в каждом из пролетов.

Пульсации давления, созданные на стенде, представлены на рисунке 4. Спектральная характеристика пульсаций давления построена на базе реально полученного спектра при исследовании ядерного реактора для воссоздания условий эксперимента с соответствующими динамическими характеристиками.

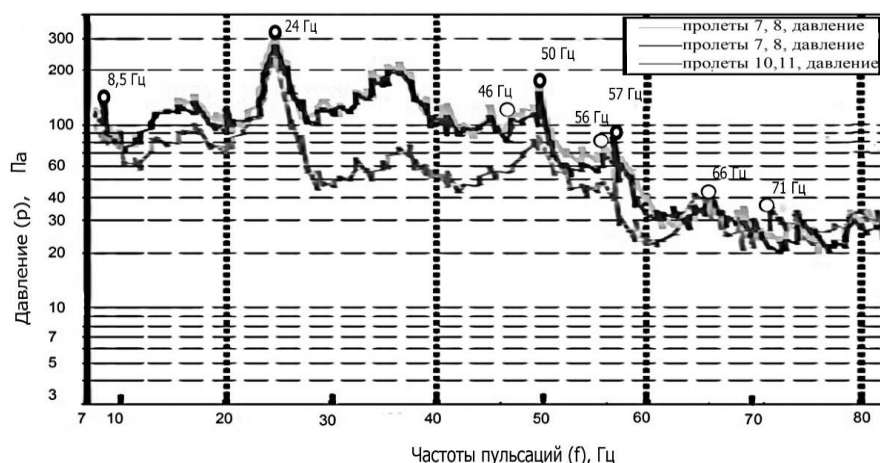


Рисунок 4 – Спектральная характеристика пульсаций давления в макете ТВС [Spectral characteristics of pressure pulsations in the fuel assembly layout]

На рисунке 4 обозначены частоты пульсаций давления, приведенные в таблице 2. На спектральной характеристике пульсаций давления в макете ТВС видно, что этим частотам соответствуют выраженные пики.

С учетом того, что представленная на рисунке 4 спектральная характеристика пульсаций давления соответствует измерениям, проведенным на реакторе ВВЭР-1000, можно констатировать, что результаты прогнозирования параметров теплоносителя, при которых увеличивается уровень вибраций ТВС в реакторе ВВЭР-1200, подтверждены данными измерений на эксплуатируемых энергоблоках.

Результаты прогнозирования, проведенные на основе данных CFD модели, указывают на отсутствие в номинальном режиме эксплуатации реактора ВВЭР-1200 условий, необходимых для возникновения резонансных колебаний ТВС-2М с потоком теплоносителя.

Заключение

Интенсивность износа защитной оболочки ТВЭЛ при фреттинг-коррозии (ФК) возрастает при виброакустическом резонансе, при котором частоты вибраций ТВЭЛ и/или ТВС попадают в полосу пропускания акустических колебаний теплоносителя в активной зоне реактора.

Максимальное усиление вибраций ТВС происходит при совпадении СЧКДТ с частотой вибраций (при определенных значениях средней температуры и давления теплоносителя в активной зоне).

Рост уровня вибрации имеет место при нахождении частоты вибраций в полосе пропускания выявленного значения СЧКДТ.

Для предотвращения резонанса колебаний теплоносителя с вибрациями ТВС необходимо и достаточно вывести собственную частоту колебаний ТВС за пределы полосы пропускания.

Результаты прогнозирования, проведенные на основе данных CFD модели, указывают на отсутствие в номинальном режиме эксплуатации реактора ВВЭР-1200 условий, необходимых для возникновения резонансных колебаний ТВС - 2М с потоком теплоносителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгов, А. Б. Стратегия движения к нулевому отказу ядерного топлива / А. Б. Долгов, О. Г. Черников // Доклад на Пленарном заседании Международной научно-технической конференции «Безопасность, экономика и эффективность атомной отрасли», Москва, 25-27 мая 2016. – URL : http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/Materials_2016/Plenar_rus/Strategiya_dvizheniya_k_nulevomu_otkazu_20_05_16.pdf (дата обращения: 16.09.2019).
2. Трипотень, Е. Нулевой отказ как идеология / Е. Трипотень // Атомный эксперт. – 2016. – № 6 (48). – С. 50-55.
3. Billerey A. Evolution of the fuel rod support under irradiation and its impacts on the mechanical behavior of the fuel assemblies, IAEA, Vienna, 2005.
4. Vallory J. Methodology of PWR fuel rod vibration and evaluation in HERMES Facilities, IAEA, Vienna, 2005.
5. Gottuso D., Canat J.N., Mollard P. A family of upgraded fuel assemblies for PWR // Int. Conf. TopFuel 2006, Salamanca, 2006.
6. Перевезенцев, В. В. Возбуждение колебаний пучка ТВЭЛов реакторов ВВЭР турбулентным потоком теплоносителя / В. В. Перевезенцев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2009. – № 4. – С.78-88
7. Ikeno T., Kajishima T. Decay of swirling turbulent flow in rod-bundle, Journal of Fluid Science and Technology. 2006. P. 36-47.
8. Benhamadouche S., Moussou P., Maitre C.L. CFD estimation of the flow-induced vibrations of a fuel rod downstream of a mixing grid // Pressure Vessels and Piping: PVP 2009 ASME, Conference, Prague, Czech Republic, 2009.

9. Kim K.-T. The study on grid-to-rod wear models for PWR fuel, Nuclear Engineering and Design. 2009. P. 2820-2824.
10. Kim K.-T. A study on the grid-to-rod wear-induced fuel failure observed in the 16×16 KOFA fuel, Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 756-762.
11. Kim K.-T. The effect of fuel rod supporting conditions on fuel rod vibration characteristics and grid-to-rod wear, Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 1886-1391.
12. Conner M.E., Baglietto E., Elmahdi A.M. Cfd methodology and validation for single-phase flow in pwr fuel assemblies. Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 2088-2095.
13. Yan J., Yuan K., Tatli E., Karoutas Z. A new method to predict grid-to-rod in a PWR fuel assembly inlet region. Nuclear Engineering and Design. 2011. P. 2974-2982.
14. Волков, В. Ю. Разработка теплогидравлической CFD модели реактора ВВЭР-1200 / В. Ю. Волков [и др.] // Материалы XII Международной научно-практической конференции STAR Russian Conference 2017 «Компьютерные технологии: решения прикладных задач тепломассопереноса и прочности», 31 мая-01 июня 2017 г., Нижний Новгород, 2017. – URL: <https://sapr.ru/anons/20170323-star-russian-conference-2017>.
15. Проскуряков, К. Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ / К. Н. Проскуряков // Москва : МЭИ, 1984. – 67 с.
16. Орлов, К. А. Программный комплекс «WaterSteamPro» для расчета теплофизических свойств воды и водяного пара / К. А. Орлов, А. А. Александров, В. Ф. Очков, А. В. Очков // X Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ : тезисы докладов. – Казань : Бутлеровские сообщения, 2002. – С. 187-188.
17. Макаров, В. В. Модальный анализ макетов ТВС реакторов ВВЭР при силовом и кинематическом возбуждении вибрации / В. В. Макаров, А. В. Афанасьев, И. В. Матвиенко // Материалы научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск : ГИДРОПРЕСС, 2014.–URL:<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article56-ru.htm>.
18. Егоров, Ю. В. Экспериментальные исследования вибрации ТВЭЛов ТВС-2М и ТВС-КВАДРАТ в потоке теплоносителя в обоснование вибрационной прочности / Ю. В. Егоров // Материалы научно-технической конференции молодых специалистов, ФГУП ОКБ «Гидропресс». – Подольск, 2016. – URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2013/documents/kms2013-002.pdf>

REFERENCES

- [1] Dolgov A.B., Chernikov O.G. Strategiya dvizheniya k nulevomu otkazu yadernogo topliva [Strategy of Movement to Zero Failure of Nuclear Fuel]. Doklad na Plenarnom zasedanii Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Bezopasnost', e'konomika i e'ffektivnost' atomnoj otrasli» [Report at the Plenary Session of the International Scientific and Technical Conference «Safety, Economy and Efficiency of the Nuclear Industry»]. Moscow, may 25-27, 2016. URL : http://mntk.rosenergoatom.ru/mediafiles/u/files/2016/Materials_2016/Plenar_rus/Strategiya_dvizheniya_k_nulevomu_otkazu_20_05_16.pdf (in Russian).
- [2] Tripoten E. Nulevoj otkaz kak ideologiya [Zero Failure as an Ideology]. Atomny'j e'kspert [Atomic Expert]. 2016. № 6 (48). P. 50-55 (in Russian).
- [3] Billerey A. Evolution of the fuel rod support under irradiation and it impacts on the mechanical behavior of the fuel assemblies, IAEA, Vienna, 2005.
- [4] Vallory J. Methodology of PWR fuel rod vibration and evaluation in HERMES Facilities, IAEA, Vienna, 2005.
- [5] Gottuso D., Canat J.N., Mollard P. A family of upgraded fuel assemblies for PWR // Int. Conf. TopFuel 2006, Salamanca, 2006.
- [6] Perevezencev V.V. Vozbuzhdenie kolebanij puchka TVE`Lov reaktorov VVE`R turbulentny`m potokom teplonositelya [The Excitation of Vibrations of the Fuel Rod Bundle of WWER Reactor a Turbulent Flow of Coolant]. Vestnik MGTU im. N. E`. Bauman. Ser. Mashinostroenie [Bulletin of Bauman MGTU. Engineering]. 2009. №4. C.78-88 (in Russian).
- [7] Ikeno T., Kajishima T. Decay of swirling turbulent flow in rod-bundle. Journal of Fluid Science and Technology. 2006. P. 36-47.
- [8] Benhamadouche S., Moussou P., Maitre C.L., CFD estimation of the flow-induced vibrations of a fuel rod downstream of a mixing grid // Pressure Vessels and Piping: PVP 2009 ASME, Conference, Prague, Czech Republic, 2009.
- [9] Kim K.-T. The study on grid-to-rod wear models for PWR fuel. Nuclear Engineering and Design. 2009. P. 2820-2824.

- [10] Kim K.-T. A study on the grid-to-rod wear-induced fuel failure observed in the 16×16 KOFA fuel. Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 756-762.
- [11] Kim K.-T. The effect of fuel rod supporting conditions on fuel rod vibration characteristics and grid-to-rod wear. Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 1886-1391.
- [12] Conner M. E., Baglietto E., Elmahdi A.M. Cfd methodology and validation for single-phase flow in pwr fuel assemblies. Nuclear Engineering and Design. 2010. P. 2088-2095.
- [13] Yan J., Yuan K., Tatli E., Karoutas Z. A new method to predict gridto-rod in a PWR fuel assembly inlet region. Nuclear Engineering and Design. 2011. P. 2974-2982.
- [14] Volkov V.Yu., Golibrodo L.A., Krutikov A.A., Kudryavcev O.V., Nadinskij Yu.N., Skibin A.P. Razrabotka teplogidravlicheskoj CFD modeli reaktora VVE`R-1200 [Development of Thermohydraulic CFD Model of WVER-1200 Reactor]. Materialy` XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii STAR Russian Conference 2017 «Komp`yuterny`e tekhnologii: resheniya prikladny`x zadach teplomassoperenosa i prochnosti» 31 maya-01 iyunya 2017 g., Nizhnij Novgorod [Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference STAR Russian Conference 2017 «Computer Technologies: Solutions of Applied Problems of Heat and Mass Transfer and Strength», May 31-June 01, 2017, Nizhny Novgorod]. URL: <https://sapr.ru/anons/20170323-star-russian-conference-2017> (in Russian).
- [15] Proskuryakov K.N. Teplogidravlichesкое возбуждение колебаний теплоносителя во vnutrikorpusny`x ustroystvax YaE`U [Thermal-Hydraulic Excitation of Vibrations of the Coolant In-Vessel Devices of the Nuclear Power]. Moscow: MEI, 1984. 67 p. (in Russian).
- [16] Orlov K.A., Aleksandrov A.A., Ochkov V.F., Ochkov A.V. Programmny`j kompleks «WaterSteamPro» dlya rascheta teplofizicheskix svoystv vody` i vodyanogo para [Software Package "WaterSteamPro" for Calculation of Thermophysical Properties of Water and Steam]. X Rossijskaya konferenciya po teplofizicheskim svoystvam veshhestv : tezis` dokladov [X Russian Conference on Thermophysical Properties of Substances: abstracts]. Kazan`: Butlerovskie soobshheniya [Kazan: Butlerov Communications]. 2002. P. 187-188 (in Russian).
- [17] Makarov V.V., Afanas`ev A.V., Matvienko I.V. Modal`ny`j analiz maketov TVS reaktorov VVE`R pri silovom i kinematicheskom возбуждении vibracii [Modal Analysis of Models of WVER reactor Fuel Assemblies at Power and Kinematic Excitation of Vibration]. Materialy` nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Obespechenie bezopasnosti AE`S s VVE`R» [Materials of Scientific and Technical Conference «Safety of Nuclear Power Plants with WVER»]. Podolsk: GIDROPRESS. 2014. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article56-ru.htm> (in Russian).
- [18] Egorov Yu.V. E`ksperimental`ny`e issledovaniya vibracii TVE`Lov TVS-2M i TVS-KVADRAT v potoke teplonositelya v obosnovanie vibracionnoj prochnosti [Experimental Studies of the Vibration of Fuel Rods FA-2M and FA-SQUARED in the Coolant Flow to Substantiate the Vibration Strength]. Materialy` nauchno-tekhnicheskoy konferencii molody`x specialistov, FGUP OKB «Gidropress» [Materials of the Scientific and Technical Conference of Young Specialists, FSUE OKB «Gidropress»]. Podolsk. 2016. – URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2013/documents/kms2013-002.pdf> (in Russian).

Use CFD Model of WVER-1200 Reactor for Prediction of Fuel Assemblies Vibrations

K.N. Proskuryakov¹, A.V. Anikeev², E. Afshar³, D.A. Pisareva⁴

«National Research University «MPEI», Moscow, Russia

¹ORCID ID: 0000-0002-1884-5576

Wos Researher ID: I-3583-2017

e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

²ORCID ID: 0000-0001-6463-2328X

e-mail: Anikeev@mephi.ru

³ORCID ID: 0000-0002-1884-5576

e-mail: afshari@mpei.ru

⁴ORCID ID: 0000-0002-6261-6973

e-mail: pisarevavi@yandex.ru

Abstract – The pare shoes the development cartogram of changes the natural frequencies of coolant pressure oscillation (NFCPO) in the reactor core to predict the conditions of growth the vibrations

of fuel assemblies (FA) for WWER-1200. Determination of the average temperature and pressure of the coolant in the core in the nominal mode is carried out by applying the known calculation results obtained using the thermo hydraulic three-dimensional CFD model of the WWER-1200 reactor. It is shown that the coincidence of the NFCPO with the frequency of vibrations of the FA is possible only at certain values of pressure and temperature of the coolant and vibration amplification occurs only in the temperature range corresponding to the bandwidth relative to the detected value of the NFCPO. It is shown that it is possible to increase flexural vibrations of FA-2M at different stages of reactor start-up.

Keywords: frequency, oscillations, reactor start-up, pressure, coolant, vibrations, wear.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.818

**ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
ОБОРУДОВАНИЯ АЭС В УСЛОВИЯХ ПЕРЕХОДА НА 18-
МЕСЯЧНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ**

© 2019 Е.А. Абидова

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

В работе поднимается вопрос повышения чувствительности диагностирования оборудования АЭС в связи с увеличением межремонтного периода. Предлагается использовать подход на основе метода главных компонент. Приводятся результаты эксперимента, указывающего на повышение чувствительности и избирательности за счет использования предлагаемого метода.

Ключевые слова: диагностика электроприводной арматуры, метод главных компонент, чувствительность, избирательность.

Поступила в редакцию 21.10.2019

После доработки 29.10.2019

Принята к публикации 05.11.2019

Безопасность и экономичность АЭС во многом обеспечивается качеством ремонта оборудования. Большая часть оборудования АЭС подвергается контролю и ремонту в период планово-предупредительного ремонта (ППР): ЭПА, насосы, машина перегрузочная. Реализуя стратегию обслуживания по состоянию, необходимость и объем ремонта этого оборудования обосновывается диагностированием. Таким образом, в течение ППР необходимо либо выявить и устранить дефекты, либо подтвердить возможность безотказной работы весь межремонтный период [1, 2]. В связи с переходом блоков АЭС на 18-месячный топливный цикл, сокращением времени ППР возрастают требования к чувствительности диагностических процедур.

Арматура АЭС – краны, вентили, задвижки – в настоящее время диагностируются по электрическим показателям [2]. Подход, конечно, позволяет в короткий период охватить большой объем оборудования, но чувствительность его недостаточна. Низкую чувствительность показывают функции плотности распределения вероятности параметров исправного и неисправного оборудования – они практически совпадают. Чувствительность вибродиагностик [3] выше, но регистрация вибросигнала слишком длительная процедура в условиях периода ППР [4].

Проблема локализации места неисправности (конкретизация дефекта) достигается за счет спектрального анализа диагностического сигнала. Показано, что в спектре сигналов вибрации и тока ЭМО проявляются гармоники дефектной детали [5]. Но на практике спектральный анализ тока ЭПА является трудоемкой почти не поддающейся автоматизации процедурой и используется для обоснования наличия неисправности, а не её конкретного места.

Место неисправности существующими системами если и определяются, то по сигналам вибрации, а не тока. При чем, штатные системы выдают список диагнозов с разной степенью вероятности, что затрудняет обслуживание оборудования.

Обслуживание оборудования АЭС в условиях 18-месячного топливного цикла выдвигает следующие требования [6] к методам обработки диагностической информации:

- повышение чувствительности;
- конкретизация дефекта;
- автоматизация получения результатов.

Желательно, чтоб указанные требования выполнялись при обработке электрических сигналов, а не виброакустических. В работах [6-8] показано, что повышение чувствительности возможно за счет извлечения из диагностических сигналов дополнительной информации, содержащейся в хаотической составляющей. Для анализа как детерминированной, так и хаотической информации, содержащейся в сигнале, предлагается использовать метод главных компонент (МГК) [9]. Разработаны алгоритмы обработки диагностических сигналов оборудования АЭС.

Обработка требует наличия сигнала заведомо исправного оборудования и (желательно) сигналов оборудования, неисправность которого известна. На предварительных этапах получают эталонный базис и проекции разных состояний в этом базисе. Потом на тот же базис проецируется сигнал оборудования, состояние которого надо установить [10-12].

Для демонстрации преимуществ предлагаемого подхода были проведены эксперименты в лабораторных условиях. Первая серия экспериментов была направлена на иллюстрацию повышения чувствительности. В рамках эксперимента в оборудование вносили дефекты и регистрировали сигналы тока. Затем сопоставляли плотности распределения параметров исправного и неисправного оборудования. Исходные распределения токовых параметров практически совпадали, что исключало обнаружение дефекта. Но за счет проецирования тех же параметров на главные компоненты (ГК) вероятности ошибок снизились до приемлемого уровня, в отдельных случаях даже до нуля. Таким образом, чувствительность токового метода явно повысилась.

Следующая серия экспериментов проводилась для иллюстрации избирательности предлагаемого подхода по отношению к разным видам дефектов. Эксперимент состоял в регистрации диагностических сигналов заведомо исправного оборудования и оборудования с заранее внесенными дефектами: обрывы штока, разные стадии искривления штока, дефект резьбы (рис. 1).

Полученные сигналы тока были предварительно обработаны штатными методами: выявлено, что при наличии дефекта увеличивается время срабатывания и несколько снижается плавность хода. Эти признаки позволяют предположить неисправность, но ничего не говорит о её причине.

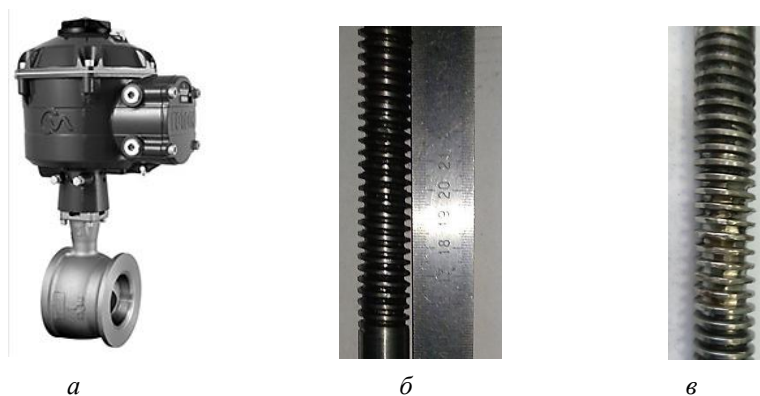


Рисунок 1 – Дефекты ЭПА: а – ЭПА б – искривление штока; в – дефект резьбы [Defects of electric valves: а – electric valves б – rod curvature; в – thread defect]

К тем же данным был применен предлагаемый алгоритм обработки. А именно, построен базис по сигналу исправной ЭПА; не него спроецированы сигналы арматуры, состояние которого известны; направления эталонного базиса выбраны так, чтоб проекции в нем различались; на тот же базис спроецирован сигнал условно неизвестного состояния (рис. 2).

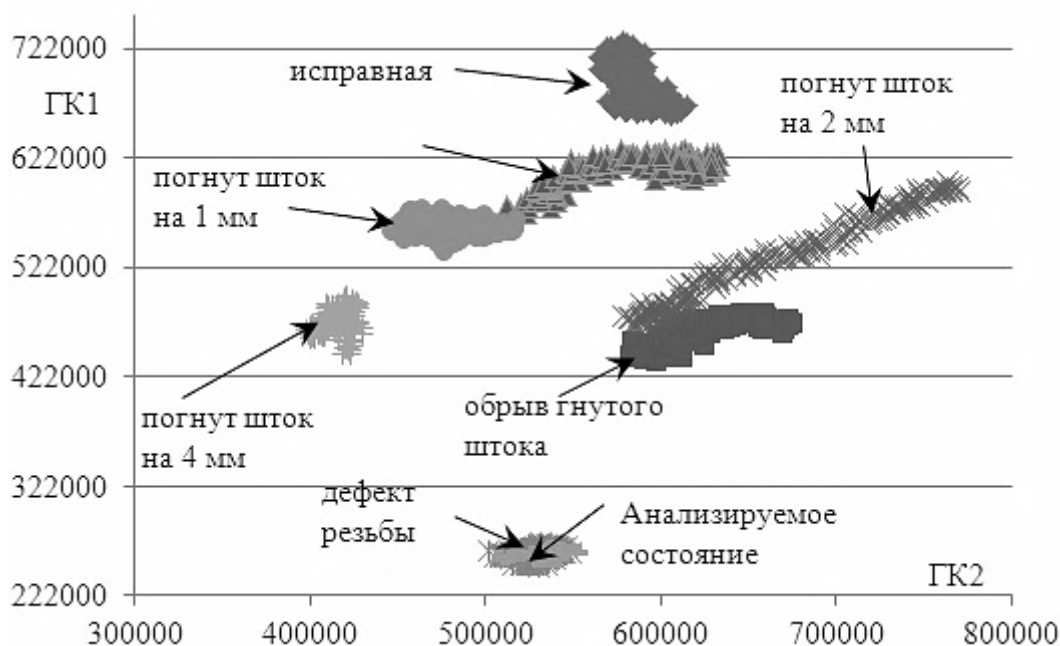


Рисунок 2 – Проекция электрических сигналов на ГК [Projections of electrical signals on the main components]

В рамках эксперимента анализируемое состояние известно, – шток погнут на 4 мм, – и оно явно идентифицируется по совпадению проекций. Очевидно, МГК является альтернативой спектральному анализу для решения задачи локализации.

В рамках НИОКР (выполняемых НИИ «Атомное энергетическое машиностроение» ВИТИ НИЯУ МИФИ) разработаны программы для идентификации состояния оборудования с известными образами состояния. Результат (соответствие одному из образов) вычисляется в процентах.

Использование алгоритма в отношении диагностики ЭПА является одним из приложений. Аналогичные результаты достигнуты при диагностике другого оборудования АЭС. Предлагаемый подход внедрен при разработке комплекса диагностирования дизель-генераторных установок и комплекса диагностирования электроприводного оборудования. Комплексы являются пилотными проектами и проходят опытную апробацию.

За счет внедрения подхода, основанного на МГК, планируется достигнуть повышения чувствительности диагностирования и избирательности по отношению к состоянию. А повышение качества диагностирования позволит выполнять ремонт оборудования по состоянию в необходимом объеме в условиях перехода АЭС на 18-месячный цикл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Москва, 2009.
2. Богданов, Е. А. Основы технической диагностики нефтегазового оборудования. – Москва : Высшая школа, 2006. – 279 с.
3. Рандалл, Р. Б. Частотный анализ / Р. Б. Рандалл; пер. с англ. Глоstrup. – Дания : К. Ларсен и сын, 1989.

4. Чернов, А.В. Обработка диагностической информации при оценке технического состояния электроприводной арматуры АЭС / А. В. Чернов, О. Ю. Пугачёва, Е. А. Абидова // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 3. – URL : ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/499.
5. Техническое диагностирование арматуры АЭС / С. В. Сейнов, А. И. Гошко, А. К. Адаменков и др. – Москва : Машиностроение (Библиотека арматурщика АЭС). – 2012. – 452 с.
6. Абидова, Е. А. Диагностирование электроприводной арматуры с использованием энтропийных показателей / Е. А. Абидова, Л. С. Хегай, А. В. Чернов, О. Е. Драка, О. Ю. Пугачева // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 4(21). – С. 69-77.
7. Xu, Y.G. Approximate Entropy and its applications in mechanical fault diagnosis, Information and Control / Y.G. Xu., L.L. Li, Z.J. He. – 31 (6) (2002). P. 547-551.
8. Немирко, А. П. Энтропийные методы оценки уровня анестезии по ЭЭГ-сигналу / А. П. Немирко, Л. А. Манило, А. Н. Калинин, С. С. Волкова // Управление в медицине и биологии. – 2010. – № 3. – С. 69-73.
9. Померанцев, А. Метод главных компонент (PCA) / А. Померанцев // Российское хеометрическое общество. – URL : <http://rcs.chemometrics.ru/Tutorials/pca.htm> (дата обращения: 21.05.2019).
10. Reza Golafshan, Kenan Yuce Sanliturk. SVD and Hankel matrix based de-noising approach for ball bearing fault detection and its assessment using artificial faults. Mechanical Systems and Signal Processing 70-71 (2016). P. 36-50.
11. Hussein Al Bugharbee and Trendafilova Irina. A methodology for fault detection in rolling element bearings using singular spectrum analysis. International Conference on Engineering Vibration 2017 (ICoEV 2017). 4-7 September 2017, Sofia, Bulgaria. URL: <https://strathprints.strath.ac.uk/62663>.
12. Леонтьева, Н. Л. Многомерная гусеница, выбор длины и числа компонент гусеницы / Н. Л. Леонтьева // Машинное обучение и анализ данных. – 2013. – Т. 1. – №5. – С. 5-15.

REFERENCES

- [1] GOST 20911–89. Texnicheskaya diagnostika. Terminy` i opredeleniya [Technical Diagnostics. Terms and Definitions]. Moskva [Moscow]. 2009 (in Russian).
- [2] Bogdanov E.A. Osnovy` texnicheskoj diagnostiki neftegazovogo oborudovaniya [Fundamentals of Oil and Gas Equipment Technical Diagnostics]. Moskva: Vysshaya shkola [Moscow, Higher School]. 2006. 279 p. (in Russian).
- [3] Randall R.B. Chastotny`j analiz [Frequency Analysis]. Copenhagen: Bruel & Kjaer; 3rd edition. 1989.
- [4] Chernov A.V., Pugachiova O. Yu., Abidova E.A. Obrabotka diagnosticheskoy informacii pri ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya elektroprivodnoj armatury AES [Processing of Diagnostic Information in Assessing the Technical Condition of the Electric Valves of Nuclear Power Plants]. Inženernyj vestnik Dona [Don Engineering Bulletin]. 2011. №3. 499 p. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2011/499 (in Russian).
- [5] Sejnov S.V., Goshko A.I., Adamenov A.K. et al. Tekhnicheskoe diagnostirovanie armatury AES [Technical Diagnostics of NPP Valves]. Moskva [Moscow]: Mashinostroenie. Biblioteka armaturshhika AE`S [Library of Fitter Nuclear Power Plant]. 2012 (in Russian).
- [6] Abidova E.A., Hegaj L.S., Chernov A.V., Draka O.E., Pugachiova O. Yu. Diagnostirovanie elektroprivodnoj armatury s ispol'zovaniem entropijnyh pokazatelej [Diagnostics of Valves with the Use of Entropy Indicators]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety] 2016. Vol. 4 (21), P. 69-77 (in Russian).
- [7] Y.G. Xu, L.L. Li, Z.J. He, Approximate Entropy and its applications in mechanical fault diagnosis Information and Control 31 (6) (2002). P. 547-551 (in Russian).
- [8] Nemirko A.P., Manilo L.A., Kalinichenko A.N., Volkova S.S. Entropijnye metody ocenki urovnya anestezii po EEG-signalu [Entropy Methods for Assessing the Level of Anesthesia by EEG Signal]. Upravlenie v medicine i biologii [Management in Medicine and Biology]. 2010. Vol. 3. P. 69-73 (in Russian).
- [9] Pomerantsev A. Metod glavnih komponent (PCA) [Principal Components Method (PCA)]. Rossijskoe hemometricheskoe obshchestvo [Russian Chemometric Society]. URL: <http://rcs.chemometrics.ru/Tutorials/pca.htm> (in Russian).
- [10] Reza Golafshan, Kenan Yuce Sanliturk. SVD and Hankel matrix based de-noising approach for ball bearing fault detection and its assessment using artificial faults. Mechanical Systems and Signal Processing 70-71 (2016). P. 36-50.

- [11] Al Bugharbee H., Trendafilova I. A methodology for fault detection in rolling element bearings using singular spectrum analysis International Conference on Engineering Vibration. 2017 (ICoEV 2017). URL: <https://strathprints.strath.ac.uk/62663>.
- [12] Leont'eva N.L. Mnogomernaya gusenica, vybor dliny i chisla komponent gusenicy [Multidimensional Caterpillar, the Choice of Length and Number of Caterpillar Components]. Mashinnoe obuchenie i analiz danny`x [Machine Learning and Data Analysis]. 2013. Vol. 1, № 5. P. 5-15 (in Russian).

The Increase in the Sensitivity of Diagnostics of NPP Equipment in the Conditions of Transition to 18-month Fuel Cycle

E.A. Abidova

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

ORCID iD: 0000-0003-0258-5543

WoS Researcher ID: O-1870-2018

e-mail: e-abidova@mail.ru

Abstract – The paper raises the question of increasing the sensitivity of NPP equipment diagnostics due to the increase of the overhaul period. It is proposed to use the principal component approach. The results of an experiment indicating an increase in sensitivity and selectivity through the use of the proposed method are presented.

Keywords: diagnostics of valves, the method of principal components, sensitivity, selectivity.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039

СИНТЕЗ БЛОК-СХЕМЫ ПЕРЕНОСНОГО ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

© 2019 А.Е. Дембицкий*, Ю.П. Муха**, А.В. Чернов*, Е.А. Абидова*

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

***Волгоградский Государственный Технический Университет, Волгоград, Россия*

Для повышения чувствительности диагностирования дизель-генераторных установок и проведения комплексного анализа диагностических параметров предлагается создать переносной программно-технический комплекс диагностики дизель-генераторных установок атомных электростанций. В работе приводится синтез блок-схемы переносного программно-технического комплекса диагностики дизель-генераторных установок атомных электростанций.

Ключевые слова: резервная дизельная электростанция, комплексный анализ, вибродиагностика, тепловизионный контроль, анализ ультразвуковых параметров, синтез, переносной программно-технический комплекс.

Поступила в редакцию 29.10.2019

После доработки 11.11.2019

Принята к публикации 19.11.2019

В настоящее время существуют различные методы диагностики ДГУ АЭС РФ. В основном эти методы базируются на косвенных способах определения состояния оборудования [1]. Выявление диагностируемых параметров предусматривает использование закономерностей термогазодинамики, теорий ДВС, колебаний, акустики, химического и спектрального анализа и др.

Изучив решаемые задачи методов диагностирования можно сделать вывод, что для комплексного анализа дизель-генераторной установки может быть достаточно проведения 4х основных методов диагностики – это вибродиагностика, контроль ультразвуковых параметров, проведение тепловизионного контроля и снятия индикаторных диаграмм [2].

Состояние оборудования резервного питания систем АЭС характеризуется множеством различных параметров, которые зависят от исправности отдельных элементов и правильной настройки установки. Чтобы качественно и максимально подробно провести диагностику оборудования необходимо использовать комплексный подход. Нужно выбрать минимальное и достаточное количество методов диагностики, которыми можно получить данные характеризующие состояние оборудования.

Резервная дизельная электростанция (РДЭС) является одной из обеспечивающих систем безопасности АЭС и должна постоянно находиться в работоспособном состоянии. РДЭС предназначены для аварийного электроснабжения потребителей систем безопасности в режимах обесточивания. Обеспечение бесперебойной работы дизель-генераторного оборудования АЭС является вопросом безопасности атомной энергетики и своевременной и качественной диагностики [3].

Дизельные двигатели – разновидность поршневых двигателей внутреннего сгорания [4], отличающиеся тем, что воспламенение в цилиндрах происходит за счет сжатия топливовоздушной смеси.

В основе работы дизелей может лежать четырехтактный либо двухтактный цикл. В первом случае два оборота коленчатого вала осуществляются за счет следующих событий: 1) впуск воздуха в цилиндр через впускной клапан при перемещении поршня вниз; 2) сжатие воздуха при перемещении поршня вверх и подача топлива от ТНВД через форсунки; 3) воспламенение и ход поршня вниз за счет расширения воспламенившейся смеси; 4) выпуск отработавших газов из цилиндра через открытый выпускной клапан при перемещении поршня вверх.

Если дизель двухтактный, для совершения одного оборота коленчатого вала должны реализоваться следующие действия: 1) удаление за счет открытия выпускных окон (в стенке цилиндра) продуктов горения и почти одновременно впуск воздуха в цилиндр через впускные окна при перемещении поршня вверх, впрыск топлива; 2) воспламенение и ход поршня вниз за счет расширения воспламенившейся смеси. Пример четырехтактного цикла дизеля схематично изображен на рисунке 1.

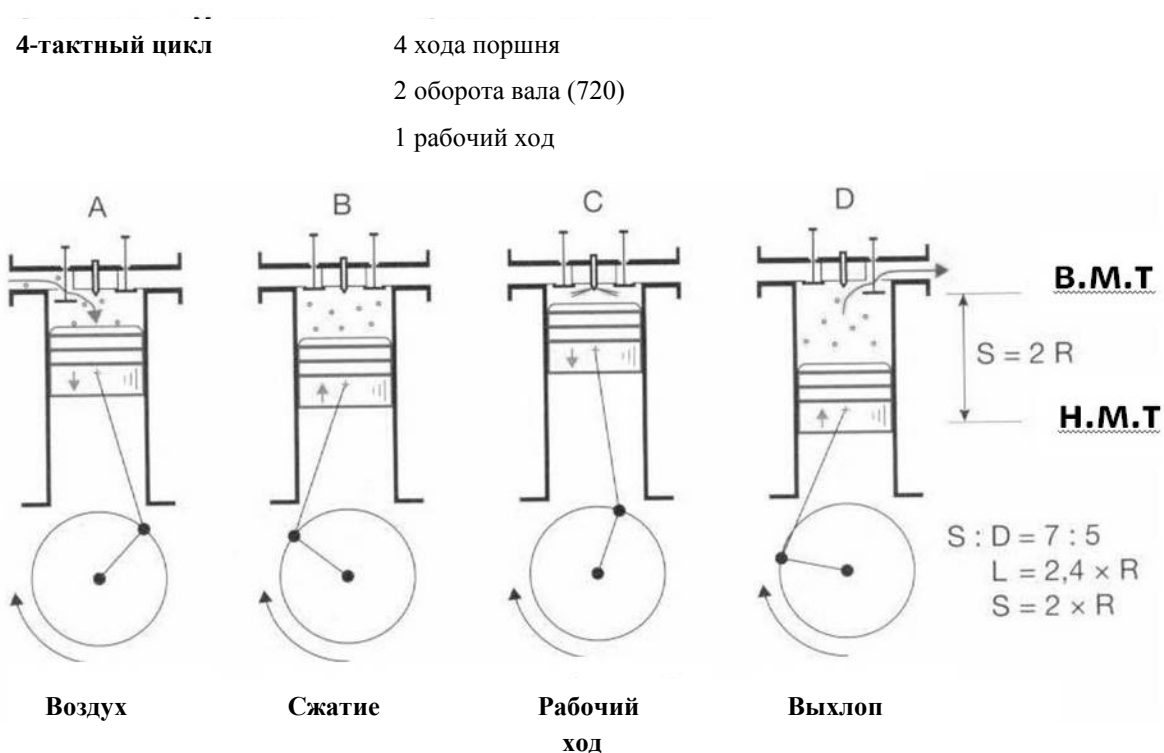


Рисунок 1 – Четырехтактный цикл дизеля [Four stroke diesel cycle]

Очевидно, работа дизелей обеспечивается правильным функционированием топливной аппаратуры, – ТНВД и форсунок, – и исправностью цилиндропоршневой группы. Неправильная настройка, например, кулачков ТНВД или износ резиновых колец, уплотняющих впускные окна, приводит к неравномерности вращения коленчатого вала и, как следствие, ухудшению качества вырабатываемой электроэнергии, повышенному расходу топлива, преждевременному износу. Пример двухтактного цикла дизеля схематично изображен на рисунке 2.

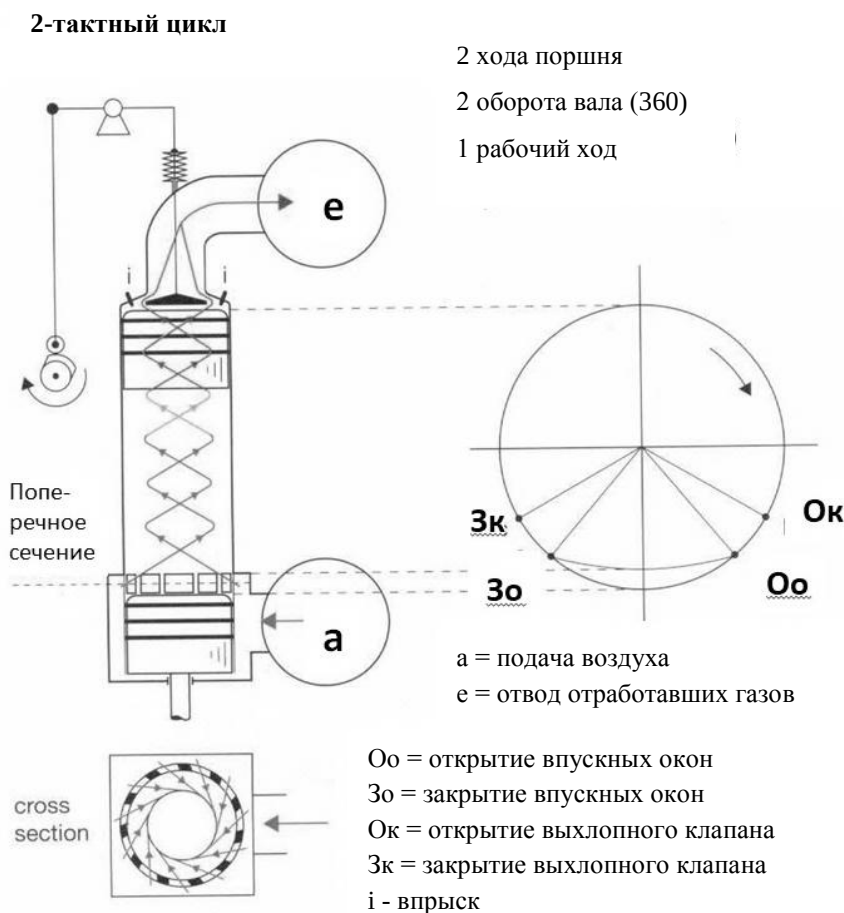


Рисунок 2 – Двухтактный цикл дизеля [Push-pull diesel cycle]

Таким образом, при диагностировании любого дизеля контролю (при условии доступности) должны подвергаться следующие элементы конструкции: ТНВД, форсунки, цилиндры, подшипники коленчатого вала, подшипники ГТН, насосов воды и масла [5].

Генераторы представляют собой синхронные машины, состоящие из неподвижного статора и вращающегося в подшипниках ротора. Как во всех синхронных машинах, ротор представляет собой электромагнит, питающийся постоянным током через щеточно-коллекторный аппарат [6]. Исправность электрической машины определяется в первую очередь состоянием обмоток статора и подшипников. При эксплуатации синхронных машин зачастую возникают сложности с щеточно-коллекторным питанием ротора, которое необходимо контролировать.

В соответствии с решением задачи структурирования необходимо определить все информационные потоки, которые характеризуют номинальное функционирование объекта (в данном случае ДГУ).

На основании исследования фазового пространства и в соответствии с классификацией ИИС, изложенной в [7], синтезируемый программно-технический комплекс относится к многоканальным многопараметрическим системам. Учитывая, что диагностический процесс выполняется на основе анализа трендов четырех векторных параметров: вибраций, ультразвуковых колебаний, тепловых векторных полей и индикаторных диаграмм давлений в цилиндрах двигателей, целесообразно представить информационные потоки в форме совокупности обобщенных категорных отображений, которые учитывают процесс образования параметрического потока на контролируемом объекте с помощью объекта-множества.

В данном случае все компоненты совокупности обобщенных категорий отличаются большим количеством существенных параметров объекта измерений (ДГУ) и числом мер, определяющих фазовое пространство объекта, поэтому следует реализовать поэтапный структурный синтез ППТК [8].

Начальная структура измерительного комплекса [7] имеет вид, отображенный на рисунке 3.

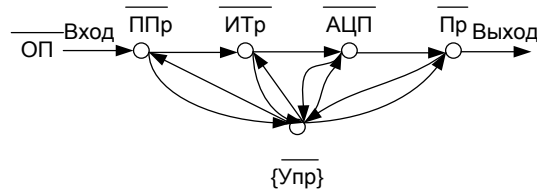


Рисунок 3 – Начальная структура ППТК [The initial structure of the software and hardware complex]

Для раскрытия содержания функтора (3) необходимо учесть использование большого числа функциональных преобразований. В их состав входит модуль взаимодействия, настройки и управления комплексом, содержащий submodule экспресс – анализа и визуализации с выводом результатов измерения на экран; составления маршрута обследования ДГУ с указанием точек измерения вибраций и областей измерения температуры; расчета тренда возможного изменения параметров технического состояния для прогнозирования остаточного ресурса ДГУ и оценки качества работы в межремонтный период.

В соответствии с идеологией проектирования сложных систем, изложенной в [8], сформируем граф структуры измерительного комплекса. Он имеет вид, отображенный на рисунке 4.

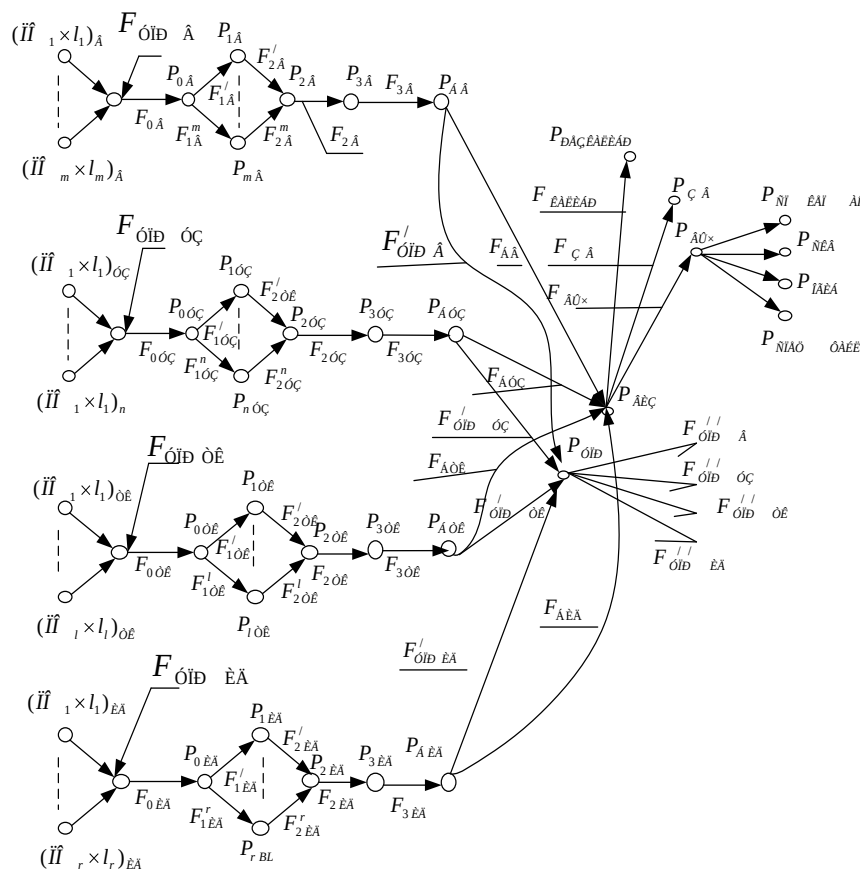


Рисунок 4 – Структурный (блочный) граф комплекса диагностики [Structural (block) graph of the diagnostic complex]

Полученный граф (см. рис. 4) представляет собой начальный вариант структурного (блочного) функционального распределения, который может быть реализован.

Последним шагом алгоритма синтеза оптимальной структуры за счет перераспределения исходной системы внутренних функций ПТК при условии сохранения внешней функции ПТК является построение результирующего графа, в качестве элементов которого используются компоненты множества наименьшей внешней устойчивости T_{min} а связи между элементами устанавливаются в соответствии со связями, существующими на исходном графе (в данном случае на графе (см. рис. 4). При этом поглощенные отображения восстанавливаются в виде петель у тех элементов, которые входят в состав множества T_{min} . С учетом этих замечаний результирующий граф имеет вид, отображенный на рисунке 5.

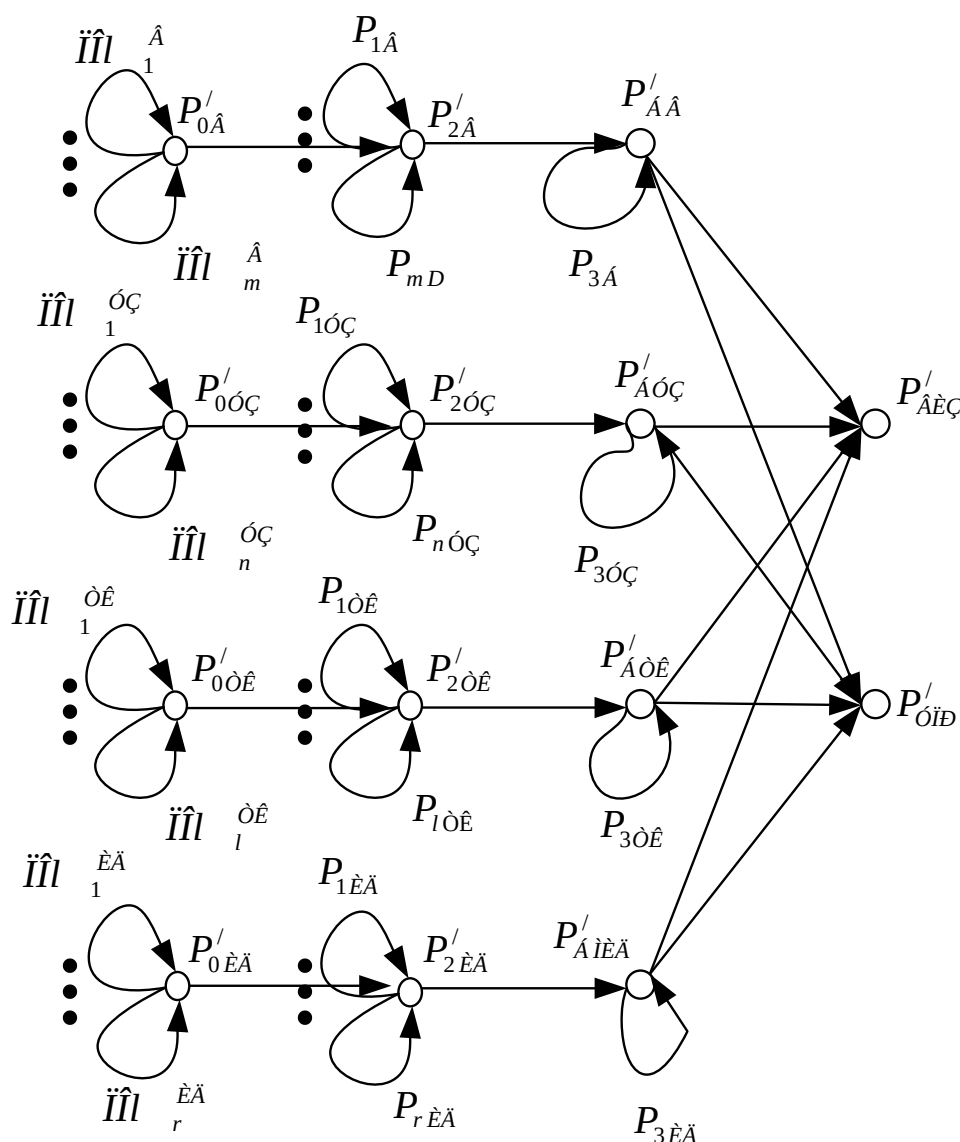


Рисунок 5 – Результирующий граф комплекса диагностики [The resulting graph of the diagnostic complex]

Окончательно на основании структуры, представленной на графе (см. рис. 5), строим блок-схему ПТК, изображенную на рисунке 6.

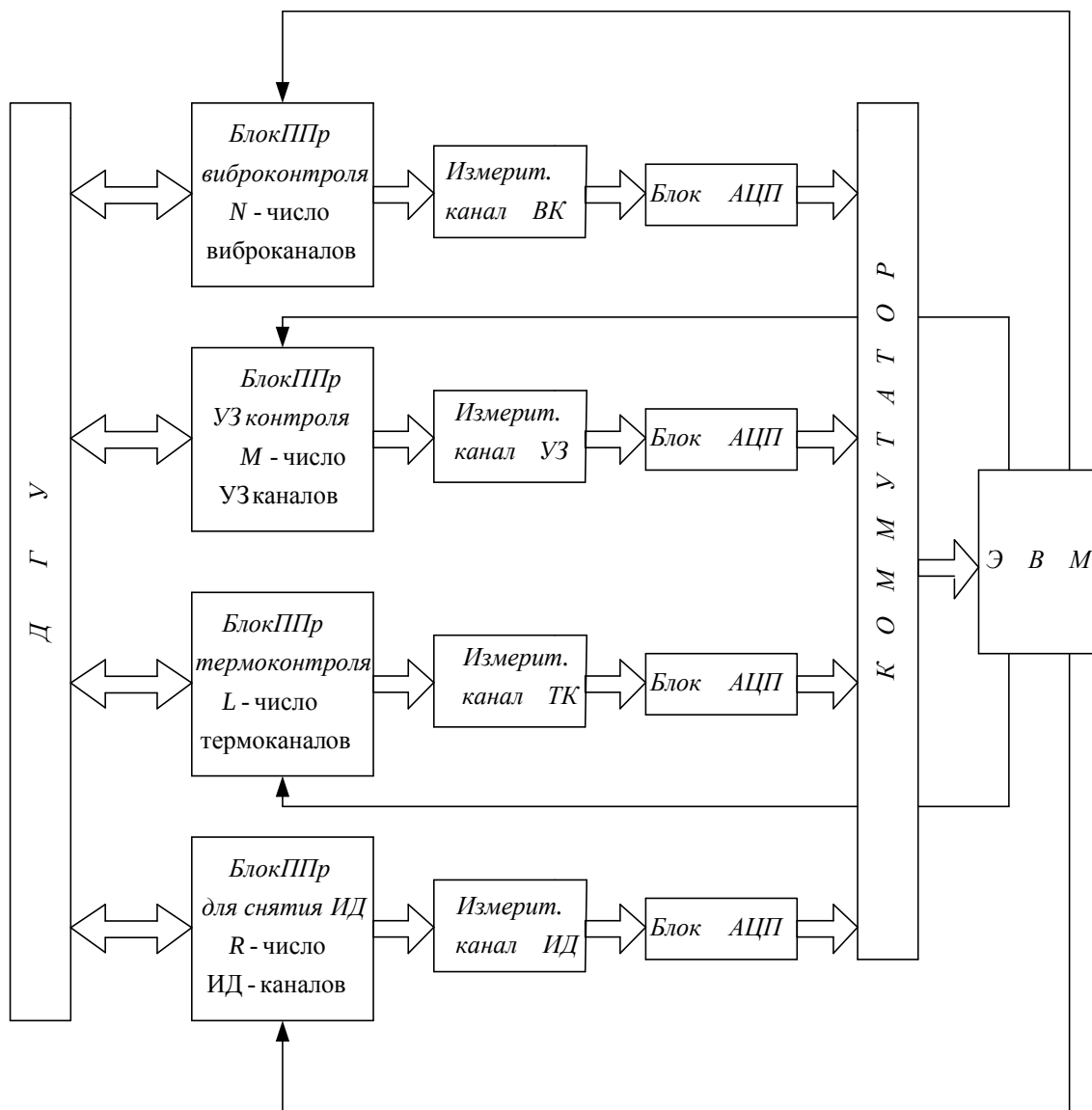


Рисунок 6 – Блок-схема программно-технического комплекса для диагностики состояния ДГУ [Block diagram of a software and hardware complex for diagnosing the condition of diesel generator units]

Особенностью этой блок-схемы является представление ПТКв виде подсистем. В данном случае особый интерес представляет структура алгоритма управления, которая определяется большим числом разнообразных типов и видов преобразований. При этом вектор управляющих преобразований $F_{УПР} (в, уз, тк, ид)$ должен реализовать следующие режимы: запись с визуализацией в режиме реального времени регистрации параметров; автоматическое определение количества активных каналов записи; обмен данными с блоком анализа и базой данных ПК; вычисление СКВ виброскорости; построение огибающей сигналов виброколебаний и просмотр ее в любой точке; формирование файла с указанием типа и обозначения работы ДГУ, реализуемой мощности, даты и времени проведения измерения; калибровка; обработка сигналов с привлечением спектрального и кепстрального видов анализа с визуализацией огибающей.

Для осуществления комплексного подхода к диагностированию ДГУ в соответствии с разработанной блок-схемой, нами был создан и успешно опробован программно-технический комплекс (рис. 7) [9-12].



Рисунок 7 – Переносной программно-технический комплекс диагностирования дизель-генераторных установок [Portable software and hardware complex for diagnostics of diesel generator units]

Данный комплекс предназначен для диагностирования дизель-генераторного оборудования безразборным способом в помещении дизель-генераторной установки АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диагностирование дизель-генераторного оборудования АЭС с использованием детерминированных и стохастических методов / Е. А. Абидова, Л. С. Хегай, А. В. Чернов [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 3(20). – С. 74-79.
2. Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Комментарии к федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15)»: приказ Ростехнадзора от 03.10.2018 N 486. – URL : www.consultant.ru (дата обращения: 15.11.2019).
3. Носов, В. В. Диагностика машин и оборудования / В. В. Носов. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2012. – 384 с.
4. Тихомиров, М. В. Разработка диагностического комплекса для электронной системы управления отечественных автомобильных дизелей / М. В. Тихомиров, С. В. Овчинников, Ю. Е. Хрящев // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2015. – № 1. – С. 142-148. – DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-142-148. – ISSN 0236-3941.
5. Возницкий, И. В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин. – Санкт-Петербург : Модерн, 2006.
6. Крашенинников, С. В. Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – 2013. – Выпуск № 2(12). – С. 59-68. – DOI: 10.15293/2226-3365. – ISSN 2226-3365.
7. Муха, Ю. П. Информационно-измерительные системы / Ю. П. Муха, И. Ю. Королева; ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – 167 с.

8. Муха, Ю. П. Алгебраическая теория синтеза сложных систем: монография / Ю. П. Муха, О. А. Авдеюк, И. Ю. Королева; ВолгГТУ. – Волгоград : РПК «Политехник», 2003. – 320 с.
9. Пугачева, О. Ю. Диагностика дизель-генератора 15Д-100 по показателям вибрации / О. Ю. Пугачева, А. К. Пугачев, В. И. Соловьев, Е. А. Абидова // Глобальная ядерная безопасность. – 2014. – № 2(11). – С. 91-97.
10. ГОСТ 31349-2007. Межгосударственный стандарт. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Измерение вибрации и оценка вибрационного состояния (введен в действие Приказом Ростехрегулирования от 24.01.2008 N 3-ст): Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. – Часть 9. Измерение и оценка механической вибрации. – URL : www.consultant.ru (дата обращения: 15.11.2019).
11. РД 153-34.0-20.364-00. Руководящий документ. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования (утв. РАО ЕЭС России 26.04.2000). – URL : www.consultant.ru (дата обращения: 15.11.2019).
12. ISO 10816-6:1995. Вибрация механическая. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 6. Машины с возвратно-поступательным движением номинальной мощностью свыше 100 кВт. – URL : www.consultant.ru (дата обращения: 15.11.2019).

REFERENCES

- [1] Abidova E.A., Hegay L.S., Chernov A.V. [i dr.] Diagnostirovanie dizel'-generatornogo oborudovaniya AE'S s ispol'zovaniem determinirovanny'x i stoxasticheskix metodov [Diagnostics of Diesel Generator Equipment of Nuclear Power Plants Using Deterministic And Stochastic Methods]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2016. № 3(20). P. 74-79 (in Russian).
- [2] Ob utverzhdenii rukovodstva po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoj e'nergii «Kommentarii k federal'ny'm normam i pravilam «Obshhie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomny'x stancij» (NP-001-15)»: prikaz Rostexnadzora ot 03.10.2018 N 486 [About the Statement of the Manual on Safety at Use of Atomic Energy "Comments to Federal Norms and Rules" General Provisions of Safety of Nuclear Power Plants" (NP-001-15)": the order of Rostekhnadzor of 03.10.2018 N 486]. – URL : www.consultant.ru (data obrashheniya [date accessed]: 15.11.2019) (in Russian).
- [3] Nosov V.V. Diagnostika mashin i oborudovaniya [Diagnostics of Machinery and Equipment: a Training Manual]. Lan', 2012. 384 p. (in Russian).
- [4] Tihomirov M.V. Razrabotka diagnosticheskogo kompleksa dlya elektronnoj sistemy upravleniya otechestvennyh avtomobil'nyh dizelej [Development of Diagnostic Complex for Electronic Control System for Domestic Automobile Diesel Engines]. Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie [Bulletin of MSTU. N.E. Bauman. Ser. Engineering]. 2015. № 1. P. 142-148. DOI: 10.18698/0236-3941-2015-1-142-148. ISSN 0236-3941 (in Russian).
- [5] Voznickij I.V. Povrezhdeniya i polomki dizelej. Primery i analiz prichin [Malfunctions and Breakdown of Diesel Engines. Examples and Analysis of Causes]. Saint-Petersburg. Modern 2006 (in Russian).
- [6] Krashenninnikov S.V. Sovremennye podhody k diagnostirovaniyu dizel'nyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya [Modern Approaches to the Diagnosis of Diesel Internal Combustion Engines]. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta [Bulletin of the Novosibirsk State Pedagogical University]. 2013. № 2 (12). P. 59-68. DOI: 10.15293/2226-3365. ISSN 2226-3365 (in Russian).
- [7] Muha Yu.P. Informacionno-izmeritel'nye sistemy [Information-Measuring Systems]. VolgGTU. [VSTU]. Volgograd. 2018. 167 p. (in Russian).
- [8] Muha Yu.P. Algebraicheskaya teoriya sinteza slozhnyh sistem: monografiya [Algebraic Theory of the Synthesis of Complex Systems: monograph]. VolgGTU [VSTU]. Volgograd : RPK «Politekhnik». 2003. 320 p. (in Russian).
- [9] Pugacheva O. Yu. Diagnostika dizel'-generatora 15D-100 po pokazatelyam vibracii [Diagnostics of the 15D-100 Diesel Generator by Vibration Indicators]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2014. № 2(11). P. 91-97 (in Russian).
- [10] GOST 31349-2007. Mezhgosudarstvennyj standart. Elektroagregaty generatornye peremennogo toka s privodom ot dvigatelya vnutrennego sgoraniya. Izmerenie vibracii i ocenka vibracionnogo sostoyaniya": (vведен в dejstvie Prikazom Rostekhnregulirovaniya ot 24.01.2008 N 3-st): Elektroagregaty generatornye peremennogo toka s privodom ot dvigatelya vnutrennego sgoraniya. CHast' 9. Izmerenie i ocenka mekhanicheskoy vibracii. [Interstate Standard. Generator Sets of

- Alternating Current Driven by an Internal Combustion Engine. Measurement of Vibration and Assessment of the Vibration State ": (entered into force by the Order of January 24, 2008 No. 3-st): Alternating Current Generating Units Driven by an Internal Combustion Engine. Part 9. Measurement and Evaluation of Mechanical Vibration]. URL: www.consultant.ru (in Russian).
- [11] RD 153-34.0-20.364-00. Rukovodyashchij dokument. Metodika infrakrasnoj diagnostiki teplomekhanicheskogo oborudovaniya" : (utv. RAO "EES Rossii" 26.04.2000). [Guidance Document. Methodology for Infrared Diagnostics of Thermomechanical Equipment ": (approved by RAO" UES of Russia "04/26/2000)] URL: www.consultant.ru (in Russian).
- [12] ISO 10816-6:1995. Vibraciya mekhanicheskaya. Ocenka sostoyaniya mashin po rezul'tatam izmerenij vibracii na nevrashchayushchihsya chastyah. CHast' 6. Mashiny s vozvratno-postupatel'nyim dvizheniem nominal'noj moshchnost'yu svyshe 100 kv. [Mechanical Vibration. Assessment of the Condition of Machines According to the Results of Measurements of Vibration on Non-Rotating Parts. Part 6. Machines with Reciprocating Motion with a Rated Power Exceeding 100 kW]. URL: www.consultant.ru (in Russian).

Synthesis of Block Diagram of Portable Software and Technical Complex for NPP Diesel Generator Unit Diagnostics

A.E. Dembitsky^{*1}, Yu.P. Mucha^{**2}, A.V. Chernov^{*3}, E.A. Abidova^{*4}

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

^{**} Volgograd State Technical University, etc. to them. Lenin, 28, (8442) Volgograd, Russia 400005

¹ORCID iD: 0000-0003-4616-621X

WoS Researcher ID: O-3133-2018

e-mail: demartev@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0003-0919-5732

Wos Researcher ID: M-4084-2015

e-mail: muxaup@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0003-2700-0898

Wos Researcher ID: G-3742-2017

e-mail: chernov.alexander47@mail.ru

⁴ORCID iD: 0000-0003-0258-5543

Wos Researcher ID: O-1870-2018

e-mail: e-abidova@mail.ru

Abstract – The article considers the creation of a portable software and hardware complex for diagnostics of diesel generator sets of nuclear power plants to increase the sensitivity of diagnosis of diesel generator sets and conduct a comprehensive analysis of diagnostic parameters. The work provides a synthesis of a block diagram of a portable software and hardware complex for diagnostics of diesel generator units of nuclear power plants.

Keywords: standby diesel power station, complex analysis, vibration diagnostics, thermal imaging control, analysis of ultrasonic parameters, synthesis, portable software and hardware complex.

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

УДК 330.101.8

**ВНЕДРЕНИЕ МОДЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ И
БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В СИСТЕМУ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
СОВРЕМЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
(НА ПРИМЕРЕ ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»)**

© 2019 И.Е. Лыскова

*Коми республиканская академия государственной службы и управления, Сыктывкар,
Республика Коми, Россия*

В статье актуализируются основные задачи современного менеджмента качества, обосновывается значимость эффективного управления человеческими ресурсами в аспекте стратегического развития организации, подчёркивается актуальность моделей устойчивого развития и бережливого производства как основы формирования системы экологической и социальной безопасности современной организации на примере Госкорпорации «Росатом».

Ключевые слова: организация, менеджмент качества, управление человеческими ресурсами, качество человеческих ресурсов, устойчивое развитие, бережливое производство, Госкорпорация «Росатом».

Поступила в редакцию 19.09.2019

После доработки 23.10.2019

Принята к публикации 31.10.2019

Стратегические цели современной экономической и социальной политики России обосновывают значимость эффективного управления человеческими ресурсами, создания благоприятных условий для развития и реализации инновационного потенциала сотрудников, повышения уровня их вовлечённости в производственные процессы организации, повышения мотивации трудовой деятельности, осознания ответственности за качество выполняемой работы. На протяжении ряда десятилетий задачи формирования рациональной системы качества менеджмента, мотивации и стимулирования трудовой деятельности не только не получают эффективного разрешения, но и обретают исключительную остроту в контексте неопределённости социально-экономических процессов как на глобальном, национальном, так и локальном уровне.

Функционирование современной организации требует обновления подходов к управлению человеческими ресурсами, признания исключительно значимой роли человеческого фактора в процессе обеспечения качества и безопасности производственных процессов, в том числе формирования системы экологической и социальной безопасности организации.

Модели устойчивого развития и бережливого производства представляют собой достаточно стройную и обоснованную философию организации и ведения бизнеса. Они включают в себя широкую совокупность аспектов жизнедеятельности организации, определяющих экономическую и социальную эффективность, специфику экологической и социальной безопасности, сущность социальной ответственности.

Модели устойчивого развития и бережливого производства, несмотря на универсальность задач, характеризуется особенностями политической, экономической и социокультурной системы, спецификой национальной трудовой культуры, экономикой и философией труда, характером экономического поведения человека, экономической природой личности, в целом качеством человеческих ресурсов конкретной организации. Качество человеческих ресурсов оказывает непосредственное влияние на качество бизнес-процессов, на потребителей, общество.

Зарождение концепций устойчивого развития и бережливого производства относится к началу 1970-х гг. Постепенно они выстроились в социально значимые модели развития общества. Отправной точкой закрепления гуманитарных, экологических, политических и социально-экономических целей устойчивого развития связывают с проведением в 1972 г. в Стокгольме Конференции ООН по проблемам защиты окружающей среды и необходимостью организации эффективной экологической политики на глобальном уровне. Концепция бережливого производства, изначально закрепившаяся в теории и практике японского бизнеса, вскоре получила широкое признание и новые интерпретации в западной модели менеджмента [1-9]. Осознание значимости ключевых концептуальных положений устойчивого развития и бережливого производства постепенно приходит и в российскую деловую культуру.

Одним из известных инструментов, направленных на повышение эффективности бизнес-процессов, считается модель совершенства Европейского фонда управления качеством (European Foundation for Quality Management, EFQM). Эта модель ориентирована на формирование эффективной организационной структуры и мощной системы менеджмента качества. Фундаментальными показателями качества согласно этой модели признаны:

- лидерство и целеустремлённость в достижении целей;
- менеджмент на основе процессов и фактов;
- профессиональное развитие сотрудников и их вовлечённость;
- постоянное обучение, инновации и совершенствование;
- развитие партнёрств;
- корпоративная социальная ответственность [10-12].

Модели устойчивого развития и бережливого производства стоит создавать именно на основе системы управления качеством. В целом система управления качеством обеспечивает совершенствование организационных структур и бизнес-процессов. Ключевыми факторами модели качества (совершенства) признаны пять организационных структур: лидерство, политика и стратегия, персонал, партнёрства и ресурсы, процессы. Результатами внедрения модели качества считаются следующие функциональные зоны: результаты для потребителей, результаты для персонала, результаты для организации, результаты для общества. Выделенные структура и показатели качества непосредственным образом обеспечивают достижение целей устойчивого развития и бережливого производства [13-15].

Согласно целям и стандартам устойчивого развития и бережливого производства формируется новая стратегия и философия современного бизнеса [16]. Перспективы организации выстраиваются на представлении бизнеса как потока создания ценности для потребителя, гибкости, выявлении и сокращении потерь, постоянном улучшении всех видов деятельности на всех уровнях организации, вовлечении и развитии персонала с целью повышения удовлетворённости потребителей и других заинтересованных сторон. Объединяющими ценностями устойчивого развития и бережливого производства являются безопасность; ценность для потребителя, в том числе качество продукции, процессов, систем; клиентоориентированность; сокращение потерь; время; уважение к человеку и обществу.

В качестве положительного примера внедрения моделей устойчивого развития и бережливого производства как основы системы экологической и социальной безопасности современной организации стоит признать производственную систему Госкорпорации «Росатом». Атомная отрасль России представляет собой мощный комплекс из более чем 300 предприятий и организаций, в которых занято свыше 250 тыс. человек. Динамичное, устойчивое развитие атомной отрасли следует считать одним из основных условий обеспечения национальной безопасности, энергетической независимости государства и стабильного роста экономики страны.

Основные тенденции развития организации определяются миссией, стратегическими целями и системой ценностей организации. Гуманистическая сущность миссии Госкорпорации «Росатом», в том числе с позиций экологической и социальной безопасности, очевидна: «Обеспечить мир чистой, безопасной, доступной энергией и инновациями на основе атомных технологий».

В перспективе до 2030 г. Госкорпорацией «Росатом» определены следующие долгосрочные стратегические цели:

- повышение доли присутствия на международных рынках и обеспечение лидерства на мировом рынке атомной энергетики;
- снижение себестоимости продукции и сроков протекания процессов;
- разработка и реализация новых продуктов для российского и международных рынков.

Организация системы устойчивого развития и бережливого производства в Госкорпорации «Росатом» как на глобальном, так и отраслевом уровне, обоснована существенными преимуществами самой атомной энергии.

Как отмечают специалисты, в течение следующих 50 лет человечество будет потреблять энергии больше, чем было израсходовано за всю предыдущую историю. Сделанные ранее прогнозы о темпах роста энергопотребления не оправдались: оно растет намного быстрее. Ожидается, что к 2030 г. оно увеличится на 33% по сравнению с 2016 г. и составит 32,9 трлн. кВт·ч. Наибольший рост придется на Азию, где потребление электроэнергии вырастет в 1,5 раза (с 10,8 до 16,4 трлн кВт·ч). Прогнозы о развитии новых энерготехнологий также не оправдались. Новые источники энергии заработают в промышленном масштабе и по конкурентоспособным ценам не ранее 2030 года. Остро обозначилась проблема нехватки и последствий использования ископаемых энергоресурсов. Крайне опасным является «парниковый эффект», что требует существенных ограничений на сжигание нефти, газа и угля на тепловых электростанциях. Мировой уровень выделяемого углекислого газа составляет около 32 млрд тонн в год и продолжает расти. Прогнозируется, что к 2030 г. объем выделяемого углекислого газа превысит 34 млрд. тонн в год [17].

Решением глобальных экологических и энергетических проблем человечества способно стать активное развитие ядерной энергетики. Ключевыми преимуществами ядерной энергетики являются огромная энергоемкость, возможность повторного использования ядерного топлива, значительное снижение «парникового эффекта», широкие возможности для развития экономики, повышения качества жизни населения и обеспечения социального благополучия.

Неотъемлемой частью корпоративной культуры, определяющей качество бизнес-процессов, в том числе и систему менеджмента качества человеческих ресурсов, следует признать комплексную систему ценностей организации, закрепляющих цели и задачи непрерывного, долгосрочного, инновационного развития и решения энергетических проблем человечества; признания ответственности за результат, эффективность производственных процессов; безопасность для людей и окружающей среды, как наивысший приоритет и др. Производственная система «Росатома» характеризуется как «культура бережливого производства и система непрерывного

совершенствования процессов для обеспечения конкурентного преимущества на мировом уровне». В основе производственной системы лежат принципы, которые призывают сотрудников быть внимательными к требованиям заказчика; решать проблемы на месте их возникновения; встраивать качество в процесс, не производить брак; выявлять и устранять любые потери (излишние складские запасы, межоперационные заделы, время простоя, лишние перемещения и т.д.); быть примером для коллег.

Госкорпорация «Росатом» является социально ответственной компанией, деятельность которой оказывает существенное экономическое влияние на комплексные задачи социально-экономического развития Российской Федерации. За счет получаемых от Госкорпорации «Росатом» средств финансируется значительный объем социально-экономических инициатив в регионах Российской Федерации в разных сферах жизнедеятельности: экологии, здравоохранении, спорте, культуре, образовании, социальной защите.

Формирование современной модели бережливого производства Госкорпорации «Росатом» происходит на основе стратегической модели устойчивого развития. В 2015 г. ООН были закреплены стратегические направления деятельности мирового сообщества в области всеобщего благополучия. Стратегия устойчивого развития на период до 2030 г. предполагает широкий круг задач, направленных на повышение качества жизни населения, в частности: ликвидацию нищеты и голода, создание условий для поддержания хорошего здоровья и благополучия, повышение качества образования, обеспечение гендерного равенства, расширение возможностей для достойной работы, охрану окружающей среды и формирование благоприятных условий для проживания человека, развитие социальной инфраструктуры, внедрение эффективных производственных инноваций, в том числе и в сфере безопасной, недорогостоящей, чистой энергии, развитие партнёрства и международного сотрудничества в интересах устойчивого развития и др.

Как отметил Генеральный директор Госкорпорации «Росатом» А. Лихачёв, «деятельность Госкорпорации «Росатом» вносит большой вклад в устойчивое развитие общества: мы улучшаем жизнь людей и создаем новые возможности, сохраняя природу и окружающую среду. Мы обеспечиваем мир чистой, безопасной, доступной энергией и инновациями на основе атомных технологий. Работая в более 50 странах по всему миру, мы участвуем в развитии общества в экономической, экологической и социальной сферах. Сооружение атомных станций содействует экономическому росту, занятости населения и развитию инфраструктуры. Создавая новые продукты, за счет внедрения инновационных технологий мы улучшаем качество жизни людей. Такими направлениями деятельности уже стали ядерная медицина и ветроэнергетика, проекты в сфере цифровой экономики. Мы работаем над повышением собственной эффективности, чтобы иметь возможность увеличивать заработную плату, налоговые отчисления, реализовывать социальные и благотворительные программы на территориях деятельности предприятий «Росатома» [18].

В сфере устойчивого развития у Госкорпорации «Росатом» накоплен значительный опыт. Сегодня требуется его систематизация и определение перспектив дальнейшего развития. Стоит заметить, что опираясь на опыт зарубежных коллег и, принимая требования обеспечения устойчивого развития Госкорпорация «Росатом» ориентируется на значимость прогресса по ключевым индикаторам ESG-деятельности, то есть в сфере экологии и окружающей среды (E – Environment), социальных эффектов (S – Social), качества системы управления (G – Governance). Одновременно с работой по повышению качества ESG-профиля, «Росатом» ориентирован на поддержание открытого диалога с широким кругом стейкхолдеров, в числе которых заказчики,

финансовые институты, бизнес-партнеры, сотрудники отрасли и местное население, представители органов власти.

Целенаправленная комплексная работа по устойчивому развитию выстроилась в единую систему отраслевого регулирования и стандартов деятельности. Практически все утверждённые Госкорпорацией нормативные документы в области устойчивого развития связаны с системой экологической и социальной безопасности. К числу указанных документов относятся:

- Единая отраслевая экологическая политика (2008 г.),
- Единая отраслевая социальная политика (2013 г.),
- Кодекс этики и служебного поведения (2016 г.),
- Единая отраслевая политика в области публичной отчетности (2009 г.),
- Методические рекомендации по ведению благотворительной деятельности (2010 г.),
- Единый отраслевой стандарт закупок (2009 г.),
- Единая отраслевая антикоррупционная политика (2015 г.).

Важно отметить, что наряду с реализацией государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» Госкорпорация «Росатом» включена в практику по реализации государственных целей и приоритетов в области устойчивого развития, зафиксированных в Указе Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». Основная работа Корпорации связана с реализацией четырёх национальных проектов – «Экология», «Цифровая экономика», «Комплексный план развития инфраструктуры» и «Повышение производительности труда». Кроме того, Госкорпорация «Росатом» является участником ряда мероприятий в национальных проектах «Образование», «Международная кооперация и экспорт», «Здравоохранение». Все указанные национальные проекты ориентированы на выполнение приоритетов устойчивого развития России.

Деятельность Госкорпорации «Росатом» по производству ядерной энергии, совершенствованию использования ядерных технологий неразрывно связаны с широкой совокупностью процессов, формирующих систему экологической и социальной безопасности организации.

В Госкорпорации «Росатом» реализуется комплексная социально ответственная экологическая политика. Основными принципами экологической политики признаны приоритетность сохранения естественных экологических систем; обязательность использования передовых научных достижений и обеспечения экологической безопасности; прозрачность и доступность информации об экологических аспектах деятельности предприятий атомной отрасли для широкой общественности. основополагающим нормативным документом в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности в атомной отрасли России является Единая отраслевая экологическая политика Госкорпорации «Росатом» и ее организаций.

Деятельность Госкорпорации «Росатом» осуществляется в соответствии с системой экологического менеджмента, закреплённого требованиями международного стандарта ISO 14001. С начала 2000-х годов происходит регулярное подтверждение соответствия этому стандарту в ходе ресертификационных аудитов. Кроме того, важно отметить, что с 2009 г. организации Госкорпорации «Росатом» реализуют практику публикации ежегодных отчетов по экологической безопасности. Эти отчёты содержат информацию о деятельности организаций в области реализации экологической политики, разработке и внедрению систем менеджмента и производственного экологического контроля, об охране окружающей среды и обеспечения экологической

безопасности, о взаимодействии с органами государственной власти, местного самоуправления, общественными экологическими организациями и др. [19].

Одним из значимых показателей результативности в области реализации стратегии устойчивого развития следует считать эффективность социальной политики Госкорпорации «Росатом». В основе реализации Единой отраслевой социальной политики закреплены принципы прозрачности, доступности и открытости. Приоритетные направления социальной политики Госкорпорации «Росатом» реализуются посредством корпоративных социальных программ, в том числе программы добровольного медицинского страхования работников; добровольного страхования от несчастных случаев и болезней; санаторно-курортного лечения работников и их детей, детского отдыха; оказания помощи работникам в улучшении жилищных условий; оказания помощи работникам; поддержки неработающих пенсионеров; организации спортивных и культурных мероприятий; организации питания; негосударственного пенсионного обеспечения.

Существенное внимание уделяется задачам эффективного управления человеческим капиталом организации. В этом плане предусмотрена деятельность, направленная на привлечение и удержание молодых и высококвалифицированных специалистов, повышение имиджа и привлекательности работодателя, обеспечение высокого уровня лояльности работников, формирование системы социальной защиты и социальной поддержки работникам, членам их семей, ветеранам атомной отрасли. Особое внимание уделяется задачам повышения безопасности труда, в том числе по сокращению производственного травматизма и снижению уровня воздействия на персонал вредных производственных факторов. Важно заметить, что система охраны и безопасности труда соответствует требованиям системы менеджмента промышленной безопасности и охраны труда международного стандарта OHSAS 18001. Исключительно важное значение отводится развитию человеческого потенциала, системе мотивации и стимулирования трудовой деятельности, созданию условий для обучения, продвижения и карьерного роста персонала.

Согласно официальным данным в 2018 г. в Госкорпорации «Росатом» и ее организациях работало 255,4 тыс. человек (в том числе в зарубежных организациях – 1,8 тыс. человек), из них 66% мужчин, 34% женщин.

Количество сотрудников по категориям персонала:

- руководители – 31,72 тыс. человек,
- специалисты – 102,69 тыс. человек,
- служащие – 10,37 тыс. человек,
- рабочие – 110,59 тыс. человек.

Количество сотрудников с высшим образованием – 137,1 тыс. человек (53,7% от общего числа сотрудников). Количество кандидатов и докторов наук – 3 353 человек (1,3% от численности). Средний возраст сотрудников составил 43,4 года (руководителей – 46,5 лет). Доля сотрудников в возрасте до 35 лет – 31,4%. Коэффициент текучести кадров по итогам 2018 г. составил 12,7% [19].

Основными целями социальной политики Госкорпорации «Росатом» являются: повышение привлекательности Госкорпорации «Росатом» как работодателя; привлечение и адаптация молодых и высокопрофессиональных специалистов; повышение лояльности сотрудников; повышение эффективности социальных расходов.

Например, в 2018 г. ключевыми результатами в области развития человеческого потенциала и социальной инфраструктуры стали следующие достижения:

- I место в рейтинге лучших работодателей России крупнейшего кадрового холдинга HeadHunter.
- I место в категории «Инжиниринг и производство» международного молодежного рейтинга Universum.

- Единственная госкомпания среди 8 лучших работодателей России по версии международной консалтинговой компании AON Hewitt.

- Гран-при в конкурсе по внедрению профессиональных стандартов Министерства труда и социальной защиты совместно с «Национальным агентством развития квалификаций» и «Всероссийским научно-исследовательским институтом труда».

- Международной премии Global Council of Corporate Universities в номинации «Лучший корпоративный университет» удостоена Корпоративная Академия Росатома.

- Четвертая победа в национальном чемпионате WorldSkills Hi-Tech.

- Среднемесячная заработная плата составила 79,0 тыс. руб. в месяц (+ 7,3% к 2017 году).

- Уровень вовлеченности сотрудников – 80%.

- 72% участников управленческого кадрового резерва получили назначение на новую руководящую должность.

- Более 400 сотрудников Госкорпорации «Росатом» и ее организаций удостоились государственных наград, почетных грамот, благодарностей Президента и Правительства РФ. 8,3 тыс. человек получили отраслевые награды [19-20].

Социальный пакет сотрудников и неработающих пенсионеров формируется в соответствии с Единой отраслевой социальной политикой, в основе которой лежат стандартизированные корпоративные социальные программы. Структура корпоративных социальных программ и расходы по ним определяются на основании приоритетов Корпорации в работе с персоналом:

- важности сохранения здоровья и трудового долголетия;

- дополнительной поддержки здоровья тех, кто работает в условиях труда, отклоняющихся от нормальных;

- сохранение и развитие традиций, сложившихся в Госкорпорации «Росатом»;

- реализации государственной политики, направленной на развитие массового спорта, дополнительного пенсионного обеспечения, поддержку семей с детьми, молодых специалистов, тех, кто попал в сложные жизненные ситуации, и пр.

Уникальным примером эффективной социальной практики Госкорпорации «Росатом» следует считать реализацию ряда проектов, направленных на повышение качества жизни и поддержку работников отрасли, жителей «атомных» городов, содействие общественным инициативам. К примерам таких проектов относятся:

- «Школа Росатома» – обеспечивает качественное образование независимо от места жительства, а также сохраняет и развивает уникальность муниципальных систем образования. В этом плане стоит отметить проект «Школьный технопарк»;

- «Бережливая поликлиника» – за счет применения инструментов политики социального развития повышает эффективность работы лечебно-профилактических учреждений и общую доступность медицинской помощи;

- «Умный дом» – проект, обеспечивающий экономию затрат на жилищно-коммунальные услуги;

- «Территория культуры Росатома» – знакомит с лучшими образцами искусства и поддерживает местные инициативы городов расположения объектов атомной отрасли.

Важно отметить широкий спектр направлений благотворительной деятельности Госкорпорации «Росатом». Что, безусловно, способствует позитивному имиджу организации.

Таким образом, стратегические планы организации, Госкорпорации «Росатом» в частности, обосновывают значимость внедрения новых подходов к теории и практике управления. Опыт по внедрению моделей устойчивого развития и бережливого производства приобретает исключительную значимость в условиях ограниченности ресурсов или необходимости их оптимизации [21-22]. Кроме того, внедрение в

широкую практику базовых положений устойчивого развития и бережливого производства требует глубокого качественного обновления человеческих ресурсов организации, закрепления новых ценностных приоритетов на всех уровнях – глобальном, национальном, локальном. Первостепенная роль в этом отношении отводится качеству менеджмента, способному обеспечить эффективное управление ресурсами и сведение к минимуму политических рисков в области достижения целей устойчивого развития мирового сообщества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Имаи, М.* Кайдзен: Ключ к успеху японских компаний / М. Имаи; перевод с английского; 8-е издание. – Москва : Альпина Паблишер, 2015. – 274 с.
2. *Омае, К.* Мышление стратега: Искусство бизнеса по-японски / К. Омае; перевод с английского; 4-е издание. – Москва : Альпина Паблишер, 2015. – 211 с.
3. *Лайкер, Дж.* Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Дж. Лайкер; перевод с английского. – Москва : Издательская группа «Точка», 2017. – 400 с.
4. *Кокинз, Г.* Управление результативностью: Как преодолеть разрыв между объявленной стратегией и реальными процессами / Г. Кокинз; перевод с английского. – Москва : Альпина Паблишер, 2016. – 316 с.
5. *Шервуд, Д.* Системное мышление для руководителей: Практика решения бизнес-проблем / Д. Шервуд; перевод с английского. – Москва : Альпина Паблишер, 2016. – 300 с.
6. *Адизес, И.* Управляя изменениями. Как эффективно управлять изменениями в обществе, бизнесе и личной жизни / И. Адизес; перевод с английского В. Кузина; 3-е издание. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 368 с.
7. *Джордж, М.* Бережливое производство + шесть сигм в сфере услуг. Как скорость бережливого производства и качество шести сигм помогают совершенствованию бизнеса / М. Джордж; перевод с английского Т. Гутман; 2-е издание. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 464 с.
8. *Трейси, Б.* Тайм-менеджмент по Брайану Трейси: как заставить время работать на вас / Б. Трейси; перевод с английского; 4-е издание. – Москва : Альпина Паблишер, 2015. – 302 с.
9. *Аппело, Ю.* Agile-менеджмент: Лидерство и управление командами / Ю. Аппело; перевод с английского. – Москва : Альпина Паблишер, 2018. – 534 с.
10. *Lyskova, I.* Quality of working life in the aspect of human resources management. Advances in Economics, Business, Management Research. Vol. 71. The 4th International Conference on Economics, Management, Law and Education (EMLE 2018) Atlantis Press, 2018, pp. 226-230. – URL : <https://www.atlantis-press.com/proceedings/-emle-18>.
11. *Lyskova, I.* The Japanese model of strategic management of human resources quality in a modern organization. Advances in Economics, Business, Management Research. Vol. 71. The 4th International Conference on Economics, Management, Law and Education (EMLE 2018) Atlantis Press, 2018, pp. 231-234. – URL : <https://www.atlantis-press.com/proceedings/-emle-18>.
12. *Lyskova, I.* Conceptual basis of the formation of organizational behavior quality in the condition of knowledge economy. Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Vol. 310. The 3rd International Conference on Culture, Education and Economic Development of Modern Society (ICCESE 2019) Atlantis Press, 2019, pp. 1873-1878. – URL : <https://www.atlantis-press.com/proceedings/-iccese-19>.
13. *Lyskova, I.* Socio-Cultural Aspect of Thriftiness. Advances in Economics. Business and Management Research. Vol. 20. 2nd International Conference on Economy, Management, Law and Education (EMLE 2016). Atlantis Press, 2016. pp. 152-154. – URL : www.atlantis-press.com/php/pub.php?publication=emle-16.
14. *Лыскова, И.Е.* Современная концепция бережливого производства в системе менеджмента качества человеческих ресурсов / И.Е. Лыскова // Социально-экономические, политические и исторические аспекты развития северных регионов России : материалы Всероссийской научной конференции (с международным участием), 17-18 октября 2018 г., Сыктывкар. – Сыктывкар: ГОУВО КРАГСИУ, 2018. – Ч. 2. – С. 76-80.
15. *Лыскова, И.Е.* Модель бережливого производства как основа системы экологической и социальной безопасности современной организации (на примере Госкорпорации «Росатом») / И.Е. Лыскова // Безопасность ядерной энергетики: тезисы XV-й Научно-практической конференции. – Волгодонск, 2019. – С. 117-119. – URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=39209882> (дата обращения: 09.09.2019).

16. Доклад о Целях в области устойчивого развития, 2019 г. [Электронный ресурс]. – URL : // [https:// www.un.org/sustainabledevelopment/ru](https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru) (дата обращения: 09.09.2019).
17. Официальный сайт ГК «Росатом». – URL : www.rosatom.ru (дата обращения: 09.09.2019).
18. Результаты устойчивого развития [Электронный ресурс]. – URL : // [https:// www.rosatom.ru](https://www.rosatom.ru) (дата обращения: 09.09.2019).
19. Итоги деятельности государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2018 год. Публичный годовой отчёт [Электронный ресурс]. – URL : // [https:// www.rosatom.ru](https://www.rosatom.ru) (дата обращения: 09.09.2019).
20. Лыскова, И.Е. Основные задачи формирования эффективных поведенческих моделей сотрудников в аспекте менеджмента качества человеческих ресурсов (на примере Госкорпорации «Росатом» / И.Е. Лыскова // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4(29). – С. 109-117.
21. Ухалина, И.А. Ключевые показатели эффективности как инструмент экономической безопасности предприятий ГК «Росатом» / И.А. Ухалина, Н.А. Ефименко, С.П. Агапова // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 1(22). – С. 102-112.
22. Ухалина, И.А. Управление эффективностью деятельности предприятий ГК «Росатом» на основе системы ключевых показателей эффективности / И.А. Ухалина, Н.А. Ефименко // Материалы XIII Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики» 31 мая – 2 июня 2017 г., ВИТИ НИЯУ МИФИ. – Волгоград, 2017. – URL : <http://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii> (дата обращения: 09.09.2019).

REFERENCES

- [1] Imai M. Kajdzen: Klyuch k uspehu yaponskix kompanij [Kaizen: the Key to the Success of Japanese Companies]. Perevod s anglijskogo; 8-e izdanie. Moskva : Al`pina Pablisher [Translated from English; 8th edition. Moscow : Alpina Publisher]. 2015. 274 p. (in Russian).
- [2] Omae K. My`shlenie stratega: Iskusstvo biznesa po-yaponski [Thinking Strategist: the Art of Business in Japanese]. Perevod s anglijskogo; 4-e izdanie. Moskva : Al`pina Pablisher [Translated from English; 4th edition. Moscow : Alpina Publisher]. 2015. 211 p. (in Russian).
- [3] Liker J. Dao Toyota: 14 principov menedzhmenta vedushhej kompanii mira [Tao Toyota: 14 Management Principles of the Leading Company in the World]. Perevod s anglijskogo. Moskva : Izdatel'skaya gruppа «Tochka» [Translated from English. Moscow: Tochka Publishing Group]. 2017. 400 p. (in Russian).
- [4] Kokins G Upravlenie rezul'tativnost`yu: Kak preodolet` razry`v mezhdub ob`yavlennoj strategiej i real`ny`mi processami [Performance Management: How to Bridge the Gap between the Declared Strategy and Real Processes]. Perevod s anglijskogo. Moskva : Al`pina Pablisher [Translation from English. Moscow : Alpina Publisher]. 2016. 316 p. (in Russian).
- [5] Sherwood D. Sistemnoe my`shlenie dlya rukovoditelej: Praktika resheniya biznes-problem [System Thinking for Managers: Practice of Solving Business Problems]. Perevod s anglijskogo. Moskva : Al`pina Pablisher [Translation from English. Moscow: Alpina Publisher]. 2016. 300 p. (in Russian).
- [6] Adizes I. Upravlyaya izmeneniyami. Kak e`ffektivno upravlyat` izmeneniyami v obshhestve, biznese i lichnoj zhizni [Managing Change. How to Effectively Manage Changes in Society, Business and Personal Life]. Perevod s anglijskogo V. Kuzina; 3-e izdanie. Moskva : Mann, Ivanov i Ferber [Translated from English by V. Kuzina; 3rd edition. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber]. 2016. 368 p. (in Russian).
- [7] George M. Berezhlivoe proizvodstvo + shest` sigm v sfere uslug. Kak skorost` berezhlivogo proizvodstva i kachestvo shesti sigm pomagayut sovershenstvovaniyu biznes [Lean Manufacturing + Six Sigma in Services. How the Speed of Lean Production and the Quality of Six Sigma Help Improve Business]. Perevod s anglijskogo T. Gutman; 2-e izdanie. Moskva : Mann, Ivanov i Ferber [Translated from English by T. Gutman; 2nd edition. Moscow: Mann, Ivanov and Ferber]. 2017. 464 p. (in Russian).
- [8] Tracy B. Tajm-menedzhment po Brajanu Trejsi: kak zastavit` vremya rabotat` na vas [Time Management by Brian Tracy: How to Make Time Work for You]. Perevod s anglijskogo; 4-e izdanie. Moskva : Al`pina Pablisher [English translation; 4th edition. Moscow: Alpina Publisher]. 2015. 302 p. (in Russian).
- [9] Appelo Yu. Agile-menedzhment: Liderstvo i upravlenie komandami [Agile-Management: Leadership and Team Management]. Perevod s anglijskogo. Moskva: Al`pina Pablisher [Translation from English. Moscow : Alpina Publisher]. 2018. 534 p. (in Russian).
- [10] Lyskova I. Quality of working life in the aspect of human resources management. Advances in Economics, Business, Management Research. Vol. 71. The 4 th International Conference on

- Economics, Management, Law and Education (EMLE 2018) Atlantis Press, 2018, pp. 226-230. URL : www.atlantis-press.com/proceedings/-emle-18.
- [11] Lyskova I. The Japanese model of strategic management of human resources quality in a modern organization. *Advances in Economics, Business, Management Research*. Vol. 71. The 4 th International Conference on Economics, Management, Law and Education (EMLE 2018) Atlantis Press, 2018, pp. 231-234. URL : www.atlantis-press.com/proceedings/-emle-18.
- [12] Lyskova I. Conceptual basis of the formation of organizational behavior quality in the condition of knowledge economy. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research*. Vol. 310. The 3rd International Conference on Culture, Education and Economic Development of Modern Society (ICCESE 2019) Atlantis Press, 2019, pp. 1873-1878. URL : www.atlantis-press.com/proceedings/-iccese-19.
- [13] Lyskova I. Socio-Cultural Aspect of Thriftiness. *Advances in Economics, Business and Management Research*. Vol. 20. 2nd International Conference on Economy, Management, Law and Education (EMLE 2016). Atlantis Press, 2016. pp. 152-154. URL : www.atlantis-press.com/php/pub.php?publication=emle-16.
- [14] Lyskova I. Sovremennaya koncepciya berezhlivogo proizvodstva v sisteme menedzhmenta kachestva chelovecheskix resursov [Modern Concept of Lean Production in the Quality Management System of Human Resources]. *Social'no-e'konomicheskie, politicheskie i istoricheskie aspekty` razvitiya severny`x regionov Rossii : materialy` Vserossijskoj nauchnoj konferencii (s mezhdunarodny`m uchastiem)*, 17-18 oktyabrya 2018 g., Sy`kty`vkar. – Sy`kty`vkar: GOUVO KRAGSIU, 2018. Ch. 2 [Social, Economic, Political and Historical Aspects of the Development of the Northern Regions of Russia: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference (with international participation), October 17-18, 2018, Syktyvkar. – Syktyvkar: GOVO of Krassio, 2018. Part 2]. P. 76-80 (in Russian).
- [15] Lyskova I. Model` berezhlivogo proizvodstva kak osnova sistemy` e`kologicheskoy i social`noj bezopasnosti sovremennoj organizacii (na primere Goskorporacii «Rosatom») [Model of Lean Production as the Basis of the System of Ecological and Social Security of the Modern Organization (on the example of the «Rosatom» State Corporation)]. *Bezopasnost` yadernoj e`nergetiki: tezisy` XV-j Nauchno-prakticheskoy konferencii. Volgodonsk* [Safety of Nuclear Power: Theses of the XVth Scientific and Practical Conference. Volgodonsk]. 2019. P. 117-119. URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=39209882> (in Russian).
- [16] Doklad o Celyax v oblasti ustojchivogo razvitiya, 2019 g. [Report on Sustainable Development Goals, 2019]. URL : // <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru>. – 09.09.2019 (in Russian).
- [17] Oficial`nyj sajtk GK «Rosatom» [The Official Website of the «Rosatom» State Corporation]. URL : www.rosatom.ru. – 09.09.2019 (in Russian).
- [18] Rezul`taty` ustojchivogo razvitiya [Results of Sustainable Development]. URL : // <https://www.rosatom.ru>. – 09.09.2019 (in Russian).
- [19] Itogi deyatel`nosti gosudarstvennoj korporacii po atomnoj e`nergii «Rosatom» za 2018 god. Publichnyj godovoj otchyot [Results of Activities of the «Rosatom» State Atomic Energy Corporation for 2018. Public annual report. Electronic resource]. URL : // <https://www.rosatom.ru>. – 09.09.2019 (in Russian).
- [20] Lyskova I. Osnovny`e zadachi formirovaniya e`ffektivny`x povedencheskix modelej sotrudnikov v aspekte menedzhmenta kachestva chelovecheskix resursov (na primere Goskorporacii «Rosatom») [The Main Tasks of Formation of Effective Behavioral Models of Employees in the Aspect of Quality Management of Human Resources (on the example of the «Rosatom» State Corporation)]. *Global`naya yadernaya bezopasnost`* [Global Nuclear Safety]. 2018. № 4(29). P. 109-117 (in Russian).
- [21] Ukhalina I.A., Efimenko N.A., Agapova S.P. Klyuchevy`e pokazateli e`ffektivnosti kak instrument e`konomicheskoy bezopasnosti predpriyatij GK «Rosatom» [Key Performance Indicators as a Tool for Economic Security of Rosatom Enterprises]. *Global`naya yadernaya bezopasnost`* [Global Nuclear Safety]. 2017. № 1 (22). P. 102-112 (in Russian).
- [22] Ukhalina I.A., Efimenko N.A. Upravlenie e`ffektivnost`yu deyatel`nosti predpriyatij GK «Rosatom» na osnove sistemy` klyuchevy`x pokazatelej e`ffektivnosti [Management Efficiency of the Enterprises of Rosatom State Corporation on the Basis of Key Performance Indicators]. *Materialy` XIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bezopasnost` yadernoj e`nergetiki» 31 maya – 2 iyunya 2017 g., VITI NIYaU MIFI. Volgodonsk* [Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference «Safety of Nuclear Energy» May 31-June 2, 2017, VITI MEPhI. Volgodonsk], 2017. URL : <http://nps.viti-mephi.ru/ru/arhiv-konferencii> (in Russian).

The Introduction of Models of Sustainable Development and Lean Production in Ecological and Social Safety System in Modern Organization (Using the Example of «Rosatom» State Corporation)

I.E. Lyskova

The Komi Republican Academy of State Service and Administration, Syktyvkar, Russia, 167000

ORCID ID: 0000-0003-2748-2794

WoS ResearcherID: T-1644-2018

e-mail: IrinaLyskova@mail.ru

Abstract – The article studies the main tasks of quality management. It settles the importance of effective human resources management in the aspect of strategic development of an organization. It emphasizes the necessity of sustainable development model and lean production model as a basis of ecological and social safety in a modern organization by the example State Corporation «Rosatom».

Keywords: organization, quality management, human resources management, human resources quality, sustainable development, lean production, State Corporation «Rosatom».

.

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

УДК [308+330.3]:621.039 (669)

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ ВОЗМОЖНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
В ФЕДЕРАТИВНОЙ РЕСПУБЛИКЕ НИГЕРИЯ**

© 2019 К. Орумо, А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В работе проводится анализ экономических, экологических и социальных проблем, оказывающих определённое влияние на развитие атомной энергетики в Федеративной Республике Нигерия. Было рассмотрено политическое устройство страны, демографические и религиозные особенности населения регионов, экология, общее состояние экономики, сельского хозяйства и промышленности Нигерии. Особое внимание в работе уделено нефтяной промышленности Нигерии, поскольку в настоящее время это самая развитая отрасль, обеспечивающая стране членство в ОПЕК. В работе показано, что для устойчивого развития экономики стране не хватает энергетических мощностей. Для решения этой проблемы проектируются гидроэлектростанции (далее – ГЭС) на реке Нигер, а также теплоэлектростанции (далее – ТЭС), работающие на газе, который добывается в дельте реки Нигер, планируется строительство атомной электростанции (далее – АЭС). В настоящее время население страны составляет 201 млн. человек и его численность продолжает быстро расти. В связи с этим для дальнейшего развития промышленности и сельского хозяйства правительство принимает решение ввести в строй две АЭС. Однако как строительству АЭС, так и их эксплуатации мешают частые военные конфликты в Нигерии, возникающие на различной основе: политической, межконфессиональной, межэтнической и экономической. В таких условиях довольно трудно проводить как строительство радиационно-опасных объектов, так и их эксплуатацию. В связи с этим возникает необходимость принимать повышенные меры безопасности по физической защите как специалистов, принимающих участие в строительстве радиационно-опасных объектов, так и непосредственно самих объектов.

Ключевые слова: Федеративная Республика Нигерия, политическое устройство, социально-экономическое положение населения, сельское хозяйство, промышленность, экология, преступность, условия строительства АЭС.

Поступила в редакцию 14.06.2019

После доработки 22.11.2019

Принята к публикации 28.11.2019

Введение

Интенсивное развитие энергетики в мире в настоящее время тесно связано с экономическим ростом любого государства. Нигерия как одна из развивающихся стран, несмотря на экономический рост, тоже испытывает трудности, связанные с отсутствием надёжного и эффективного энергообеспечения, поскольку последнее является необходимым условием экономического развития страны. Преодоление этой проблемы требует решения важных политических, экономических и социальных проблем. Ниже приведём краткую характеристику географического положения, природных ресурсов, состояния экономики и социального положения населения Нигерии.

Федеративная Республика Нигерия с 1 октября 1960 г. представляет собой независимое государство в Западной Африке на побережье Гвинейского залива

(бывшая британская колония). Геополитическое положение Нигерии представлено на рисунке 1.

Нигерия среди африканских стран обладает самой большой экономикой, но её энергетический сектор работает недостаточно эффективно. Это оказывает негативное влияние на развитие некоторых областей промышленности, сельского хозяйства и, в конечном итоге, на жизненный уровень населения. Ниже приведём краткую характеристику состояния экономики и социального положения населения Нигерии.



Рисунок 1 – Геополитическое положение Нигерии [The geopolitical position of Nigeria]

Численность населения Нигерии на начало 2019 г. составила чуть более 200 млн. человек, годовой прирост – 2,2 %, грамотность населения старше 15 лет – 68% (оценка 2003 г.). В настоящее время территория Нигерии разделена на 36 штатов, включая штаты Коги и Аква-Ибом, и одну федеральную столичную территорию (Federal Capital Territory).

В богатой нефтью Нигерии долгое время наблюдалась политическая нестабильность, коррупция, отсутствие развитой инфраструктуры и некомпетентность управления экономикой. Правительства, возникающие в Нигерии в результате военных переворотов¹, не смогли диверсифицировать экономику, чтобы избавить страну от её

¹ В период с 1966 по 1998 год в Нигерии имело место несколько военных переворотов (1966, 1975, 1976, 1983), в результате которых к власти приходили различные группы офицеров, представляющих интересы тех или иных групп населения. При «успешном» перевороте выбирался новый президент, при неуспешном - борьба продолжалась до победного конца, который, например, привёл к гражданской войне 1967-1970 гг. В 1993 году были проведены выборы, однако победившему на них Мошуду Абииле, этническому йоруба, военные, в основном представители северных этносов, исповедующих ислам, власть передать отказались. В 1998 году, в период подготовки выдвижения военного диктатора страны Сани Абачи в президенты, Абача умер, а сменивший его Абдусалам Абубакар передал всё-таки власть гражданским. Президентские выборы выиграл генерал в отставке, представитель христианской общины Олусегун Обасанджо. Был достигнут межконфессиональный консенсус, согласно которому на посту президента должны сменить друг друга представители мусульманской и христианской общины. С начала «нулевых» вспышки межэтнических конфликтов продолжают (2003, 2006, 2008), что, по-видимому, связано с тем, что с первой половины 2000-х и по настоящее время на территории Нигерии и соседних стран действует террористическая исламистская группировка «Боко Харам», которая выступает за принятие норм шариата и искоренение «атрибутов Запада» (светского образования, выборов и т. д.). В марте 2015 года прошли выборы, на которых победил Мохаммаду Бухари. 29 мая 2015 года Мохаммаду Бухари принял присягу в качестве нового президента Нигерии. В настоящее время вооружённые силы страны ведут боевые действия с боевиками радикальной группировки «Боко харам» в районе озера Чад. Военные перевороты в Нигерии - Military coups in Nigeria. URL: https://ru.qwertyu.wiki/wiki/Military_coups_in_Nigeria

полной зависимости от нефтяного сектора, который даёт 95 % валютных доходов и обеспечивает 80% доходной части государственного бюджета. В последние несколько лет правительство начало проводить реформы, в частности – приватизацию крупнейших нефтеперерабатывающих предприятий страны, и отменило регулирование властями цен на нефтепродукты. Правительство стимулирует развитие инфраструктуры в стране, особенно в агропромышленном секторе.

Валовый внутренний продукт (далее – ВВП) Нигерии в настоящее время составляет 375,8 млрд долл. США с ростом 2,4%, на душу населения в 2019 г. – 2,412 тыс. долларов. По данным Всемирного банка 84,5 % населения Нигерии живут всего на \$2 в день в условиях нехватки воды и электричества. По оценкам экспертов, в северо-восточных регионах 75 % населения живёт ниже уровня бедности (что примерно вдвое превышает показатель южных регионов страны). В сельском хозяйстве занято 70% работающих, в промышленности 10%, в сфере обслуживания 20%.

Промышленная разработка нефтяных месторождений в Нигерии началась в 1956 году. С 1971 г. Нигерия является членом ОПЕК. В 2007 г. занимала 8-е место по экспорту нефти в мире. Нефтяной сектор даёт Нигерии 14 % ВВП, до 95% экспортных доходов и обеспечивает до 80% доходов бюджета. Доказанные запасы нефти, по разным данным, оцениваются 25-36 млрд баррелей. 65 % добываемой нефти – это лёгкие сорта с низким содержанием серы. Основные экспортные сорта – Bonny Light и Forcados. Нигерия является одним из основных поставщиков нефти в Западную Европу и занимает пятое место по поставкам сырой нефти в США. Нефтедобычей занимаются совместные предприятия Национальной нефтяной компании Нигерии и транснациональных корпораций (Shell, ExxonMobil и др.). Однако с начала XXI века деятельности иностранных компаний препятствуют неправительственные вооруженные формирования, как например, Народные добровольческие отряды дельты Нигера, осуществляющие взрывы и захваты иностранных работников в заложники². В 2009 г. на фоне мировой рецессии, сообщалось³, что нападения нигерийских боевиков на нефтедобывающие сооружения оказывали существенное влияние на цены мирового нефтяного рынка. В 2014 г. Нигерия становится ведущим производителем нефти в Африке и страной с крупнейшей африканской экономикой (первой, в настоящее время, по величине экономикой в Африке) [3], обогнав ЮАР по размеру ВВП.

Согласно текущим оценкам численности населения Нигерия считается самой густонаселенной чернокожей страной в мире. Ситуация в стране считается критической, поскольку ее растущее население и его энергопотребление не отвечает развитию энергетики, низкий уровень которой серьезно влияет на экономику страны в целом, значительно замедляя развитие городских, сельских и пригородных инфраструктур. Глобальные энергетические прогнозы предусматривают, что в период с 2002 по 2025 г. потребности в энергии в мире могут возрасти более чем на 34%, а в развивающихся странах этот процент удвоится. Вместе с тем мощность производства электроэнергии в Нигерии снизилась с пикового уровня выработки ~ 4 517,6 мегаватт (МВт), зафиксированного в декабре 2012 г., до 3781,80 МВт в октябре 2013 г., а в настоящее время немного превышает 4000 МВт. Отчетные документы по выработке электроэнергии в стране показали, что, несмотря на то, что прогнозируемый пиковый уровень спроса в стране составлял 12 800 МВт электроэнергии, мощность действующих агрегатов электроэнергии составляла лишь не более 3559,46 МВт [4].

Нетрудно понять, что стоит за этими цифрами: слаборазвитая промышленность и сельское хозяйство, низкие зарплаты рабочих, низкий уровень образования,

² Нигерийские боевики дали западным нефтяным компаниям 48 часов, чтобы покинуть страну. URL: <https://polit.ru/news/2009/05/14/give/>

³ Комплексная характеристика Нигерии. URL: <http://stud24.ru/geography/kompleksnaya-harakteristika-nigerii/65506-212906-page2.html>; Экономика Нигерии: промышленность, сельское хозяйство, транспорт URL: <http://www.gecont.ru/articles/econ/nigeria.htm>

медицинского обслуживания и, как результат – низкий уровень жизни населения со всеми вытекающими последствиями.

Во всем мире электроэнергия рассматривается как наиболее широко используемая и относительно безопасная форма энергии. Это является основным требованием для экономического развития, национального развития, а также достижения целей в области развития, сформулированных в Декларации тысячелетия Нигерии (ЦРДТ)⁴ [5], и для обеспечения надлежащего уровня жизни. По мере роста населения Нигерии и расширения её экономики спрос на электроэнергию также увеличивается [6]. Если этот спрос не удовлетворяется должным образом, возникает дефицит предложения [7, 8]. Этот дефицит может принять кризисные масштабы и, оказать негативный характер на положение устойчивого развития государства в целом. Эта критичность заставила правительство рассмотреть возможность использования атомной энергии в стране, что позволило бы покрыть дефицит и удовлетворить, таким образом, ожидаемые потребности в электроэнергии [9, 10]. Однако прежде чем рассматривать вопрос развития атомной энергетики в Нигерии, приведём краткую характеристику альтернативных источников электроэнергии, таким как нефть, газ, гидроресурсы, которые также могут быть использованы в стране.

Достоинства и недостатки альтернативных источников и ядерной энергии

Как отмечалось выше, Нигерия является одной из крупнейших производителей нефти на африканском континенте и обладает значительными по величине запасами газа в мире, но при этом экономика страны является энергонедостаточной. Для решения энергетических проблем было решено привлечь инвестиции, что и дало положительный результат. Был объявлен тендер, в котором участвовала русская компания Рус Гидро и ряд других компаний. Рус Гидро стал победителем тендера на управление электростанциями в Нигерии.

Государственный министр энергетики страны Дариус Ишаку 26 сентября 2012 г. объявил выигравшие заявки на пять энергетических объектов африканской страны. Гидроэлектростанцией «Каинджи» на реке Нигер было поручено управлять компании Мейнстрим Энерджи, в которую входит РусГидро, несколько компаний из Нигерии, консорциум нигерийских, китайских и британских компаний. Кроме того, в Мамбиле будет реализован инженерный контракт, заключенный Нигерией с китайской государственной компанией China Civil Engineering Construction Corporation на строительство комплекса гидротехнических сооружений и гидроэлектростанции стоимостью 5,8 млрд. долларов.

Установленная в настоящее время мощность (включая недавно завершённые научные исследования производственных показателей (НИПП)) вырабатываемой электроэнергии составляет чуть более 8 ГВт, из которых используется только около 6 ГВт. На работу гидроэлектростанций (КПД ГЭС является наиболее высоким и составляет 92-95%) приходится около 1850 МВт, остальной баланс обеспечивается газовыми электростанциями (КПД современной электростанции, работающей на газе, составляет 55-60%). Таким образом, большинство новых энергетических проектов – это газовые электростанции, которые обеспечат дополнительную мощность в ближайшие годы. Гидропотенциал, к сожалению, также ограничен величиной 14 ГВт, которая может быть получена путем использования всех доступных гидроэнергетических источников.

⁴ 2000 г. «Декларация тысячелетия» ООН. В 2000 году под «Декларацией тысячелетия» ООН поставили свои подписи руководители 189 стран мира. В декларации тысячелетия выдвинуты 8 задач: ликвидация крайней нищеты и голода; обеспечение всеобщего начального образования; поощрение равенства между мужчинами и женщинами, расширение прав и возможностей женщин; сокращение детской смертности; улучшение охраны материнства; борьба с ВИЧ-СПИДом, малярией и другими заболеваниями; обеспечение экологической устойчивости; формирование глобального партнёрства в целях развития.

Угольные электростанции в настоящее время не разрабатываются по причине низкого КПД (34%) и загрязнения окружающей среды – шлаки, выбросы CO_2 , оксиды азота NO_x , двуокись серы SO_2 – это основные ингредиенты кислотных дождей и загрязнения окружающей среды [11]. В рамках энергообеспечения Нигерии рассматриваются и возобновляемые источники энергии солнца и ветра, но они не смогут внести существенный вклад в электроснабжение энергосистемы с базовой нагрузкой в обозримом будущем поскольку и те и другие пока не могут составить полноценную конкуренцию наиболее эффективным методам производства электроэнергии по причине их невысокой производительности, которая является следствием их низкого КПД⁵ [12, 13]. В этом суть проблемы в Нигерии, которая привела к разработке и реализации программы НП, запущенной в 2007 г. с единственной целью диверсификации базы генерации и постепенного снижения нагрузки на национальные ресурсы ископаемого топлива.

Ядерная энергетика, которую стремится развивать Нигерия, обладает уникальными возможностями для поддержки социально-экономического развития любой страны, поскольку она обладает сочетанием ряда преимуществ по сравнению с другими видами топлива, используемых различными предприятиями для производства электроэнергии. [14]. Атомные электростанции (АЭС) обладают высоким КПД (80%). Их доля в мировом производстве электроэнергии составляет 22%, но АЭС требуют повышенного внимания к проблеме безопасности, как на стадии проектирования, при строительстве, так и во время эксплуатации [15]. Малейшие отступления от строгих регламентов обеспечения безопасности для АЭС, чревато фатальными последствиями для всего человечества. Примером тому являются радиационные аварии на АЭС в Чернобыле 1986 г. и на японской АЭС Фукусима-1, возникшей после прохождения цунами, вызванного землетрясением в японском море в марте 2011 года.

Атомная энергия рассматривается как единственный источник энергии, который может заменить значительную часть ископаемых видов топлива (уголь, нефть и газ), которые сильно загрязняют атмосферу и способствуют парниковому эффекту. Это чистый, безопасный, надежный и конкурентоспособный источник энергии. Разумная комбинация энергосбережения и возобновляемых источников энергии для локальных применений низкой интенсивности и ядерной энергии для производства электроэнергии с базовой нагрузкой – единственный жизнеспособный путь развития экономики страны. Это проверенная технология, которая решает большинство энергетических потребностей развитых и развивающихся стран мира, например. США, Франции, Японии, России, Южной Кореи, Китая, Индии и т.д. Однако, кроме непосредственной опасности в случае радиационной аварии, использование АЭС сопровождается проблемами безопасности, связанными с утилизацией, захоронением или переработкой отработанного ядерного топлива, что требует крайне сложных технологий, которые могут себе позволить лишь некоторые страны, на территории которых расположены АЭС.

На протяжении многих лет Нигерия добивалась прогресса в достижении своей цели, развивая вспомогательные учреждения и инфраструктуру, необходимые для ее ядерной энергетической программы. Ожидается, что ядерная дорожная карта, разработанная Комиссией по атомной энергии Нигерии (NAEC), станет движущей силой национальной ядерной программы. Разработка и внедрение АЭС в рамках национальной программы производства электроэнергии рассматривается как ближайшая цель при решении задач расширения производственных мощностей и потребления электроэнергии [16]. Предполагают, что первая АЭС будет подключена к национальной энергосистеме к 2022 г., после того как Турция запустит в эксплуатацию

⁵ Эффективность КПД ветрогенератора: способы увеличения, конструкция и рабочие характеристики ветряка. URL: <https://energo.house/veter/kpd-vetrogeneratora.html>

свою первую атомную электростанцию [17]. Для решения этих задач Нигерия подписала соглашение с Госкорпорацией по атомной энергии «Росатом» (далее – ГК «Росатом») о строительстве АЭС после изучения рамочного соглашения в 2012 г., в котором указаны первоначальные обязанности сторон по реализации проектного соглашения. В настоящее время Росатом работает с Нигерией над двумя запланированными проектами: Центром ядерных исследований и технологий, по которому в 2016 г. было подписано соглашение о сотрудничестве в строительстве, и проектом АЭС, для которого были заключены соглашения по разработке проекта строительства и эксплуатации, подписанные в октябре 2017 года.

Федеральное правительство Нигерии (FGN) намеренно подчеркивает приверженность вопросу строительства атомных электростанций для выработки электроэнергии, поскольку признает, что реализация ядерно-энергетической программы является непростой задачей [18]. Регионы для возможного размещения АЭС приводятся на рисунке 2, и представляют собой область Герегу (GEREGU), которая находится в штате Коги, в непосредственной близости от Абуджи в районе Аджакута местного самоуправления штата Коги в северной центральной зоне страны, и область Иту (ITU) – в районе местного самоуправления Иту штата Аква-Ибом на южном побережье Нигерии в дельте реки Нигер, как показано на схематической карте. Область Герегу находится в зоне слияния рек Нигер и Бенуэ.



Рисунок 2 – Регионы для возможного размещения площадок под АЭС в Нигерии [Regions of the possible location of NPP sites in Nigeria]

Прежде чем перейти к исследованию возможного вклада атомной энергии в решение проблем устойчивого развития регионов, в которых предполагается расположение АЭС, проведем краткий анализ экологических, социальных и промышленных проблем, характеризующих положение населения, его занятость, условия работы и другие жизненные условия, характерные для Нигерии в целом, а также детально коснемся аналогичных вопросов в указанных регионах.

К экологическим проблемам Нигерии следует отнести деградацию почв, стремительное сокращение лесных площадей, что обусловлено стремительным ростом населения, загрязнение водной и воздушной сред в урбанизированных районах, в которых 90% всех загрязнений атмосферы производят автомобили, расширение пустынных площадей и почв вследствие разливов нефти, высокий темп урбанизации⁶. Отсутствие надлежащего мониторинга деятельности по физическому развитию в городских районах приводит к резкому ухудшению физической и социальной среды, что способствует росту числа проблем, связанных с активностью асоциальных представителей общества.

⁶ Проблемы окружающей среды в Нигерии. URL: <http://alisravni.ru/problems-okruzhayushhej-sredy-v-nigerii-d/>

Значительную проблему в Нигерии представляет серьезная антисанитария. Санитарные сооружения, такие как канализация, очистные сооружения, септики и туалеты для дома, в Нигерии в значительной мере неадекватны численности населения и ухудшаются в силу быстрого развития урбанизации в стране. Действительно, утилизация отходов, возможно, является наиболее серьезной экологической проблемой в городах Нигерии, и в столичных, и, что крайне важно, в бедных районах [19]. Жаркий климат усугубляет эту ситуацию, т.к. приводит к росту различных инфекционных заболеваний. Однако в вопросе экологии нельзя не заметить позитивных сдвигов. В Нигерии уже действуют государственные учреждения по экологии, в программах социально – экономического развития, принятых рядом развивающихся стран, появился тезис об эффективности природопользования.

Отсутствие стабильности в работе электрических сетей часто приводит к перебоям в подаче воды, что приводит к необходимости приобретения автономных электрогенераторов. В то же время, малообеспеченное население проживает в условиях полного отсутствия, как электричества, так и водопровода.

Система здравоохранения в стране развита крайне слабо, несмотря на наличие учебных заведений медицинского профиля, сохраняется острый дефицит кадров. Медицинскую помощь невысокого уровня можно получить только в платных частных клиниках, недоступных основному населению страны. Очевидно, что тяжёлые экономические условия, а также слаборазвитая система здравоохранения приводит к тому, что в стране крайне мало людей пожилого возраста. В Нигерии более 3% жителей заражены ВИЧ, в том числе детей, и по этому показателю страна занимает одно из первых мест в мире. Распространены здесь также малярия, гепатит, менингит, брюшной тиф, кишечные инфекции. Все это является следствием малообразованности населения и антисанитарии. В стране из тысячи младенцев умирают примерно 90, у мужчин средняя продолжительность жизни 46 лет, а у женщин – 48. Лишь 3% нигерийцев доживают до шестидесяти. Общая картина возрастного состава населения Нигерии представлена возрастной пирамидой на рисунке 3.

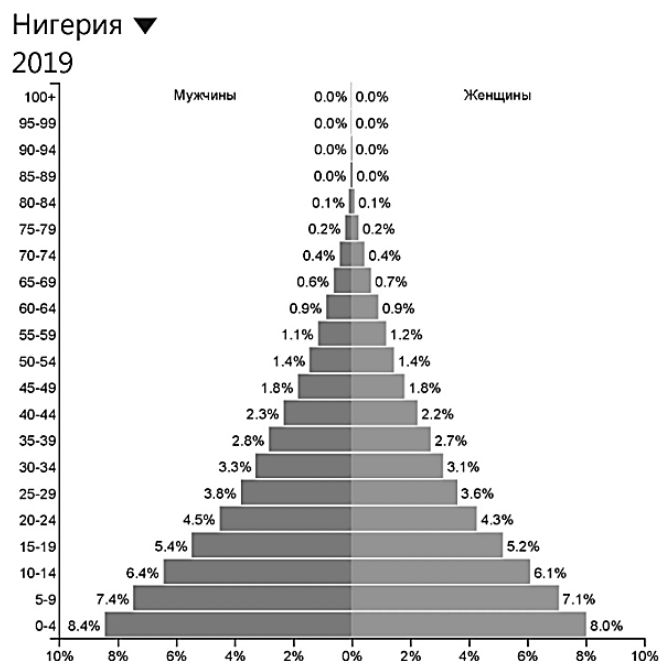


Рисунок 3 – Возрастной состав населения Нигерии (ось ординат) как функция его процентного содержания в стране [Age structure of the population of Nigeria (ordinate axis) as a function of its percentage in the country]

Безработица является одной из важнейших проблем в Нигерии и вынуждает жителей страны заниматься хаотичной, неорганизованной торговлей. Преимущественно в торговле задействованы женщины и дети, а выполняют работы на плантациях по сбору арахиса, какао, фруктов, швейным делом, обслуживанием быта туристов. Мужчины в редких случаях устраиваются рабочими горнодобывающей или нефтяной промышленности, либо рыбоперерабатывающей промышленности. Зачастую, мужчины вынуждены торговать, просить милостыню, заниматься разбоем. Широко развито похищение людей с целью получения выкупа. Последнее непосредственно касается шестерых российских моряков, похищенных нигерийскими пиратами в Бенине в начале января 2019 года с контейнеровоза MSC Mandy⁷. Таким образом, подавляющее большинство граждан находятся за гранью бедности. Несмотря на то, что Нигерия богата нефтью, золотом и другими полезными ископаемыми, на благосостоянии граждан это никак не отражается. Более 70% граждан живут за чертой бедности, средний класс составляет только 3 % от общего населения, а состоятельных людей среди нигерийцев ничтожно мало.

В Нигерии существует три вида средних образовательных организаций: западного направления (колониальный статус отразился на системе образования, имеющей ярко выраженный европейский стиль), местные и религиозные (исламские) частные школы, которые распространены в районах компактного проживания мусульманского населения. В рамках западного направления образование получают в три этапа: начальное (базовое) бесплатное – с 6-ти до 11-летнего возраста, среднее – с 11 до 14 лет и старшее школьное образовании с 15 до 18 лет. Среднее и старшее школьные образования платные. Существует ещё и дошкольное образование, начинающееся с 3-х летнего возраста, и продолжающееся до 6 лет [20]. Однако это образование получают не более 47% детей, из которых только 85% поступают в начальную школу.

В системе высшего образования в Нигерии выделяют традиционные университеты (16 федеральных и 8 государственных), в которых обучают классическим гуманитарным и прикладным наукам и узкоспециализированные (политехнические (5 федеральных и 4 государственных), аграрные (3 федеральных) и военный университеты). После окончания бакалавриата получают Национальный диплом, а после окончания магистратуры – Национальный диплом о высшем образовании. Есть библиотеки, своя Академия наук, школы для одарённых детей (однако, их всего 11), где готовят будущих интеллектуальных работников и политических деятелей. Тем не менее, образование доступно далеко не всем. Общегосударственный уровень грамотности составляет 50%. Особенно это касается женщин, из которых 80% в Нигерии не умеют читать и писать. В большей степени проблема безграмотности характерна для северной части страны [20].

Уровень преступности, в том числе уличной, в Нигерии крайне высок и возрастает с урбанизацией и ростом численности населения, что было отмечено выше. В связи с этим, и туристам, и обычным гражданам крайне опасно перемещаться по улицам в одиночку. Нередки случаи внутренних вооружённых конфликтов на политической и религиозной почве⁸. В некоторых районах страны, как отмечалось выше, действует террористическая группировка «Боко харам» и Народные добровольческие отряды дельты Нигера. В 2015 г. ее участники уничтожили 16 сел и городов на севере страны. В любой момент гражданин Нигерии может лишиться крова и стать беженцем. Особенно террористы нетерпимы к женщинам⁹. Согласно данным

⁷ Нигерия: большие проблемы маленькой страны. URL: <https://pressa.tv/web-puteshestviya/84515-nigeriya-bolshie-problemy-malenkoy-strany.html>;

⁸ FP (США): 10 конфликтов, на которые нужно обратить внимание в 2019 году (Часть 2). URL: <https://news.rambler.ru/other/41520277-fp-ssha-10-konfliktov-na-kotorye-nuzhno-obratit-vnimanie-v-2019-godu-chast-2/>

⁹ Страна, где похищают школьников (Как сегодня живут женщины в Нигерии). URL: http://www.chaskor.ru/article/strana_gde_pohishchayut_shkolnits_43455

агентства REUTERS, за три недели марта 2019 г. число погибших христиан в Нигерии вследствие нападения боевиков-мусульман увеличилось до 120 человек [21]. Эта и подобные акции свидетельствуют о приоритетной для правительства проблеме обеспечения физической безопасности населения страны.

Рассмотренные специфические особенности социально-экономического развития и проблем Нигерии в целом, свидетельствуют о крайне турбулентной и небезопасной внешней среде, способной привести к угрозе эксплуатации таких потенциально опасных объектов, как АЭС. Далее рассмотрим ситуацию в регионах Герегу и Иту (Geregu и Itu), рекомендуемых правительством для строительства АЭС.

Область Герегу (GEREGU) расположена в штате Коги, в непосредственной близости от Абуджи в северной центральной зоне страны. Средняя максимальная температура в этой области составляет 33,2°C, а минимальная – 22,8°C. Локоджа, столица штата, расположена в области слияния двух основных рек в Нигерии: Нигера и Бенуэ. Штат Коги характеризуется двумя отличительными сезонами, а именно, сухим сезоном, который продолжается с ноября по март, и сезоном дождей, продолжительность которого составляет апрель – октябрь. Годовое количество осадков колеблется от 1016 до 1524 мм. Растительность штата состоит из смешанных бобовых (акаций) и лесной саванны. Население штата, согласно последней переписи, составляет 3,3 млн. человек, плотность – 111 чел на кв. км. Коги – многокультурный, многоэтнический и многоконфессиональный регион, расположенный в северной центральной зоне, в котором широко развито производство маниоки. Общая площадь штата составляет 28 313,53 кв. км. Геология региона представлена молодыми осадочными породами и аллювиальными отложениями вдоль русел рек, что способствует широкому развитию сельскохозяйственной деятельности. Штат характеризуется высокими природными минеральными ресурсами.

В штате Коги находится зона местного самоуправления Аджаокут (LGA), где непосредственно предлагается строительство одной из АЭС. Население зоны местного самоуправления в 2018 г. составляло 137 000 человек. Большинство жителей этого района являются фермерами. Климатические условия благоприятствуют сельскохозяйственной деятельности, в рамках которой фермеры занимаются производством маниока, ямса, кукурузы, овощей, производством птицы, а также животноводством, мелкого рогатого скота. Специфической особенностью штата Коги является наличие железнодорожной магистрали Окене-Локоджа-Абуджа, которая служит одним из главных маршрутов между севером и югом страны и играет важную военно-политическую роль в стране. Это также место слияния двух основных рек страны Нигера и Бенуэ, которые образуют единое русло в районе Локоджи. В этом же штате в г. Аджаокута расположен крупнейший металлургический завод с мощностью переработки 1,3 млн. тонн стали в год. Завод перерабатывает сырье железорудного месторождения Итакпе-хилл, разведенного при участии советских геологов. Ранее, Советский Союз взял на себя проектирование, поставку оборудования, строительные и монтажные работы, а также подготовку нигерийских специалистов. Строительство завода началось в 1977 г. и к 1990 г. обязательства были выполнены на 90%, однако проект не был реализован по вине нигерийской стороны и в конце апреля 2016 г. объект был заморожен. Кроме того, в штате, в г. Аджаокута расположены две электростанции: Аджаокутская теплоэлектростанция и Герегская теплоэлектростанция. Недавно федеральное правительство также представило заявку на строительство в штате атомной электростанции в ближайшее время.

Штат Аква-Ибом, в котором располагается регион Иту, где предполагается строительство второй АЭС, согласно оценкам, насчитывает 5,48 млн. человек (согласно переписи населения NPC-2016). Регион занимает площадь в 7246,5 кв. км, расположен на юге Нигерии. Административный центр штата – город Уйо с населением свыше

500 000 жителей. Штат Аква-Ибом в настоящее время производит наибольшее количество газа и нефти в стране, в нем расположен международный аэропорт и два основных морских порта Атлантического океана, а также предложено строительство морского порта Ibaka (Oron Nation) по международным стандартам. Предполагаемая площадка второй АЭС планируется к расположению в зоне местного самоуправления МСЭ (ЛГА) штата Аква-Ибом. Ее размещение целесообразно, по оценкам экспертов, на юге Нигерии для сбалансированного энергообеспечения экономики страны. Зона местного самоуправления управляется местным органом управления района штата Аква-Ибом с населением 179 600 человек (NPC 2016). Район местного самоуправления занимает площадь около 606,1 кв. км, население в основном занимается натуральным хозяйством, охотой, рыболовством и ремесленничеством.

В целом, экономика штата также характеризуется аграрным типом, поскольку около 90 % населения страны проживают в сельской местности. Именно сельское хозяйство обеспечивает наличие рабочих мест, занятость, доходы населения в сельской местности, а также поставки продовольствия и сырья. Промышленная база штата крайне слаборазвита и недостаточна, представлена преимущественно пивоваренными заводами Champion, работа которых была возобновлена несколько лет назад. Таким образом, возможный пуск АЭС позволит обеспечить электроэнергией, как сельскохозяйственный сектор, так и промышленные секторы, создавая дополнительные рабочие места для населения. Однако следует обращать внимание на то, что это потребует привлечения рабочих кадров высокой квалификации.

На основе вышеизложенного, можно заключить, что, несмотря на весьма своеобразные условия жизни в Нигерии, обусловленные климатическими особенностями территории, в целом они пригодны для проживания и могут быть адаптированы к нормальной жизнедеятельности населения с учётом современных экологических требований. Положение усугубляется лишь тем, что правительству для решения социальных проблем необходимы и инвестиции для развития промышленности и сельского хозяйства, нуждающихся в современных технологиях, и широкая сеть медицинского обслуживания, требующая, в свою очередь, обучения и подготовки медицинских кадров и жилья для населения, участвующего в этой промышленной революции. Внедрение современных технологий также требует решения проблем с подготовкой технических кадров, что в свою очередь, требует развития специальных учебных заведений. Решение экологических проблем, которые затрагивают интересы населения, бизнеса и общества в целом, требует долговременной пропагандистской работы в обществе, подкрепленной соответствующими изменениями в законодательстве.

Самой серьезной проблемой при решении указанных выше задач является этничность населения, представленная множеством племенных поселений, приводящая к разобщенности и атомизации общества, многочисленным военным конфликтам. Это можно рассматривать как своеобразный трансформационный процесс в социальной сфере, неизменно сопровождающий становление государства. В основе этих конфликтов лежит различие в менталитете противоборствующих сторон, а решение этой проблемы может быть основано только лишь на диалоге, поскольку победа в вооруженном конфликте одной из сторон будет сопровождаться разрушением ранее созданных материальных объектов, благ и уничтожением людей, что противоречит демократическим принципам, определяющим развитие человеческой цивилизации.

Проведенный анализ социально-экономического положения населения Нигерии демонстрирует необходимость дополнительных источников энергии для решения проблем развития промышленности и сельского хозяйства в стране, приводящих к социальным конфликтам и разногласиям. На данный момент решению этих проблем реально противодействуют клановость (местечковость) менталитета населения и его

руководителей, подогреваемого, возможно, религиозными убеждениями противоборствующих социальных групп (жителей Севера и Запада, а также Востока и Юга), которые оказываются втянутыми в серьёзные военные конфликты, о которых упоминалось ранее. В случае, если речь шла только о какой-либо отдельной конфессиональной проблеме, то для разрешения проблемы было бы достаточно провести несколько конференций с целью выработки компромисса. Однако, вопрос касается духовного, социального и культурного направлений развития огромного государства, которое либо будет руководствоваться основными принципами западного христианства с его странными принципами морали, затрагивающими принципы основ семьи, являющейся основой общества любого государства, или будет руководствоваться основными положениями шариата (северная часть Нигерии, где большинство составляют мусульмане, с 1999 г. живёт по законам шариата). Несомненно, что решение этой проблемы позволит существенно понизить угрозу военного противостояния противоборствующих социальных групп, способных существенным образом помешать строительству АЭС.

Высокий уровень преступности в стране, отмеченный выше, дает возможность утверждать, что строительство АЭС, которое будет осуществляться иностранными специалистами, с высокой долей вероятности будет сопровождаться разбойными нападениями и другими преступными операциями. С другой стороны, строительство столь важного и радиационно-опасного объекта как АЭС всегда будет привлекать асоциальных субъектов и их структуры с целью получения преступных доходов за счет формирования угроз безопасности (террактов, нападений). Низкий уровень жизни и образования в регионах строительства АЭС эту ситуацию еще больше усугубляет. Эти и другие потенциальные угрозы безопасности, связанные со строительством и эксплуатацией АЭС в Нигерии, будут вызывать резонанс и за пределами государства, т.к. проблема ядерной и радиационной безопасности не имеет национальных границ.

По-видимому, в ближайшее будущее решение проблемы энергообеспеченности Нигерии следует искать в строительстве ТЭС, работающих на газе, который также добывают в Нигерии в дельте реки Нигер. В результате такого решения будет полностью исключена проблема радиоактивного загрязнения окружающей среды, в силу отсутствия источника загрязнения. В то же время, строительство Центра ядерных исследований и технологий в Нигерии является необходимым с точки зрения перспективной подготовки высококвалифицированных национальных кадров.

Таким образом, актуальная потребность в дополнительных энергомощностях за счет строительства АЭС, не может быть в данный момент решена в силу острых социальных противоречий, возникающих, в том числе, по причинам низкого уровня экономического развития. Очевидно, что на фоне таких конфликтов решение энергетических проблем страны оказывается не своевременным. Ситуация «замкнутого круга» для разрешения требует вовлечения не только национальных, но и международных институтов, использования зарубежного опыта государственного управления, а также значительных затрат времени на соответствующее идеологическое сопровождение всех трансформаций, включая активную политику в сфере образования, здравоохранения, культуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Следзевский, И. В.* История Нигерии в новое и новейшее время / Следзевский И. В. [и др]. – Институт Африки АН СССР. – Москва : Наука, 1981. – 358 с.
2. *Елохин, А. П.* Основы экологии и радиационно-экологического контроля окружающей среды / А. П. Елохин, А. И. Ксенофонтов, И. В. Пырков. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2016. – 680 с.
3. Крупнейшие нефтедобывающие компании в Африке-2019 / URL : <https://ru.talkingomoney.com/biggest-oil-producers-in-africa> (дата обращения: 3.03.2019).

4. *Аджайи, О. О.* Энергетические вызовы Нигерии и развитие энергетики: путь вперед / О. О. Аджайи, К. О. Аджанаку // Бюллетень научной ассоциации Нигерии. – 2007. – № 1-3 (37). – С. 28.
5. Декларация тысячелетия Организации Объединённых Наций. – Принята 8 сентября 2000 г. Генеральной Ассамблеи ООН (Резолюция № A/RES/52/2).
6. Население стимулирует энергетическую отрасль на развитие. – URL : <https://news.rambler.ru/other/41918465-naselenie-stimuliruet-energeticheskuyu-otrasl-na-razvitiye/> (дата обращения: 3.03.2019).
7. *Одулару, Г. О.* Способствует ли потребление энергии экономическим показателям? – Эмпирические данные из Нигерии // Г. О. Одулару, С. Оконкво. – Журнал экономики и бизнеса. – 2009. – Vol. XII. – № 2. – С. 43-47.
8. *Санди, О.О.* Энергетика и устойчивое развитие в НИГЕРИИ: пути решения проблемы / О.О. Санди // Энергетический вестник. – 2013. – № 15. – С. 23-51.
9. Атомные энергетические реакторы в мире (Nuclear Power Reactors in the World). МАГАТЭ. Вена, 2018. IAEA-RDS-2/38 ISBN 978–92–0–101418–4 ISSN 1011–2642. – 88 с.
10. *Лоубер-Льюис, Н.* Нигерия и ядерная энергия: планы и перспективы // Документ по фьючерсам на ядерную энергию. – № 11 (январь 2010 г.). – Центр международного инновационного управления.
11. *Ramchandra, B.* PODE, Boucar Dioft. Green energy and technology. Springer. London. Dordrecht Heidelberg. New York 2011. Chapter from book Solar Lighting. P. 97-149.
12. *Демьянцева, Е. А.* Механизм образования и негативное влияние выбросов, содержащих оксиды азота / Е. А. Демьянцева, Е. А. Шваб, Е. О. Реховская // Молодой ученый. – 2017. – № 2. – С. 231-234. – URL : <https://moluch.ru/archive/136/38002/> (дата обращения: 07.04.2019).
13. *Охунакин, О.С.* Использование энергии и возобновляемые источники энергии в Нигерии / О. С. Охунакин // Журнал инженерных и прикладных наук. – 2010. – № 5 (2). – С. 171-177.
14. Сравнительная характеристика различных способов производства электроэнергии (часть первая). URL : <http://www.atomic-energy.ru/papers/21258> (дата обращения: 3.03.2019).
15. *Елохин, А. П.* Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография / А. П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
16. *Иегууда, Е. Чад-Уморен* Проект атомной энергетики Нигерии: текущее состояние и будущие перспективы Е. Чад-Уморен Иегууда, Ф. Эбивонджуи Бамиделе / Журнал энергетических технологий и политики. – 2013. – Том 3. – № 7. – С. 10-21.
17. *Сами, Абул-Энейн* Особенности и потенциал развития атомной энергетики в странах Ближнего Востока. Турецкая Республика / Абу-Энейн Сами // Сборник докладов «Перспективы развития атомной энергетики на Ближнем Востоке: интересы России». – Москва, 2016. – ISBN 978-5-906757-14-2. – С. 51-55. URL : http://ceness-russia.org/data/doc/REPORT_RUS_prospectsfor_nuclearpowerME.pdf (дата обращения: 3.03.2019).
18. Энергетическая комиссия Нигерии (ECN): Национальная энергетическая политика. – Абуджа, Федеративная Республика Нигерия, 2008.
19. Нигерия: большие проблемы маленькой страны / Информационное агенство. – URL : <https://pressa.tv/webputeshetviya/84515-nigeriya-bolshie-problemy-malenkoy-strany.html> (дата обращения: 3.03.2019).
20. Система образования в Нигерии / Информационный сайт. – URL : <http://www.best-country.org/africa/nigeria/education> (дата обращения: 14.03.2019).
21. Информационное агенство. – URL: <https://www.unian.net/world/10482438-podzhigali-domadobivaya-zhenshchin-i-detey-v-nigerii-boeviki-musulmane-ubili-120-hristian.html> (дата обращения: 3.03.2019).

REFERENCES

- [1] Sledzevskij I.V. [and other] Istoriya Nigerii v novoe i novejshee vremya [History of Nigeria in New and Modern Times]. Institute of Africa, USSR Academy of Sciences. Moscow: Science. Main Editors of Eastern Literature. 1981. 358 p. (in Russian).
- [2] Eloxin A.P. Ksenofontov A.I., Pyrkov I.V. Osnovy e`kologii i radiacionno-e`kologicheskogo kontrolya okruzhayushhej sredy [Fundamentals of Ecology and Radiation-ecological Monitoring of the Environment]. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI. 2016. 680 p. (in Russian).
- [3] Krupneyshie nefteodobivayushchie kompanii v Afrike-2019 [Largest Oil-Extracting Companies in Africa-2019-Talking Go Money]. URL : <https://ru.talkingofmoney.com/biggest-oil-producers-in-africa>.

- [4] Adzhaji O.O., Adzhanaku K.O. E`nergeticheskie vy`zovy` Nigerii i razvitie e`nergetiki: put` vpered [Energy Challenges in Nigeria and Energy Development: the Way Forward] Bulletin of the Scientific Association of Nigeria. 2007. № 1-3 (37). P. 28.
- [5] Deklaraciya ty`sacheletiya Organizacii Ob`edinenny`x Nacij. Prinyata rezolyuciej 55/2 General`noj Assamblei ot 8 sentyabrya 2000 goda (Rezoluciya № A/RES/52/2) [United Nations Millennium Declaration. Adopted by General Assembly resolution 55/2 of September 8, 2000] (resolution № A/RES/52/2).
- [6] Naselenie stimuliruet E`nergeticheskuyu otrasl na razvitie. [Population Stimulates the Power Industry on Development]. URL : <https://news.rambler.ru/other/41918465-naselenie-stimuliruet-energeticheskuyu-otrasl-na-razvitie>.
- [7] Odularu G.O., Okonkvo C. Sposobstvuet li potreblenie e`nergii e`konomicheskim pokazatelyam? E`mpiricheskie dokazatel'stva iz Nigerii. Jurnal e`konomiki i biznesa. [Whether Energy Consumption Contribute Economic Indicators? Empirical Data from Nigeria. Journal of Economy and Business]. 2009. Vol. XII. № 2. P. 43-47.
- [8] Sandi O.O. E`nergetika i ustojchivoe razvitie v Nigerii: puti reshenie problem. E`nergeticheskij vestnik. [Power and Sustainable Development in Nigeria: Ways of Problem Solutions. Power Messenger]. 2013. № 15. P. 23-51.
- [9] MAGATE` (2018). Atomny`e e`nergeticheskie reaktory` v mire. [IAEA (2018), Nuclear Power Reactors in the World] IAEA. Vena. IAEA-RDS-2/38 ISBN 978-92-0-101418-4 ISSN 1011-2642. P. 88.
- [10] Louber-L`yuis, N. Nigeriya i yadernaya e`nergiya: plany` i perspektivy` [Nigeria and Nuclear Energy: Plans and Prospects]. Nuclear Futures Document № 11. January 2010 Center for International Innovation Management.
- [11] Ramchandra P., Bukar D. Zelenaya e`nergiya i texnologii. [Green Energy and Technology] Springer. London. Dordrecht Heidelberg. New York. 2011.
- [12] Dem`yanceva E.A., Shvab E.A., Rexovskaya E.O. Mexanizm obrazovaniya i negativnoe vliyanie vy`brosov, soderzhashhix oksidy` azota [Mechanism of Formation and Negative Impact of Emissions Containing Nitrogen Oxides] Young Scientist. 2017. № 2. P. 231-234. URL: <https://moluch.ru/archive/136/38002/> (in Russian).
- [13] Oxunakin, O.S. Ispol`zovanie e`nergii i vozobnovlyaemy`e istochniki e`nergii v Nigerii [Energy Use and Renewable Energy in Nigeria] Journal of Engineering and Applied Sciences. 2010. № 5 (2). P. 171-177 (in Russian).
- [14] Sravnitel`naya kharakteristika razlichnykh sposobov proizvodstva e`lektroe`nergii (chast` pervaya). [Comparative Characteristic of Various Ways of Electricity Generation (part one)]. URL: <http://www.atomic-energy.ru/papers/21258> (in Russian).
- [15] Elokhin, A.P. Metody` i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushhej sredy`: monografiya [Methods and Means of Environmental Radiation Monitoring Systems: monograph]. Moscow: National Research Nuclear University MEPhI. 2014. 520 p. (in Russian).
- [16] Ieguuda E. Chad-Worren, Bamidele F. Ebivondjumi. Proekt po generirovaniyu yadernoj e`nergii v Nigerii: tekushhee sostoyanie i budushhie perspektivy` [Nuclear Power Generation Project in Nigeria: Current Status and Future Prospects] Journal of Energy Technology and Policy. V. 3. № 7. 2013. P.10-21 (in Russian).
- [17] Sami Abul-E`neyn Osobennosti i potencial razvitiya atomnoy e`nergetiki v stranakh Blijnego Vostoka. Turetskaya Respublika. Perspektivi razvitiya atomnoy e`nergetiki na Blijnem Vostoke6: interesi Rossii. [Sami Abul-Eneyn. Features and Potential of Development of Nuclear Power in the Countries of the Middle East. The Republic of Turkey. Perspectives of the Development of Nuclear Power in Middle East: Interests of Russia] / ISBN 978-5-906757-14-2. Moscow. 2016. P. 51-55. URL : http://ceness-russia.org/data/doc/REPORT_RUS_prospectsfornuclearpowerME.pdf (in Russian).
- [18] E`nergeticheskaya komissiya Nigerii (ECN): Nacional`naya e`nergeticheskaya politika. [Nigeria Energy Commission (ECN): National Energy Policy]. Federal Republic of Nigeria. Abuja. 2008.
- [19] Nigeriya: bol`shie problemy` malen`koj strany` [Nigeria: Big Problems of a Small Country]. Information agency. URL: <https://pressa.tv/web-puteshestviya/84515-nigeriya-bolshie-problemy-malenkoy-strany.html>.
- [20] Sistema obrazovaniya v Nigerii [Education System in Nigeria]. Information site. URL : <http://www.best-country.org/africa/nigeria/education>.
- [21] Podzhigali doma, dobivaya zhenshhin i detej: v Nigerii boeviki-musul`mane ubili 120 xristian [They Set Houses on Fire, Killing Women and Children: Muslim Militants Killed 120 Christians in Nigeria] / Information agency. URL : <https://www.unian.net/world/10482438-podzhigali-doma-dobivaya-zhenshhin-i-detey-v-nigerii-boeviki-musulmane-ubili-120-hristian.htm>.

Environmental, Social and Economic Aspects of the Possible Development of Atomic Energy in the Federal Republic of Nigeria

Orumo Kenoll¹, A.P. Elokhin², A.I. Ksenofontov³

*National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute (NRNU MEPhI),
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

¹ ORCID iD: 0000-0001-6251-1736

ResearcherID: S-9359-2019

e-mail: orumokenoll@yahoo.com

² ORCID iD: 0000-0002-7682-8504

WoS Researcher ID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

³ ORCID iD: 0000-0002-6864-9805

WoS Researcher ID: H-1833-2017

e-mail: AIKsenofontov@mephi.ru

Abstract – The paper analyzes economic, environmental and social problems that have a certain impact on the development of nuclear energy in the Federal Republic of Nigeria. It considers the political structure of the country, the demographic and religious characteristics of the population, the environment, the general state of the economy, agriculture and industry of Nigeria. Particular attention is paid to the oil industry of Nigeria as nowadays it is currently the most developed industry in the state which provides the country with OPEC membership. The work shows that the country lacks energy capacities for the sustainable development of the economy. To solve this problem hydroelectric power plants are being designed on the Niger River, as well as thermal power plants operating on gas produced in the Niger delta, the construction of nuclear power plants is planned. Currently, the country's population is 201 million people and its number continues to grow rapidly. Therefore, the government decides to put into operation two nuclear power plants for the further development of industry and agriculture. However, both the construction of the NPP and its operation are hindered by military conflicts that very often arise in Nigeria on a different basis: political, interfaith, interethnic and economic. It is quite difficult to carry out both the construction of radiation hazardous facilities and their operation in such conditions. There is a need to take increased security measures for physical protection of both specialists involved in the construction of radiation-hazardous facilities and directly the facilities themselves.

Keywords: Federal Republic of Nigeria, political structure, social and economic situation of the population, agriculture, industry, ecology, crime, conditions for the construction of nuclear power plants.

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

УДК 621.039:37.091.2

**ФОРМИРОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ НА
ЭТАПЕ РАННЕЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ В
ОБЛАСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

© 2019 В.А. Руденко, Н.П. Василенко, Н.В. Ермолаева, Н.И. Лобковская

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

В статье рассматриваются материалы исследований по применению новых подходов к формированию кадрового потенциала для атомной отрасли в рамках ранней профориентации школьников. На основании анализа актуальных требований к работникам ГК «Росатом», корпоративных ценностей, важности человеческого фактора в безопасности эксплуатации АЭС, рекомендаций Концерна разработана региональная Модель ранней профориентации школьников «Юный атомщик». Освещены мероприятия, проводимые кафедрами ВИТИ НИЯУ МИФИ, направленные на формирование универсальных компетенций у младших школьников, их профессиональное самоопределение.

Ключевые слова: ранняя профессиональная ориентация, ГК «Росатом», корпоративные ценности, универсальные компетенции, профессиональное самоопределение, инженерно-техническая мотивация школьников, летняя научно-техническая школа.

Поступила в редакцию 05.08.2019

После доработки 31.10.2019

Принята к печати 12.11.2019

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (далее ГК «Росатом») является локомотивом инновационного развития России, в чьей ответственности находится проведение политики государства в ядерной области: производство, добыча и использование ядерной энергии, обеспечение стабильной работы энергопромышленного и ядерного оружейного комплексов, ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации. Более 300 тысяч человек работают в области ядерных и радиационных технологий, обеспечивая военную и энергетическую безопасность России [1]. Поскольку атомная отрасль продолжает динамично развиваться, растет спрос на новые кадры для работы в ГК «Росатом», возросла потребность в конкурентоспособных научных сотрудниках и инженерных специалистах, готовых к развитию новых идей, решению исследовательских и производственных задач, способных к инновационной инженерной деятельности и к принятию нестандартных решений. Особая актуальность задачи подготовки кадров для атомной энергетики вызвана чрезвычайной степенью ответственности и необходимым высоким уровнем культуры безопасности работников, занятых в этой отрасли [2, 3].

К соискателям, претендующим работать в ГК «Росатом», выдвигается целый ряд требований [4, 5], согласующихся с базовыми ценностями: высокий уровень подготовки в ВУЗе (средний балл не ниже четырех), развитые навыки межличностной коммуникации, отличное знание английского языка, желание и умение заниматься самообразованием, развиваться. Данные требования отражены в универсальных компетенциях ФГОС ВО, которые должны быть сформированы еще в вузе [6]. Анализ

данных компетенций показал, что большая их часть (рис. 1) начинает формироваться и воспитываться еще в школьном возрасте [7].



Рисунок 1 – Универсальные компетенции, начинающие формироваться в школе [Universal competencies starting to take shape in school]

Важность рассматриваемого нами вопроса определяется в настоящее время на государственном уровне. Так, в рамках Послания к Федеральному Собранию 2018 г. Президент РФ Владимир Путин высказался о важности создания в России современной системы профессиональной ориентации: «Нам нужно выстроить современную профориентацию. Здесь партнерами школ должны стать университеты, научные коллективы, успешные компании» [8].

Высокую потребность государства в качественной профориентации показывают и результаты исследования социологов рекрутингового портала Superjob, в котором приняло участие 7100 респондентов [9]. Исследуемую совокупность составило экономически активное население России в возрасте старше 18 лет, представители 22 профессиональных групп, которым был задан вопрос о выборе своей специальности снова, если бы у них была возможность принять карьерное решение заново. По разным категориям профессий были получены разные утвердительные ответы с размахом ряда от 49% до 81% ($R = 32\%$) и медианой в 65%. Это позволяет сделать вывод, что каждый третий из общего количества опрошенных выбрал бы новую профессию, следовательно, не удовлетворен своей профессиональной деятельностью, и данная проблема становится не только проблемой личности, но и государства.

Учитывая значимость данного вопроса для атомной отрасли, предприятия Росатома поддерживают инициативу ранней профориентации школьников и студентов.

Так в августе 2018 г. в Екатеринбурге, на площадке III Отраслевого чемпионата профессионального мастерства AtomSkills-2018 состоялось подписание соглашений между администрациями городов расположения предприятий Госкорпорации «Росатом», образовательными учреждениями и АНО «Корпоративная Академия Росатома», направленных на развитие партнерских отношений в области подготовка кадров. В источнике сказано: «Соглашения были подписаны с целью развития партнерских отношений и эффективного всестороннего сотрудничества в области подготовки кадров. Они предваряют реализацию мероприятий, проектов и инициатив в области обмена и распространения лучших практик в сфере ранней профориентации и подготовки кадров» [10].

Кроме того, вопросы, посвященные ранней профориентации школьников, обсуждают представители образовательных учреждений России и ближайшего зарубежья на II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Формирование престижа профессии инженера у современных школьников», в рамках X Петербургского международного образовательного форума. Конференция прошла в апреле 2019 г., а центральной ее темой стала ранняя профориентация, способствующая выбору профессии инженера [11].

Обсуждение вопросов сотрудничества в данном вопросе проходят и на региональном уровне. Так, работа по привлечению молодых специалистов в АО «Концерн Росэнергоатом» активно проводится в Волгодонском инженерно-техническом институте – филиале Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (далее – ВИТИ НИЯУ МИФИ). Данный вуз является стратегическим партнером большинства промышленных предприятий г. Волгодонска, являясь источником формирования их кадрового резерва, необходимого для обеспечения условий высокотехнологичного развития. Для усиления интеграционных процессов взаимодействия работодателей, профессионального образования и рынка труда в ВИТИ НИЯУ МИФИ развиваются следующие формы: Ресурсный центр, базовые кафедры на предприятиях, осуществление подготовки специалистов по образовательным программам по новым ФГОС СПО из перечня ТОП-50, внедрение проектного подхода для разработки исследовательских проектов.

Но проводимые ранее и в настоящее исследование по данному вопросу в вузе, в том числе и авторами статьи, показали, что для подготовки кадров для атомной отрасли, обладающих необходимым набором качеств, следует внести изменения в систему подготовки кадров, которую нужно проводить с первых лет обучения в школе. Необходимо выстроить систему сетевого взаимодействия вузов и школ, позволяющую на ранних этапах выявлять талантливых детей и осуществлять их профориентационное сопровождение. Важно знакомить школьников с требованиями Госкорпорации к персоналу, формировать и воспитывать у данной целевой аудитории ценности Росатома, закладывать прочную основу будущих профессиональных знаний, умений и навыков, формировать элементы корпоративной культуры и безопасности [7, 12].

Поэтому по инициативе ВИТИ НИЯУ МИФИ состоялось расширенное совещание по вопросу активизации процесса профессионального выбора учащимися востребованных профессий. В его работе приняли участие специалисты вуза и директора школ, представители администрации города и управления образования Волгодонска. Руководитель ВИТИ НИЯУ МИФИ В.А. Руденко отметила, что «профессиональную мотивацию следует внедрять с младших классов, не только рассказывая детям о престиже инженерных специальностей, но и выявлять их склонности к точным наукам, помогать раскрывать потенциал на пути к будущей профессии. Это большая комплексная задача, которую предстоит решать сообща – семье, школе и вузу». Участники обсудили практические вопросы дальнейшего взаимодействия по профессиональному самоопределению сегодняшних школьников с

учетом использования накопленного опыта и существующих методик, а также существующей учебной и производственной базы вуза [13].

Актуальность ранней профориентации в настоящее время вызывает широкое обсуждение данного вопроса в обществе и имеет сторонников и противников. На сайте дискуссионной площадки сказано: «Сторонники утверждают, что одна из причин низкой эффективности профориентационной работы – ее смещение на подростковый возраст, когда поздно формировать и воспитывать, все уже выросло, впору пропалывать. Противники представляют себе дошкольников в форме шахтеров, пожарников или железнодорожников, за которых уже все решили взрослые дяди и тети, озабоченные судьбами отечественной экономики» [14]. Психологи и педагоги решают вопрос о том «когда и как следует говорить с детьми о будущей профессии» и советуют в разговоре с детьми о профессиях «не переборщить, не перегрузить информацией, не отвечать на незадаанные вопросы, не обделять вниманием другие сферы нашей жизни». При этом они утверждают, что в рассмотрении данного вопроса больше подходит термин «профессиональное самоопределение» как «сложный и длительный процесс развития внутренней готовности человека к выбору профессионального пути» [14].

Анализ сформировавшейся системы работы со школьниками, проводимой вузом в рамках профориентационной деятельности: олимпиады, мастер-классы, экскурсии, подготовка к ЕГЭ, диагностические профессиональные тестирования и беседы с родителями представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Мероприятия, проводимые на базе ВИТИ НИЯУ МИФИ по привлечению молодежи к работе в АО «Концерн Росэнергоатом» [Events held on the basis of VITI NRNU MEPhI to attract youth to work in «Rosenergoatom Concern» JSC]

Работа со школьниками		Работа со студентами		
Школьники младших и средних классов	Старшеклассники	1-2 курс	3-4 курс	5-6 курс
Просветительские профориентационные беседы в школах	Инженерные олимпиады Росатома, олимпиады по физике и математике	Инженерные олимпиады Росатом, турнир ТЕМП		
Летняя научно-техническая школа	Летняя научно-техническая школа	Работа клуба естествоиспытателей на кафедре физики		
Занятия по робототехнике на базе кафедр «Физика» и «Информационные системы и технологии»	Физический марафон на базе кафедры физики, AtomCamp	Студенческие стройотряды	Дни карьеры Росатома, конкурсы Концерна	
	Дни открытых дверей, экскурсии на кафедры ВУЗа, на Учебно-тренировочное подразделение Ростовской АЭС, ОАО «Атоммаш»	AtomSkills	Проведение производственной практики на предприятиях ГК Росатом	
	Подготовка к ЕГЭ в физико-математической школе, онлайн подготовка в рамках сетевой школы НИЯУ МИФИ	Диагностические профессиональные тестирования		

Из таблицы видно, что основная работа по профориентации проводится со старшеклассниками, причем половина мероприятий – массового характера.

Активное участие в профориентационной работе наряду с Центром карьеры и отделом по профориентации принимают преподаватели и сотрудники обеспечивающих кафедр ВИТИ НИЯУ МИФИ (рис. 2). Здесь созданы необходимые условия не только для качественной подготовки специалистов в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов, но и для прогрессивной профориентационной работы с целью формирования ценностей ГК «Росатом» у старшеклассников и младших школьников (табл. 2).



Рисунок 2 – Обеспечивающие кафедры ВИТИ НИЯУ МИФИ, участвующие в профориентационной работы со школьниками [Supporting chairs of VITI NRNU MEPhI participating in career guidance work with schoolchildren]

Следует отметить, что высокий профессионализм сотрудников и их непрерывное обучение лежат в основе кадровой политики ГК «Росатом», осуществляющей всестороннюю подготовку высококвалифицированных работников для атомной отрасли. Векторами такого развития стали единые корпоративные ценности, утвержденные протоколом Стратегического совета №1-СС/3-Пр от 03.07.2014 (рис. 3) [15].



Рисунок 3 – Ценности Росатома [Rosatom Values]

Поэтому занятия со школьниками смоделированы кафедрами с ориентацией на Ценности Росатома и представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Направления работы обеспечивающих кафедр ВИТИ НИЯУ МИФИ в ранней профессиональной ориентации школьников в соответствии с Ценностями ГК «Росатом» [Directions of work of the supporting chairs of VITI NRNU MEPhI in the early career guidance of schoolchildren in accordance with the «Rosatom» State Corporation values]

Физика	Математика	Экономика и социально-гуманитарные дисциплины	Иностранные языки	Физическая культура
ЭФФЕКТИВНОСТЬ <i>Мы всегда находим наилучшие варианты решения задач. Мы эффективны во всем, что делаем – при выполнении поставленных целей максимально рационально используем имеющиеся ресурсы и постоянно совершенствуем рабочие процессы. Нет препятствий для нахождения самых эффективных решений [16]</i>				
Физический марафон для школьников города и региона, а также команд из городов атомщиков; кружок «Робототехника» для студентов и школьников	Основы математического моделирования для школьников	Адаптированные деловые игровые тренинги – «Построй АЭС» и «Атомный менеджмент» для развития эффективного управления временем, ресурсами и финансовыми потоками	Коммуникативно-ориентированный квест (профессионально направленное изучение школьниками языка)	Физкультурный марафон с привлечением школьников города: пропаганда здорового образа жизни, формирование физической культуры школьника как неотъемлемого компонента всесторонне развитой личности
НА ШАГ ВПЕРЕДИ <i>Мы стремимся быть лидером. Мы всегда на шаг впереди в технологиях, знаниях и качествах наших сотрудников. Мы предвидим, что будет завтра, и готовы к этому сегодня. Мы постоянно развиваемся и учимся. Каждый день мы стараемся работать лучше, чем вчера [16]</i>				
Формирование траектории движения школьников к повышению уровня физических знаний по маршруту: «Школа – Физико – техническая школа – Институт – Производство»	Формирование траектории движения школьников к повышению уровня математических знаний по маршруту: «Популярная математика – Математическое моделирование поддержки принятия решений в условиях неполной/нечеткой информации – Прикладные математические процессы в атомном машиностроении»	Формирование траектории движения школьников к повышению уровня экономической грамотности и общекультурных знаний на маршруте: «Совместные школьные уроки по обществознанию – Деловые экономические игры и кросскультурные тренинги»	Формирование траектории движения школьников к повышению языкового уровня по маршруту: «Игровое языковое моделирование – Эффективная профессиональная языковая» коммуникация»	Формирование траектории движения школьников к повышению уровня знаний по физической культуре на маршруте: «В здоровом теле – Здоровый дух!»

БЕЗОПАСНОСТЬ <i>Безопасность людей и окружающей среды – наивысший приоритет. В безопасности нет мелочей – мы знаем правила безопасности и выполняем их, пресекая нарушения [16]</i>				
Формирование культуры безопасности школьников города и региона в рамках проведения мероприятий по физике	Формирование культуры безопасности в процессе знакомства школьников города и региона с математическим моделированием в атомной отрасли	Формирование культуры безопасности школьников города и региона в рамках активного просветительского сотрудничества с ведущими «атомными» предприятиями г. Волгодонска	Формирование культуры безопасности в процессе освоения школьниками навыков языковой коммуникации	Формирование культуры безопасности школьников в ходе спортивных мероприятий и командных игр по правилам
ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА РЕЗУЛЬТАТ <i>Каждый из нас несет личную ответственность за результат своей работы и качество своего труда перед обществом. В работе мы предъявляем к себе самые высокие требования. Оцениваются не затраченные усилия, а достигнутый результат. Успешный результат – основа для наших новых достижений [16]</i>				
Летняя научно-техническая школа «Юные атомщики»: – выявление и поддержка технически одаренных школьников; – повышение интереса к изобретательской и исследовательской деятельности на основе формирования элементарных исследовательских и научно-технических навыков	Летняя научно-техническая школа «Юные атомщики»: – развитие логического мышления; – проведение интеллектуальных конкурсов и математических соревнований;	Летняя научно-техническая школа «Юные атомщики»: – деловая игра по межкультурной коммуникации «Вокруг света»; – тренинг по созданию интеллект-карты «Моя инженерная рыба-профессия»; – выявление и поддержка социально активных школьников; – продвижение позитивного образа инженерных профессий среди школьников	Летняя научно-техническая школа «Юные атомщики»: – продвижение позитивного образа инженерных профессий в процессе языковой коммуникации; – живой диалог сознательно-практической языковой коммуникации	Летняя научно-техническая школа «Юные атомщики»: – укрепление здоровья и обеспечение высокой работоспособности школьников; – освоение организаторских умений и навыков по проведению самостоятельных занятий физической культурой
Модернизация методического материала для оптимизации профориентационных проектов ВИТИ НИЯУ МИФИ	Анализ результативности работы профориентационного направления ВИТИ НИЯУ МИФИ	Разработка критериев эффективности работы и социологическое сопровождение профориентационного направления ВИТИ НИЯУ МИФИ	Создание матриц по направлениям профориентационной работы ВИТИ НИЯУ МИФИ	Реализация проекта по физической культуре в рамках профориентационной работы
УВАЖЕНИЕ <i>Мы с уважением относимся к самим себе и каждому человеку. Мы всегда внимательно слушаем и слышим друг друга вне зависимости от различий. Мы уважаем историю и традиции. Достижения прошлого вдохновляют нас на новые победы [16]</i>				
Фестиваль «Детство, наука, кино»: формирование научного мировоззрения,	Фестиваль «Детство, наука, кино»: формирование научного	Фестиваль «Детство, наука, кино»: ценностно-рациональный подход к профессии	Фестиваль «Детство, наука, кино»: креативное языковое	Фестиваль «Детство, наука, кино»: физическое и духовное

создании видеороликов по теме «Законы физики – законы Природы!»	мировоззрения, создании видеороликов по теме «Математика – просто о сложном!»	проблемное профориентирование	обучение школьников	здоровье молодежи
ЕДИНАЯ КОМАНДА <i>Мы все – Росатом. У нас общие цели. Работа в команде единомышленников позволяет достигать уникальных результатов. Вместе мы сильнее и можем добиваться самых высоких целей. Успехи каждого – успехи Росатома [16]</i>				
Дни карьеры Росатома: стационарные и выездные выставки по робототехнике; популяризация физики и робототехники среди учащихся и молодежи	Дни карьеры Росатома: популяризация математического моделирования среди молодежи	Дни карьеры Росатома: формирование экономической грамотности и кросскультурной компетенции учащихся и молодежи	Дни карьеры Росатома: актуализация языковой грамотности среди учащихся и молодежи	Дни карьеры Росатома: популяризация здорового образа жизни среди учащихся и молодежи

Уровень обеспечения техническими и программными средствами в вузе позволяет преподавателям разрабатывать опережающие профориентационные проекты, а глубокая вовлеченность в работу со школьниками предполагает реализацию этих проектов на практике с дальнейшей оптимизацией по результатам профориентационного процесса. Опыт трехлетней работы в летней школе «Юные атомщики» показал, что школьники младших классов очень восприимчивы к профориентационной информации. И как в ГК «Росатом» для сотрудников выстраивают различные векторы карьеры, так и для школьников целесообразно выстроить траекторию движения, указать цели и ориентиры, которые помогут им определиться в выборе направления будущей профессиональной деятельности.

С этого времени проведено 5 сессий с участием более 250 учеников общеобразовательных учреждений г. Волгодонска, Ростовской области и других регионов России. Слушателями стали учащиеся 18 образовательных учреждений в возрасте от 7 до 13 лет (1-7 классы), успешно обучающиеся в школе и принимающие активное участие в мероприятиях научно-технического профиля. Целевым ориентиром организации и проведения летней научно-технической школы стало выявление талантливых детей в области технического творчества для решения прикладных задач, ориентированных на атомную отрасль.

В соответствие с ранее рассмотренными вопросами ранней профориентации или профессионального самоопределения школьников, были определены основные задачи проведения проекта:

- знакомство юных исследователей с реальным производством и ознакомление с инженерно-техническими специальностями;
- освоение навыков проектного мышления и проектной работы в инженерно-технической сфере;
- стимулирование технического творчества;
- формирование научно-технической культуры школьников, становление инженерной мотивации, развитие аналитических навыков как основы будущей профориентации в сфере атомной промышленности;
- начальное развитие и формирование универсальных компетенций специалиста атомной отрасли.

Ежегодно организаторами проекта задачи пересматриваются и дополняются с учетом требований времени. В 2019 г. одной из основной задач проекта стала формирование социальных, общекультурных и технологических компетенций в

соответствии с требованиями ФГОС и работодателей. Программа летней школы «Юные атомщики-2019» включила в себя проведение экскурсий, командных игр, практические и лабораторные занятия по физике, робототехнике, информатике, химии, 3D-программированию, иностранному языку, мастер-классов по управлению проектами, встречи учащихся с ведущими учеными ВИТИ НИЯУ МИФИ и ведущими специалистами, работающими в атомной отрасли.

Важным направлением работы летней школы являлось знакомство детей с новыми для них предметами (физика, химия, IT-технологии) с целью заинтересовать их и мотивировать к глубокому регулярному изучению данных дисциплин в школе.

С целью формирования представления об общепрофессиональных компетенциях, для знакомства с профессиями атомной отрасли и ценностями ГК «Росатом» со школьниками были проведены квесты, деловые игры, мастер-классы и экскурсии. На занятиях ведущие ученые института объясняли детям, что успешное формирование профессионализма личности базируется на сочетании индивидуально-психологических характеристик с социальными чертами. Отмечалось, что для каждого вида профессиональной деятельности выжными являются личностные качества. Детям были предложены для рассмотрения профессиональные карты, в которых дается целостное описание профессии, перечисляются необходимые для специалиста психологические и профессиональные качества, знания и умения.

Школьники в игровой форме познакомились с ценностями ГК «Росатом», а также проанализировали и обсудили следующие основные требования к работникам корпорации «Росатом» (информация для дискуссии была взята из источника «Ранняя профориентация: пространство новых возможностей» [12]):

- лидерские качества;
- планирования и организация деятельности;
- ориентация на результат;
- работа в команде;
- высокая квалификация;
- эффективная коммуникация;
- управление изменениями;
- стратегическое системное мышление;
- понимание мирового рынка атомной энергетики, его тенденций и перспектив;
- открытость и гибкость по отношению к зарубежным заказчикам и их культуре.

В рамках занятий подчеркивалось, что для работника атомной отрасли важными являются такие качества, как гибкость мышления, открытость к инновациям, способность творчески мыслить и постоянно обучаться все новым умениям и навыкам.

Также школьникам предлагалось самим составить карту профессии (интеллектуальная карта «Моя инженерная рыба-профессия»), чтобы научиться определять наиболее важные для данной профессии умения, навыки и знания, которыми должен обладать специалист. В ходе обсуждения полученных результатов был сформирован список знаний и умений, которыми должен обладать учащийся, желающий в будущем стать сотрудниками ГК «Росатом»:

- высокий уровень первоначальной подготовки по таким дисциплинам как физика, математика, экология;
- хорошее знание английского языка;
- компьютерная грамотность, владение современными IT-технологиями;
- базовый уровень знаний по обществознанию и экономике;
- развитые навыки коммуникационного общения;
- способность к самообразованию, саморазвитию, совершенствованию имеющихся и приобретению новых умений и навыков;

- высокая познавательная и творческая активность в процессе обучения;
- активная жизненная позиция, идейность;
- изобретательность.

Проведенные занятия способствовали развитию мотивационно-ценностного отношения школьников к профессиональному обучению, показали, какие личностные качества необходимо разрабатывать для выбранной профессиональной деятельности. Таким образом, мы указали школьникам, как им следует выстроить траектории профессионального движения, чтобы стать в итоге высококлассными специалистами.

С целью расширения кругозора, знакомства с особенностями работы специалиста-атомщика со школьниками были проведены реальные и виртуальные экскурсии, различные мастер-классы. Школьники посетили современные лаборатории по сварке, электротехнике, где побеседовали с участниками соревнований WorldSkills, что вызвало у юных исследователей неподдельный интерес. Многие ребята выказали желание готовиться к подобным мероприятиям и активно интересовались, что нужно сделать, чтобы стать участником, а главное – победителем соревнований WorldSkills.

Школьникам показали виртуальный учебный комплекс «Схемотехника и оборудование АЭС». В данном комплексе реализованы трехмерные модели, являющиеся аналогами реального оборудования энергоблока и других сооружений атомной электростанции. Комплекс предназначен для проведения практических занятий по дисциплинам «Атомные электростанции», «Ядерные энергетические реакторы» и позволяет студентам изучать особенности конструкции деталей, узлов и принципов работы оборудования АЭС. Ведущие преподаватели кафедры «Атомные электрические станции» показали школьникам реакторный зал, турбинное отделение АЭС, градирни, устройство реактора ВВЭР-1000 и ответили на многочисленные вопросы. Большая часть вопросов касалась обеспечения безопасности функционирования АЭС, методов утилизации отработанного топлива и условий работы персонала. Данная виртуальная экскурсия позволила школьникам увидеть атомную станцию изнутри, рассмотреть в различных разрезах атомный реактор, посмотреть, как работает парогенератор и турбина, увидеть последовательность получения электроэнергии на АЭС, узнать об условиях работы персонала и особенностях системы безопасности АЭС. Полученные знания ребята применили при работе над своими исследовательскими командными проектами «Что я знаю о Ростатоме».

Следует отметить, что организация проектной научно-технической деятельности играет в ранней профориентации важную роль, поскольку способствует формированию познавательно-коммуникативных компетенций и развитию исследовательских способностей. В 2017-2018 гг. на базе ВИТИ НИЯУ МИФИ были реализованы проекты «Проектируем будущее», «Экологические проблемы России и методы их решения», направленные на формирование гуманистических ценностей, экологического мышления. В 2019 г. тема проектной деятельности была связана с Госкорпорацией «Росатом». В ходе проекта школьники познакомились с основными направлениями деятельности Госкорпорации «Росатом», дивизионов, а также входящих в их состав предприятий и организаций; узнали об истории становления данной отрасли, ее современном состоянии и перспективах дальнейшего развития; подготовили и защитили командные стендовые доклады об одном из дивизионов ГК «Росатом» (истории, выпускаемой продукции, сферах сбыта, условиях работы персонала); поработали над способностью формулировать свои мысли при донесении до аудитории необходимой информации и навыками публичной речи, аргументации, ведения дискуссии и полемики. В целом программа летней школы была выстроена таким образом, чтобы проводимые мероприятия способствовали формированию максимального количества универсальных компетенций (табл. 3).

Таблица 3 – Мероприятия, способствующие формированию и развитию универсальных компетенций
[Activities that contribute to the formation and development of universal competencies]

№ п/п	Наименование категории компетенций [6]	Код компетенции	Мероприятия, направленные на формирование и развитие компетенции
Универсальные компетенции			
1	Системное и критическое мышление	УК-1	Практические и лабораторные занятия по физике, робототехнике, информатике, химии, экскурсии, проектная деятельность
2	Разработка и реализация проектов	УК-2	Мастер-класс по управлению проектами, проектная деятельность
3	Командная работа и лидерство	УК-3	Практические и лабораторные занятия по физике, химии, проектная деятельность,
4	Коммуникация	УК-4	Практические занятия по иностранному языку, проектная деятельность
5	Межкультурное взаимодействие	УК-5	Кросскультурная игра «Вокруг света», тренинги по межкультурной коммуникации
6	Самоорганизация и саморазвитие	УК-6	Лабораторные занятия по физике, химии проектная деятельность, 3Д-программирование,
7	Безопасность жизнедеятельности	УК-7	Мастер-класс по информационной безопасности

Учитывая, что анализ такой деятельности ведется 3 года, можно сделать следующие выводы, что организация ранней профориентационной деятельности вуза по Модели летней школы «Юные атомщики»:

- вызывает большой интерес у школьников и их родителей, о чем свидетельствует количество заявок на участие;
- определяет удовлетворенность школьников, проведенными занятиями, о чем свидетельствует их желание повторного участия;
- результативна по формированию универсальных компетенций, в их соотношении с возрастными особенностями групп школьников, о чем свидетельствует наблюдение за повторно участвующими в летней школе детьми и возможностью их привлечения консультантами в новых группах.

Подводя итоги опыта ранней профориентации со школьниками, мы считаем, что для школьников целесообразно выстраивать траекторию их движения к профессии, указать цели и ориентиры в соответствии с их возрастными особенностями, которые помогут им в будущем правильно сориентироваться в выборе своей профессиональной деятельности. Необходимо знакомить школьников с инженерно-техническими специальностями и с реальным производством, развивать их социальные, интеллектуальные качества, как основы будущей профориентации в сфере атомной промышленности, проводить мероприятия, способствующие формированию и начальному развитию социальных, общекультурных и технологических компетенций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник «Карьера в атомной отрасли». – Выпуск № 3. – Спецпроект Центра карьеры Госкорпорации «Росатом». – URL : https://rosatom-career.ru/mediafiles/u/files/Centr%202014/Career_3.pdf (дата обращения: 14.06.2019).
2. Лобковская, Н. И. Профессиональное целеполагание как составляющая культуры безопасности будущего специалиста-атомщика / Н. И. Лобковская, Ю. А. Евдошкина // Современное образование. – 2017. – № 1. – С. 32-38. – URL : http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (дата обращения: 14.06.2019).
3. Managing human resources in the field of nuclear energy. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2009. – URL : https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1397_web.pdf (дата обращения: 30.07.2019)
4. Современные требования к работникам корпорации «Росатом». – URL : <http://900igr.net/prezentacija/fizika/istorija-sozdaniya-atomnoj-energetiki-197930/sovremennye-trebovaniya-k->

- rabotnikam-korporatsii-rosatom-19.html (дата обращения: 30.07.2019).
5. Хотемской, Н. А. Кадровая политика государственных корпораций на примере «Росатом» / Н. А. Хотемской // Международный научно-технический журнал «Теория. Практика. Инновации», август 2017. – URL : <http://www.tpinauka.ru/2017/08/Khotemskoy.pdf> (дата обращения: 14.06.2019).
6. Приказ Министерства образования и науки РФ от 17 августа 2015 г. N 849 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по специальности 14.05.02 Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг (уровень специалитета)». – URL : <http://fgosvo.ru/news/2/1329> (дата обращения: 30.07.2019).
7. Руденко, В. А. Ранняя профессиональная ориентация в сфере атомной энергетики как фактор стратегического развития атомной отрасли / В. А. Руденко, М. В. Головкин, Н. В. Ермолаева, Н. И. Лобковская // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4 (29). – С. 97-108.
8. Послание Президента РФ В.В. Путина Федеральному Собранию, март 2018. – URL : <http://www.kremlin.ru/events/president/news/56957> (дата обращения: 30.07.2019).
9. Меньше всего довольных выбором профессии среди экономистов, технологов и экологов. – URL : <https://www.superjob.ru/research/articles/111726/menshe-vsego-dovolnyh-vyborom-professii-sredi-ekonomistov/> (дата обращения: 30.07.2019).
10. Предприятия Росатома поддерживают инициативу ранней профориентации школьников и студентов. – URL : <https://www.rosatom.ru/journalist/news/predpriyatiya-rosatoma-podderzhivayut-initsiativu-ranney-proforientatsii-shkolnikov-i-studentov/> (дата обращения: 14.06.2019).
11. От ранней профориентации – к профессии инженера. – URL : <https://www.spbstu.ru/media/smi/education/early-career-guidance-engineering-profession/> (дата обращения: 14.06.2019).
12. Ранняя профориентация: пространство новых возможностей. – URL : <http://www.edu.ru/news/ekslyuzivny/rannaya-proforientatsiya-prostranstvo-novykh-vozmozh/> (дата обращения: 14.06.2019).
13. Ранняя профориентация – осознанный выбор будущей профессии: в ВИТИ НИЯУ МИФИ состоялось расширенное совещание по активизации выбора учащимися востребованных профессий. – URL : <http://www.volgodonskgorod.ru/node/27973> (дата обращения: 30.07.2019).
14. Профориентация младших школьников: «за» и «против». – URL : <https://academia.interfax.ru/ru/analytics/research/2761/> (дата обращения: 30.07.2019).
15. Ценности Росатома. – URL : <https://www.rosatom.ru/about/mission/> (дата обращения: 10.06.2019).
16. Русатом Оверсиз. – URL : <http://www.rusatom-overseas.com/ru/about-rusatom-overseas/our-values/> (дата обращения: 17.06.2019).

REFERENCES

- [1] Spravochnik «Kar`era v atomnoj otrasli». Vy`pusk № 3. Speczproekt Centra kar`ery` Goskorporacii «Rosatom» [«Career in Nuclear Industry» Reference book. Issue 3. A special project of the career Center «Rosatom» State Corporation]. URL: https://rosatomcareer.ru/mediafiles/u/files/Centr%202014/Career_3.pdf (in Russian).
- [2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional`noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul`tury` bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of Future Nuclear Specialist Safety Culture]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).
- [3] Managing human resources in the field of nuclear energy. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2009. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1397_web.pdf (in Russian).
- [4] Sovremennyy`e trebovaniya k rabotnikam korporacii «Rosatom» [Modern Requirements to the Employees of «Rosatom» Corporation]. URL: <http://900igr.net/prezentacija/fizika/istorija-sozdaniya-atomnoj-energetiki-197930/sovremennyye-trebovaniya-k-rabotnikam-korporatsii-rosatom-19.html> (in Russian).
- [5] Hotemskoy N. A. Kadrovaya politika gosudarstvenny`x korporacij na primere «Rosatom» [Personnel Policy of State Corporations on the Example of «Rosatom»]. Mezhdunarodny`j nauchno-texnicheskij zhurnal «Teoriya. Praktika. Innovacii» [International Scientific and Technical Journal «Theory. Practice. Innovation»]. Avgust [August], 2017. URL: <http://www.tpinauka.ru/2017/08/Khotemskoy.pdf> (in Russian).
- [6] Prikaz Ministerstva obrazovaniya i nauki RF ot 17 avgusta 2015 g. N 849 «Ob utverzhdenii federal`nogo gosudarstvennogo obrazovatel`nogo standarta vy`sshego obrazovaniya po special`nosti 14.05.02 Atomny`e stancii: proektirovanie, e`kspluatatsiya i inzhiniring (uroven` specialiteta)» [Order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of August 17, 2015 N 849 «Approval of the Federal State Educational Standard of Higher Education in the Specialty

- 14.05.02 Nuclear Power Plants: Design, Operation and Engineering (level of specialization)»]. – URL: <http://fgosvo.ru/news/2/1329> (in Russian).
- [7] Rudenko V.A., Golovko M. V., Ermolaeva N.V., Lobkovskaya N.I. Rannaya professional'naya orientatsiya v sfere atomnoj e'nergetiki kak faktor strategicheskogo razvitiya atomnoj otrasli [Early Professional Orientation in the Field of Nuclear Energy as a Factor of Nuclear Industry Strategic Development]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2018. № 4 (29). P. 97-108 (in Russian).
- [8] Poslanie Prezidenta RF V.V. Putina Federal'nomu Sobraniyu [Russian President Vladimir Putin's Message to the Federal Assembly]. Mart [March], 2018. URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/56957> (in Russian).
- [9] Men'she vsego dovol'ny'x vy'borom professii sredi e'konomistov, texnologov i e'kologov [Least Satisfied with the Choice of Profession among Economists, Technologists and Environmentalists]. URL: <https://www.superjob.ru/research/articles/111726/menshe-vsego-dovolnyh-vyborom-professii-sredi-ekonomistov/> (in Russian).
- [10] Predpriyatiya Rosatoma podderzhivayut iniciativu rannej proforientatsii shkol'nikov i studentov [Rosatom Enterprises Support the Initiative of Early Career Guidance for Schoolchildren and Students]. URL: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/predpriyatiya-rosatoma-podderzhivayut-initsiativu-rannej-proforientatsii-shkolnikov-i-studentov-/> (in Russian).
- [11] Ot rannej proforientatsii – k professii inzhenera [From Early Career Guidance to the Profession of Engineer]. URL: <https://www.spbstu.ru/media/smi/education/early-career-guidance-engineering-profession/> (in Russian).
- [12] Rannaya proforientatsiya: prostranstvo novy'x vozmozhnostej [Early Career Guidance: a Space of New Opportunities]. URL: <http://www.edu.ru/news/ekslyuzivny/rannaya-proforientatsiya-prostranstvo-novyh-vozmog/> (in Russian).
- [13] Rannaya proforientatsiya – osoznanny'j vy'bor budushhej professii: v VITI NIYaU MIFI sostoyalos' rasshirennoe soveshhanie po aktivizatsii vy'bora uchashhimisya vostrebovanny'x professij [Early Career Guidance – Informed Choice of Future Profession: in VITI NRNU MEPhI Held an Extended Meeting to Enhance the Choice of Students in Demand Professions]. URL : <http://www.volgodonskgorod.ru/node/27973> (in Russian).
- [14] Proforientatsiya mladshix shkol'nikov: «za» i «protiv» [Vocational Guidance of Primary School Students: «For» and «Against»]. URL: <https://academia.interfax.ru/ru/analytics/research/2761/> (in Russian).
- [15] Cennosti Rosatoma [The Values Of Rosatom]. URL : <https://www.rosatom.ru/about/mission/> (in Russian).
- [16] Rusatom Oversiz [RusAtom Overseas]. URL : <http://www.rusatom-overseas.com/ru/about-rusatom-overseas/our-values/> (in Russian).

Formation of Universal Competencies at the Stage of Early Career Guidance in the Nuclear Energy Field

V.A. Rudenko¹, N.P. Vasilenko², N.V. Ermolaeva³, N.I. Lobkovskaya⁴

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

¹ORCID iD: 0000-0002-6698-5469

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0001-7054-1302

WoS Researcher ID: G-4963-2017

e-mail: NPVasilenko@mephi.ru

³ORCID iD: 0000-0001-6547-7553

WoS Researcher ID: V-4783-2018

e-mail: NVErmolaeva@mephi.ru

⁴ORCID iD: 0000-0002-0297-5800

WoS Researcher ID: O-3879-2018

e-mail: NILobkovskaya@mephi.ru

Abstract – The article discusses research materials on the application of new approaches to the formation of human resources for the nuclear industry as part of the early career guidance of schoolchildren. “Young Nuclear Expert”, a regional model for the early career guidance of schoolchildren, is developed based on an analysis of the current requirements for Rosatom employees, corporate values, the importance of the human factor in the safe operation of nuclear power plants, and the Concern’s recommendations. The events carried out by the chairs of VETI NRNU MEPhI to form universal competencies among younger students, their professional self-determination are highlighted.

Keywords: early career guidance, Rosatom State Corporation, corporate values, universal competencies, professional self-determination, engineering and technical motivation of schoolchildren, summer science and technology school.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Абидова Е.А.	71, 76
Аникеев А.В.	62
Арутюнян А.К.	50
Афшар И.	62
Бейсуг О.И.	7
Василенко Н.П.	110
Выговский С.Б.	50
Дембицкий А.Е.	76
Елохин А.П.	96
Ермолаева Н.В.	110
Жидков М.Е.	27
Колоколов Е.И.	27
Кравчук А.И.	37
Кравчук А.С.	37
Кривин В.В.	43
Ксенофонтов А.И.	96
Лобковская Н.И.	110
Лыскова И.Е.	85
Муха Ю.П.	76
Орумо К.	96
Писарева Д.А.	62
Проскуряков К.Н.	62
Руденко В.А.	110
Саункин В.Т.	43
Толстов В.А.	43
Томилин С.А.	27
Хачатрян А.Г.	50
Чернов А.В.	76
Чернявский В.П.	18
Шпицер В.Я.	43

AUTHOR INDEX OF VOL. 4, 2019

Abidova E.A.	71, 76
Afshar E.	62
Anikeev A.V.	62
Beisug O.I.	7
Cherniavsky V.P.	18
Chernov A.V.	76
Dembitsky A.E.	76
Elokhin A.P.	96
Ermolaeva N.V.	110
Harutyunyan A.	50
Khachatryan A.	96
Kolokolov E.I.	50
Kravchuk A.I.	27
Kravchuk A.S.	37
Krivin V.V.	37
Ksenofontov A.I.	43
Lobkovskaya N.I.	96
Lyskova I.E.	110
Mucha Yu.P.	85
Orumo K.	76
Pisareva D.A.	62
Proskuryakov K.N.	62
Rudenko V.A.	110
Saunkin V.T.	43
Shpitser V.Y.	43
Tolstov V.A.	43
Tomilin S.A.	27
Vasilenko N.P.	110
Vygovskiy S.B.	50
Zhidkov M.E.	27

NOTES FOR AUTHORS

(Dear authors, the editors of the journal draw your attention to some changes in the rules of the article preparation)

The full text of article intended for publication should be signed by authors, it has to be followed by application from the institution where the work is made, resolution on publication possibility. One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title, the structured abstract (200-250 words) and keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- the list of references in Russian and English;
- 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; specify who to be corresponded with;
- a file with information about place of employment in Russian and English, including the postal address and index (specify the place of employment of each author);
- ORCID и Researcher ID index of each author (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>).

The article should be structured: introduction (review of problems, objective of work); theory of the issue; a detailed presentation of the methods of conducting experiments, a description of materials and methods of analysis, statistical processing is desirable; the discussion of the results; conclusion. It is enough to describe the objective of the work and the results obtained for articles of a production nature.

The article should contain only the most necessary formulas, it is desirable to abandon the intermediate calculations. The equation editor of Equation 3.0 is recommended to record the formulas. All formulas are aligned to the center of the page, numbered in parentheses on the right and referred to in the text of the article. Inclusion of tables in the article should be appropriate. Tables should be numbered and headings in Russian and English (10 pf). It is desirable that the tables do not exceed one page of text. Figures should be clear when printing in black and white, numbered, figure captions in Russian and English (10 pf), have links in the text and be accompanied by justifications and conclusions. The units of measurement should be given in accordance with the International System (SI).

An article should be processed in the Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 format, 12 point font Times New Roman; print – 1 interval. Please do not use signs of forced transfer and additional gaps. Page parameters: all sides are 2,5 cm. The volume of article has to be no more than 15 pages of the typewritten text, including tables, drawings (no more than 10) and the list of references (12-20 sources). If the text of the article is less than 2500 type characters, it may not be considered. It is necessary to check the articles through the Antiplagiat program, allowable borrowing and self-citation – no more than 20%.

In order to improve the quality and objectivity of publications, the authors are intended to reflect the advanced scientific experience of foreign countries, Russia and the CIS on the subject matter in the articles. The bibliography should be in accordance with State Standard Specification (GOST) 7.0.100-2018 «Bibliographic Record and Bibliographic Description. General Requirements and Drafting rules». References should include at least 12 sources (no more than 3 references to your own articles). There should be obligatory at least 5 sources later than 2016, and at least 4 references to foreign studies of recent years (from foreign countries, outside the former USSR). References are given at the end of article in order they mentioned. References are highlighted with square brackets. References to foreign sources are given in the original language and are accompanied, in case of translation into Russian, with indication of the translation. Textbooks, reference books, guidelines and recommendations are not included in the list of references. References are provided separately (see the guidelines in «The List of References Standard in English»). The bibliography in English should be issued according to **Scopus** standard specification. Indicate article **DOI** if it in the presence.

To accept an article in the journal you should provide the following materials:

- an article file in Word format;
- the same file in pdf format signed by the author;
- separate files of all pictures in the bmp, jpeg or gif formats;
- application from the institution where the work is made;
- expert resolution on publication possibility.

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). P. 25-31 (in Russian).
- [2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul'tury` bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of a Future Nuclear Specialist]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).

For books:

- [3] 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. 215 p. (in Russian).

For web-resources:

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

For foreign references:

- [5] 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:

- [6] Gerasimov S.I., Kuzmin V.A. Issledovaniye osobennostey initsirovaniya svetochuvstvitelny vzryvchatykh sostavov nekogerentnym izlucheniem [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):

- [7] 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.

Editorial office address (for sending printed correspondence):
347360, Russia, Rostov region, Volgodonsk, Lenin Street, 73/94
Editorial office of «Global Nuclear Safety» journal
E-mail: oni-viti@mephi.ru
Tel: +79281883628

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

(уважаемые авторы, редакция журнала обращает ваше внимание на некоторые изменения правил оформления статей)

Полный текст статьи, предназначенной для опубликования, должен быть подписан авторами и сопровождаться представлением от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертным заключением о возможности опубликования. В одном файле помещается одна статья, частью которой является:

- индекс УДК;
- название, структурированная аннотация (200-250 слов) и ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- список литературы на русском и английском языках;
- сведения об авторах на русском и английском языках: ФИО, место работы, должность, ученая степень, звание, домашний, служебный и электронный адреса, телефон; указать, с кем вести переписку;
- индексы ORCID и Researcher ID для каждого автора (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>)

Статья должна быть структурирована: введение (обзор проблем, цель работы); теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов, описание материалов и методов анализа, желательна статистическая обработка; обсуждение результатов; заключение. Для статей производственного характера достаточно описать цель работы» и полученные результаты.

Статья должна содержать лишь самые необходимые формулы, от промежуточных выкладок желательно отказаться. Для записи формул рекомендуется применять редактор Equation 3.0. Все формулы выравниваются по центру страницы, нумеруются в круглых скобках по правому краю и упоминаться в тексте статьи. Включение таблиц в статью должно быть целесообразным. Таблицы должны иметь нумерацию и заголовки на русском и английском языках (10 пт). Желательно, чтобы таблицы не превышали одной страницы текста. Рисунки должны быть понятными при черно-белой печати, с нумерацией, подписями на русском и английском языках (10 пт), иметь ссылки в тексте и сопровождаться обоснованиями и выводами. Единицы измерения следует давать в соответствии с Международной системой (СИ).

Статья оформляется в Microsoft Office 97-2003 Word 7.0 через 1 интервал, шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, без знаков принудительного переноса и дополнительных пробелов. Поля со всех сторон – 2,5 см. Объем статьи – не более 15 страниц машинописного текста, включая таблицы и рисунки (не более 10-и), список литературы (12-20 источников). Если в тексте статьи менее 2500 знаков, статья может не рассматриваться. Необходима проверка статей через программу антиплагиата, допустимые заимствования и самоцитирование – не более 20%.

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт стран дальнего зарубежья, России и СНГ по рассматриваемой проблематике. Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.0.100-2018 (дата введения – 01.07.2019) «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Список литературы включает в не менее 12-и источников (из них не более 3-х ссылок на собственные работы), с обязательным включением как минимум 5-и источников позднее 2016 г., и не менее 4 ссылок на зарубежные (из стран дальнего зарубежья, за пределами бывшего СССР) исследования последних лет. Список литературы приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте в квадратных скобках номера источника. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала и сопровождаются, в случае перевода на русский язык, указанием на перевод. Учебники, учебные пособия, академические методические указания и рекомендации не включаются в список литературы. References приводятся после списка литературы на русском языке (правила оформления см. в разделе The list of references standard in English). Библиография на английском языке должна быть оформлена в соответствии со стандартом Scopus. Укажите артикул DOI, если он есть.

Для принятия статьи в номер журнала необходимо предоставить следующие материалы:

- файл со статьей в формате Word;
- этот же файл в формате pdf с подписью авторов;
- отдельными файлами все рисунки из статьи в форматах bmp, jpeg или gif;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Для книг с одним автором:

Кесслер, Г. Ядерная энергетика / Г. Кесслер ; перевод с английского Ю. И. Митяев. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 264 с.

Для книг с двумя и более авторами:

Емельянов, И. Я. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов / И. Я. Емельянов, П. А. Гаврилов, Б. Н. Селивестров. – Москва : Атомиздат, 1975. – 280 с.

Для журналов с одним автором:

Пантелей, Д. С. Атомная энергетика как неотъемлемый компонент энергетического комплекса Российской Федерации / Д. С. Пантелей // Наукоедение. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 39.

Для журналов с двумя и более авторами:

Обогащение регенерированного урана в двойном каскаде газовых центрифуг с его максимальным возвратом в производство топлива / А. Ю. Смирнов, В. Е. Гусев, Г. А. Сулаберидзе, В. А. Невиница, П. А. Фомиченко // Вестник национального ядерного университета «МИФИ». – 2018. – Том 7, № 6. – С. 449-457.

Для диссертаций:

Беликов, С. О. Разработка методов интенсификации акустических резонансов и снижения уровня вибраций в главном паропроводе АЭС с ВВЭР-1000 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / С. О. Беликов. – Москва, 2013. – 30 с.

Для депонированных работ:

Кондраш, А. Н. Пропаганда книг / А. Н. Кондраш. – Москва, 1984. – 21 с. – Депонировано в НИЦ «Информпечать» 25.07.84. ФН 176.

Описание архивных материалов:

Харитон, Ю. Б. Письмо Б.Л. Ванникову о лаборатории для разработки атомных бомб // ЧУ «Центратомархив». Фонд № 1, опись № 1/с, дело № 228, л. 76-79. – URL : http://elib.biblioatom.ru/text/carhiv_001-1s-228_076/go,0/ (дата обращения : 26.03.2019).

Список ученых, участвующих в работе по использованию атомной энергии. 17 января 1946 //Атомная программа СССР : архивные документы. – ж URL : http://elib.biblioatom.ru/text/arhiv_akademik-artsimovich_2009_386/go,0/ (дата обращения : 03.09.2019).

Материалы конференций:

Сулаберидзе, Г. А. О некоторых разделительных проблемах при вовлечении регенерированного урана в топливный цикл / Г. А. Сулаберидзе, В. Д. Борисевич, Се Цюаньсинь // Сборник докладов IX Всероссийской (Международной) научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», Россия, Звенигород, 4-8 октября. – Троицк : ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2004. – С. 78.

Шишков, Ю. Россия и мировой рынок: структурный аспект / Ю. Шишков // Социальные приоритеты и механизмы преобразований в России : материалы международной конференции, Москва, 12-13 мая 1998 г. – Москва : Магма, 1993. – С. 19-25.

Для патентов:

Патент 2187888 Российская Федерация, МПК7 Н 04 В 1/38, Н 04 J 13/00. Приемопередаточное устройство : заявитель и патентообладатель Воронежский научно-исследовательский институт связи. – № 2000131736/09 ; заявл. 18.12.00 ; опубл. 20.08.02, Чугаева В. И. – 3 с.

Для электронных ресурсов:

Дирина, А. И. Право военнослужащих РФ на свободу ассоциаций / А. И. Дирина // Военное право : сетевой журнал – 2010. – № 2. – URL : <http://voennoepravo.ru/node/2149> (дата обращения: 01.08.2018).

...

Адрес редакции журнала (для отправки печатной корреспонденции):
347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность»
E-mail: oni-viti@mephi.ru
Тел.: +79281883628

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2019, 4(33)

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

Сдано в набор 12.12.2019 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 16.12.2019 г.

Бумага «SvetoCopy» 80 г/м². Объем 8,74. печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ