

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2021, 3(40)

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*)

Abdel-Monem Mohamed El-Batahy, Doctor of Technical sciences, Professor (*Egypt*)

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*)

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

2021, 3(40)

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)

Дэнис Флори, заместитель генерального директора МАГАТЭ (Австрия)

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

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

Абдель-Монем Мохамед Эл-Батахи, д-р техн. наук, проф. (Египет)

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

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

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

С.Э. Гоок, к-т техн. наук (Германия)

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

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

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

Ю.И. Пимшин, 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

2021, 3(40)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

Analysis of the Rostov NPP Operation Influence ON Radiation Factors of Industrial Area Atmospheric Air

I.A. Bublikova, O.F. Tsuverkalova, K.S. Aksenova 7

Determining the Model Spatial Position under Intense Background Illumination

S.I. Gerasimov V.I. Erofeev, V.I. Kostin, E.G. Kosyak, P.G. Kuznetsov, R.V. Gerasimova 17

Determination of Soil Barrier Resistance Influence to Compact Nuclear Power Plant at Emergency Situation

O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze 25

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

Probabilistic Method and Model for the Intermodular Interaction Parameters Estimating in Vibration Protection Control Systems of Turbine Units

D.A. Plotnikov 37

Evaluation of Radiant Heat Transfer Influence on the Temperature Field of Fuel Element Microcell of Pressurized Water-Cooled Nuclear Reactor

V.K. Semenov, N.B. Ivanova, M.A. Volman, A.A. Belyakov 52

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Validation of the Physical Parameters of Monte Carlo Code Openmc by Unk Code for Different VVER 1200 Fuel Assemblies

H.A. Tanash, D.A. Solovyev, V.G. Zimin, A.A. Semenov, N.V. Schukin, B. Djaroum, A.I. Al-Shamayleh 62

Modeling of Erosion-Corrosion Wear of Pipelines and Monitoring of its Development Based on Magnetic Anisotropic Method

A.K. Adamenkov, I.N. Veselova 68

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

Special Aspects of Nuclear Energy as Object to Control

M.V. Golovko, Yu.V. Vertakova, V.Y. Galkovskaya, A.N. Setrakov 75

Strategic Planning of Municipal Education Development in Modern Conditions (on the
example of the city of Volgodonsk)

D.G. Khukhlaev, V.E. Dovbysh 85

Author Index of vol. 3, 2021 93

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 3(40), 2021

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Анализ влияния эксплуатации Ростовской АЭС на радиационные факторы атмосферного воздуха территории размещения

И.А. Бубликова, О.Ф. Цуверкалова, К.С. Аксенова7

Определение пространственного положения модели при интенсивных фоновых засветках

*С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.И. Костин, Е.Г. Косяк,
П.Г. Кузнецов, Р.В. Герасимова*17

Определение влияния сопротивления грунтовой преграды на малогабаритную ядерную энергетическую установку при аварийной ситуации

О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе25

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

Вероятностный метод и модель для оценки параметров межмодульного взаимодействия в системе управления защитой турбоагрегата по вибрации

Д.А. Плотников37

Оценка влияния лучистого теплообмена на температурное поле микроячейки тепловыделяющего элемента водо-водяного ядерного реактора

В.К. Семенов, Н.Б. Иванова, М.А. Вольман, А.А. Беляков52

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Проверка физических параметров кода Монте-Карло OpenMC с помощью кода UNK для различных ТВС ВВЭР-1200

*Х.А. Танааш, Д.А. Соловьёв, В.Г. Зимин, А.А. Семенов, Н.В. Щукин,
Б. Джарум, А.И. Аль-Шамайлах*62

Моделирование эрозионно-коррозионного износа трубопроводов и мониторинг его развития на основе магнитоанізотропного метода

А.К. Адаменков, И.Н. Веселова68

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

Особенности атомной энергетики как объекта управления

М.В. Головки, Ю.В. Вертакова, В.Е. Галковская, А.Н. Сетраков.....75

Стратегическое планирование развития муниципального образования в современных условиях (на примере города Волгодонска)

Д.Г. Хухлаев, В.Е. Довбыш.....85

Авторский указатель номера 3(40), 2021.....92

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 504:621.039:664

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РОСТОВСКОЙ АЭС
НА РАДИАЦИОННЫЕ ФАКТОРЫ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА
ТЕРРИТОРИИ РАЗМЕЩЕНИЯ**

© 2021 И.А. Бубликова, О.Ф. Цуверкалова, К.С. Аксенова

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

Эксплуатация радиационно-опасных объектов в настоящее время является предметом обсуждения и споров об их безопасности. В ходе работы проведено исследование влияния эксплуатации Ростовской АЭС на радиационные факторы атмосферного воздуха ее размещения методом регрессионно-корреляционного анализа. В работе были использованы результаты государственного мониторинга радиационной обстановки (среднемесячные и максимальные за месяц значения) с января 2009 г. по декабрь 2020 года и метеорологические характеристики атмосферы промплощадки АЭС. Связь между исследуемыми параметрами в режиме планово-предупредительных ремонтов энергоблоков, а также в межремонтный период не установлена.

Ключевые слова: эксплуатация РОО, суммарная β -активность, атмосферные выпадения, осадки, устойчивость направления ветра, территория размещения, планово-предупредительный ремонт, Ростовская АЭС, атмосфера.

Поступила в редакцию 25.06.2021

После доработки 17.08.2021

Принята к печати 23.08.2021

Введение

Влияние эксплуатации атомных станций на радиационную безопасность населения и территорий размещения находится под постоянным контролем специалистов в области радиационной безопасности [1] и привлекает внимание общественности. Существующие опасения населения о негативном воздействии объектов ядерной энергетики на окружающую среду и здоровье жителей делают рассматриваемую тему работы актуальной.

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Ростовская АЭС располагается в Южном регионе Европейской части Российской Федерации, первый энергоблок эксплуатируется с 2001 г. Авторами уже проводились исследования динамики ряда радиационных факторов территории размещения Ростовской АЭС [2-7]. В данной работе проведено исследование влияния Ростовской АЭС на радиационные характеристики атмосферного воздуха данного региона в условиях ее штатной работы и в период планово-профилактических работ (ППР).

При анализе данных были использованы результаты Единой государственной автоматизированной системы мониторинга радиационной обстановки на территории Российской Федерации, представленные в ежегодниках «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств» Научно-производственного объединения «Тайфун», входящего в состав Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [8-19].

Следует отметить, что в регионе размещения Ростовской АЭС находится целый ряд постов, входящих в систему государственного радиационного мониторинга. Для

анализа влияния эксплуатации атомной станции на радиационные характеристики региона ее размещения были выбраны населенные пункты: г. Ростов-на-Дону, г. Волгоград, г. Котельниково, п. Зимовники, г. Цимлянск (рис. 1), данные по которым использовались в работе. Они имеют разную ориентацию по сторонам света относительно АЭС и находятся на разной удаленности от нее (табл. 1).



Рисунок 1 – Расположение выбранных населенных пунктов для анализа радиационных параметров воздушной среды [Location of selected settlements for the analysis of radiation parameters of the air environment]

Таблица 1 – Характеристика расположения исследуемых населенных пунктов относительно Ростовской АЭС [Characteristics of the location of the settlements under study in relation to Rostov NPP]

Населенный пункт	Расстояние от Ростовской АЭС, км	Круговой азимут
Волгоград	203	45°
Зимовники	50	180°
Котельниково	58	90°
Ростов-на-Дону	203	247°5'
Цимлянск	20	315°

Анализ влияния эксплуатации Ростовской АЭС на суммарную β -активность атмосферных выпадений в приземном слое воздуха региона размещения

В качестве анализируемого параметра была выбрана суммарная β -активность атмосферных выпадений в приземном слое воздуха в вышеперечисленных населенных пунктах. Было выдвинуто две гипотезы:

1. Если эксплуатация Ростовской АЭС оказывает влияние на радиационные характеристики воздушной среды региона размещения, то динамика суммарной бета-активности атмосферных выпадений будет меняться в соответствии с динамикой устойчивости ветра от Ростовской АЭС.

2. При увеличении количества осадков вблизи Ростовской АЭС, максимальное количество исследуемого параметра будет выявляться ближе к радиационному объекту.

В связи с этим среднемесячные значения суммарной β -активности атмосферных выпадений были исследованы по двум метеорологическим факторам: устойчивости направления ветра от АЭС и среднемесячному количеству осадков. Период анализа динамики данных – с января 2009 г. по декабрь 2020 года.

Для исследования были использованы результаты метеорологических наблюдений на площадке Ростовской АЭС из ежегодных Технических отчетов АО ИК «АСЭ» «О натуральных гидрометеорологических наблюдениях» за 2009 - 2020 г., предоставленных авторам Ростовской АЭС. Ближайшая к Ростовской АЭС метеостанция Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды располагается в г. Цимлянске. Результаты метеонаблюдений выложены в открытом доступе [20]. Но сравнительный анализ метеоданных из этих двух источников показал их отличия между собой, что неудивительно из-за расстояния в 20 км между метеостанциями. Поэтому в работе были использованы метеоданные максимально близкие к источнику поступления радиоактивных выбросов в атмосферу. На рисунке 2 представлен пример динамики анализируемых параметров для г. Котельниково.

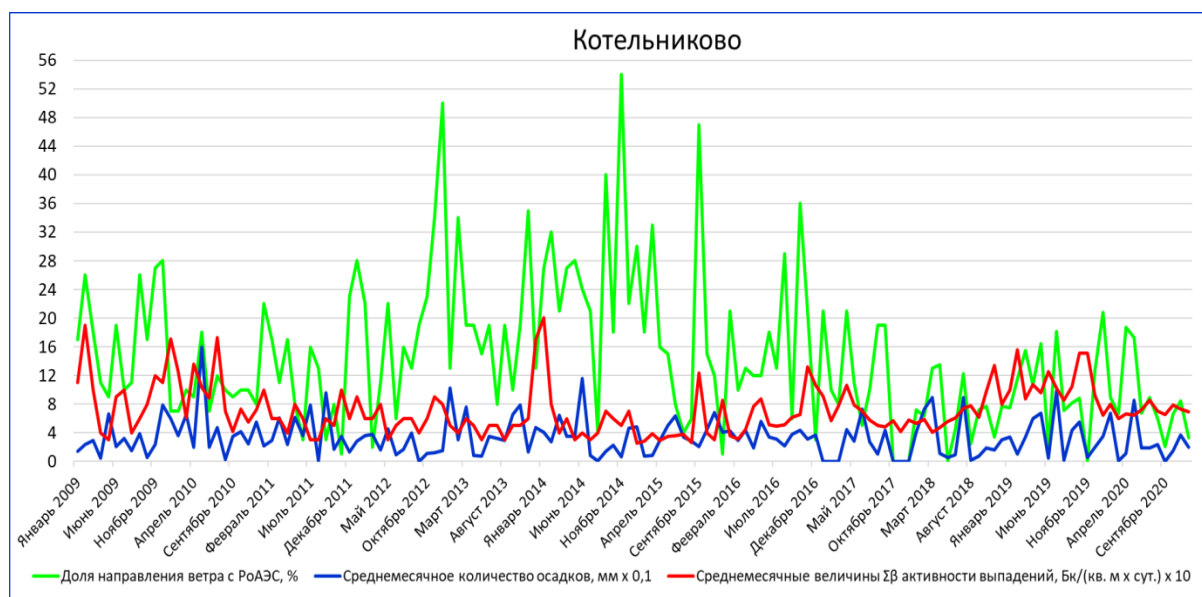


Рисунок 2 – Динамика значений суммарной бета-активности атмосферных выпадений, устойчивости ветра и количества осадков [Dynamics of the values of the total beta-activity of atmospheric precipitation, wind stability and precipitation amount]

Регрессионный анализ, выполненный для всех выбранных населенных пунктов, не позволил получить статистически значимых уравнений трендов, что свидетельствует об отсутствии какой-либо связи динамики данных.

С позиции консервативного подхода, используемого в атомной энергетике, далее был выполнен анализ не только среднемесячных, но и максимальных суточных величин $\Sigma\beta$ активности атмосферных выпадений каждого месяца рассматриваемого периода. Показатели анализировались по тем же населенным пунктам. Характер динамики данных по максимальным значениям $\Sigma\beta$ активности атмосферных выпадений также подтверждает отсутствие влияния эксплуатации атомной станции: выбросы имеют случайный характер, не зависящий от осадков и устойчивости ветра от Ростовской АЭС.

Анализ влияния эксплуатации Ростовской АЭС в период планово-предупредительных ремонтов на суммарную β -активность атмосферных выпадений в приземном слое воздуха региона размещения

Известно, что значительная доля годовых выбросов радионуклидов приходится на период планово-предупредительных, капитальных и внеплановых ремонтов (ППР), на время энергетических пусков энергоблоков. Поэтому была проанализирована суммарная β -активность атмосферных выпадений в периоды пусков блоков и ППР за

тот же период по тем же населенным пунктам [21]. Пример зависимости суммарной бета-активности атмосферных выпадений г. Котельниково от устойчивости ветра во время планово-предупредительных ремонтов Ростовской АЭС представлен на рисунке 3.

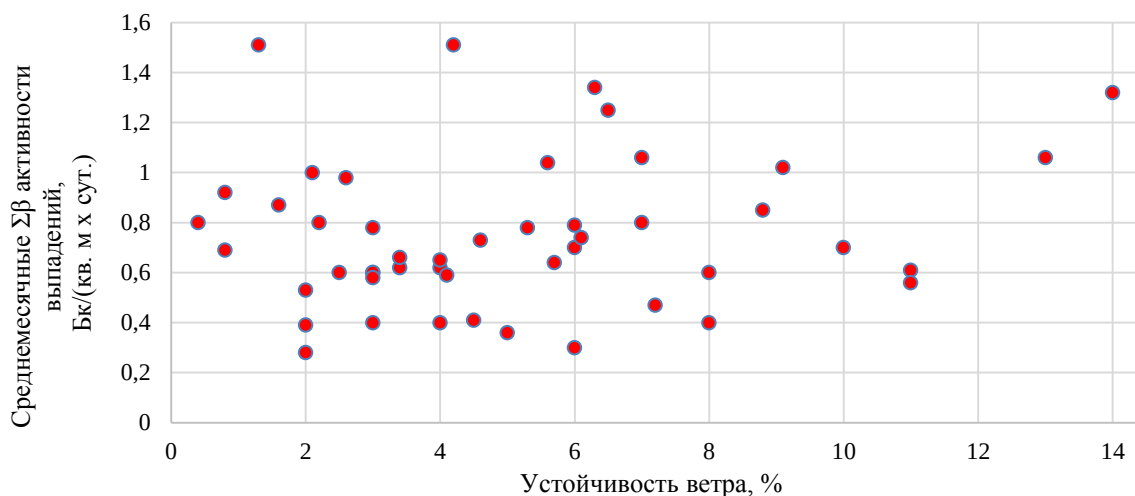


Рисунок 3 – Зависимость суммарной бета-активности атмосферных выпадений г. Котельниково от устойчивости ветра во время планово-предупредительных ремонтов Ростовской АЭС [Dependence of the total beta activity of Kotelnikovo atmospheric deposition from wind stability during scheduled preventive maintenance of the Rostov NPP]

И вновь регрессионный анализ, выполненный для всех выбранных населенных пунктов, не позволил получить статистически значимых уравнений трендов, что свидетельствует об отсутствии какой-либо связи динамики данных.

Как и в предыдущем случае, зависимость суммарной бета-активности атмосферных выпадений от устойчивости ветра во время ППР была рассмотрена для максимальных значений. Показатели анализировались по тем же населенным пунктам и за тот же период времени. Характер зависимости динамики максимальных значений Σβ-активности атмосферных выпадений от устойчивости ветра также подтверждает отсутствие влияния эксплуатации атомной станции.

Таким образом, несмотря на значительную вариацию анализируемого показателя рассмотренных территорий на основании анализа как среднемесячных, так и максимальных значений каждого месяца и в том числе в период в ППР установлено отсутствие влияния эксплуатации Ростовской АЭС на суммарную бета-активность атмосферных выпадений.

Анализ динамики среднегодовых объемных активностей ^{137}Cs и ^{90}Sr в приземном слое воздуха в г. Цимлянск

Дополнительно по данным государственного радиационного мониторинга районов расположения радиационно-опасных объектов была проанализирована динамика среднегодовых объемных активностей ^{137}Cs и ^{90}Sr в приземном слое воздуха в г. Цимлянск, который находится в 20 км от атомной станции в зоне наблюдения Ростовской АЭС (рис. 4 и 5). Период анализа динамики данных – с 2005 по 2020 гг. Для сравнения использовались значения допустимой объемной активностью (ДОО_{нас}) для рассматриваемых радионуклидов [22]. Следует отметить, что в анализируемый период произошли пуски в эксплуатацию трех блоков Ростовской АЭС: пуск энергоблока № 2 – 16.03.2010, энергоблока № 3 – 27.12.2014, энергоблока № 4 – 01.02.2018.

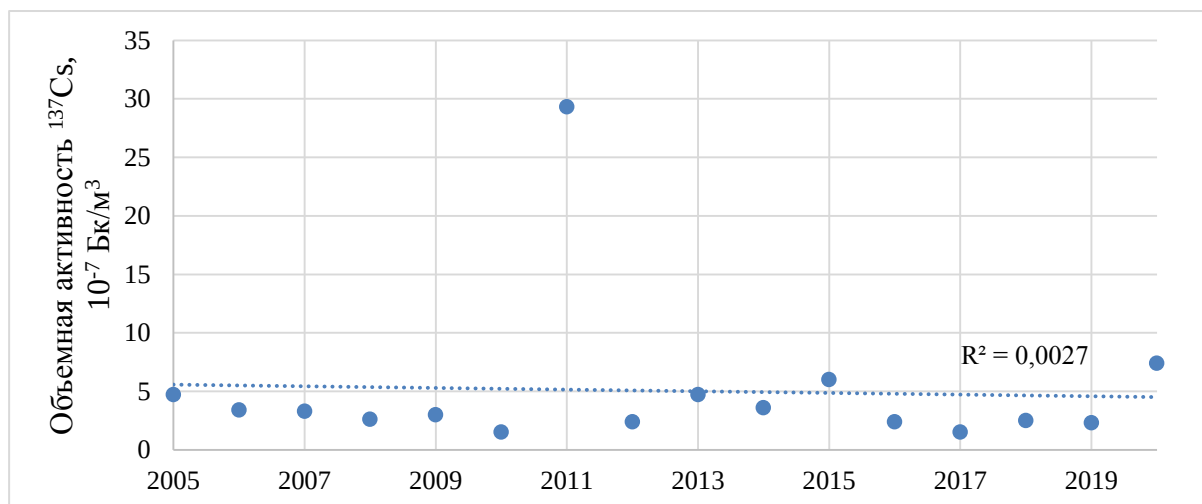


Рисунок 4 – Анализ динамики среднегодовой объемной активности ^{137}Cs в приземном слое воздуха, 10^{-7} Бк/м^3 [Analysis of the average annual volumetric activity dynamics of ^{137}Cs in the surface air layer, 10^{-7} Bq / m^3]

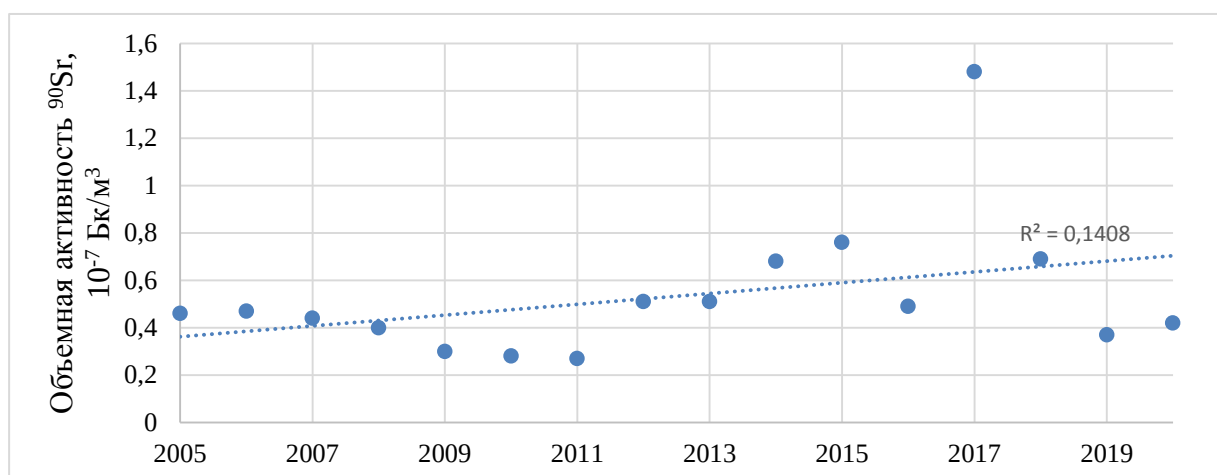


Рисунок 5 – Анализ динамики среднегодовой объемной активности ^{90}Sr в приземном слое воздуха, 10^{-7} Бк/м^3 [Analysis of the average annual volumetric activity dynamics of ^{90}Sr in the surface air layer, 10^{-7} Bq / m^3]

Регрессионный анализ данных показал, что уравнения трендов для ^{90}Sr и ^{137}Cs статистически не значимы, что свидетельствует об отсутствии какой-либо тенденции динамики данных. Для обоих радионуклидов среднегодовые значения на семь порядков меньше ДОА_{нас}. Для уточнения складывающихся трендов необходимо дальнейшее наблюдение за динамикой этих показателей.

Поскольку сложившаяся динамика среднегодовых объемных активностей рассматриваемых радионуклидов в приземном слое воздуха предыдущим анализом не выявлена, то совокупность данных может характеризоваться математическими ожиданиями и среднеквадратичными отклонениями значений. В соответствии с «правилом трех сигм» с вероятностью 0,997 реальные значения показателя могут превышать среднее значение не более чем на три среднеквадратичных отклонения. Для всех имеющихся данных измеренные значения не превышают трех среднеквадратичных отклонений, а также находятся значительно ниже ДОА_{нас} (см. табл. 2). В многолетней динамике выделяется значение среднегодовой объемной активности ^{137}Cs в приземном слое воздуха в 2011 году. Это связано с тем, что в 2011 г. произошел резкий рост объемной активности ^{137}Cs приземного слоя воздуха в первом и, особенно, во втором кварталах (в 11 и 70 раз соответственно). Это увеличение

связано с прохождением по Европейской территории России аварийных выбросов АЭС «Фукусима-1», которое было зафиксировано на данной территории в конце марта – первой половине апреля. В результате увеличилось и среднее за год значение – в 20 раз (до $29,3 \times 10^{-7}$ Бк/м³). Однако г. Цимлянск по величине объемной активности ¹³⁷Cs выглядит сравнительно благополучно на фоне средневзвешенного значения по югу Европейской территории России, где эта величина выросла более чем в 30 раз, до 160×10^{-7} Бк/м³. Но даже в этом случае наблюдался значительный запас до допустимого значения.

Таблица 2 – Статистические характеристики объемных активностей ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в приземном слое воздуха в г. Цимлянск, в период 2005-2020 гг. [Statistical characteristics of the volumetric activities of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the surface air layer in Tsimlyansk, in 2005-2020 period]

Название изотопа	Среднее значение, $\times 10^{-7}$ Бк/м ³	Среднее квадратичное отклонение, $\times 10^{-7}$ Бк/м ³	Среднегодовая допустимая объемная активность (ДОВА), Бк/м ³
¹³⁷ Cs	5,04	6,66	27
⁹⁰ Sr	0,53	0,29	2,7

Выводы

1. Зависимость между погодными условиями на площадке Ростовской АЭС и суммарной β-активностью атмосферных выпадений рассмотренных населенных пунктов региона не выявлена ни по среднемесячным, ни по максимальным значениям каждого месяца с января 2009 г. по декабрь 2020 года. Зависимость исследуемого показателя региона от метеоусловий в период проведения планово-предупредительных ремонтов энергоблоков атомной станции не выявлена.

2. Объемная активность радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в приземном слое воздуха в г. Цимлянск находится на семь порядков ниже допустимых удельных активностей, предусмотренных НРБ-99/2009. Пуски энергоблоков Ростовской АЭС практически не отразились на динамике этих параметров.

Таким образом, влияние эксплуатации Ростовской АЭС на радиационные характеристики атмосферного воздуха региона ее размещения не обнаружено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография / А.П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
2. Бубликова, И.А. Анализ влияния Ростовской АЭС на содержание ¹³⁷Cs в природных объектах тридцатикилометровой зоны / И.А. Бубликова, Е.А. Березина, Е.С. Хандурина // Глобальная ядерная безопасность (официальный сайт журнала – <http://gns.mephi.ru>). – 2014. № 3(12). – С. 5-10.
3. Бубликова, И.А. Анализ влияния Ростовской АЭС на динамику содержания ⁶⁰Co в поверхностном слое почвы территории размещения / И.А. Бубликова // Глобальная ядерная безопасность (официальный сайт журнала – <http://gns.mephi.ru>). – 2015. – № 4(17). – С. 7-14.
4. Бубликова, И.А. Анализ динамики радиационных факторов территории размещения Ростовской АЭС / И.А. Бубликова, О.Ф. Цуверкалова // Глобальная ядерная безопасность (официальный сайт журнала – <http://gns.mephi.ru>). – 2019. – № 3(32). – С. 24-32.
5. Бубликова, И.А. Анализ динамики содержания радионуклидов в продуктах питания, выращенных в зоне наблюдения Ростовской АЭС / И.А. Бубликова, К.С. Аксенова // Системы обеспечения техносферной безопасности: материалы VI Всероссийской конференции и школы для молодых ученых (с международным участием), г. Таганрог, 4-5 октября 2019 г. – Ростов-на-Дону : ЮФУ, 2019. – С. 65-66.
6. Бубликова, И.А. Моделирование накопления радиационных факторов в продуктах питания, выращенных на территории размещения Ростовской АЭС / И.А. Бубликова, К.С. Аксенова // Современные технологии и автоматизация в технике, управлении и образовании: сборник трудов II Международной научно-практической конференции, Балаково, 18 декабря 2019 г. – Москва, 2020. – С. 81-84.

7. I.A. Bublikova, O.F. Tsuverkalova and K.S. Aksenova Analysis of the Rostov NPP operation impact on the radiation factors of the atmospheric air in the location area // *Journal of Physics: Conference Series*. – 1701 012020.
8. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2009 году. – Обнинск, 2010. – 199 с.
9. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010 году. – Обнинск, 2011. – 240 с.
10. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2011 году. – Обнинск, 2012. – 247 с.
11. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2012 году. – Обнинск, 2013. – 220 с.
12. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году. – Обнинск, 2014. – 223 с.
13. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014 году. – Обнинск, 2015. – 233 с.
14. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2015 году. – Обнинск, 2016. – 225 с.
15. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2016 году. – Обнинск, 2017. – 232 с.
16. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 году. – Обнинск, 2018. – 240 с.
17. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. – Обнинск, 2019. – 228 с.
18. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2019 году. – Обнинск, 2020. – 237 с.
19. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды / Научно-производственное объединение «Тайфун» // Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году. – Обнинск, 2021. – 229 с.
20. Архив погоды в Цимлянске [Электронный ресурс]. – URL : https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Цимлянске, свободный – (22.09.2019);6.
21. Отчеты по экологической безопасности Ростовской АЭС. – URL : http://rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-rostovskoy-aes/bezopasnost-i-ekologiya/ekologicheskie-otchety/ (дата обращения: 20.02.2020).
22. Нормы радиационной безопасности НРБ–99/2009. Санитарные правила и нормативы [Электронный ресурс]: СанПиН 2.6.1.2523-09. – 87 с. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/ (дата обращения: 20.03.2021).

REFERENCES

- [1] Elohin A.P. Metody i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushchej sredy [Methods and Tools of Environmental Radiation Monitoring Systems]/ Monografiya. Izdatel'stvo M.: NIYAU MIFI [NRNU Publishing House], 2014, 520 p. (in Russian).
- [2] Bublikova I.A., Berezina E.A., Handurina E.S. Analiz vliyaniya Rostovskoj AES na sodержanie ¹³⁷CS v prirodnyh ob'ektah tridcatikilometrovoy zony [Analysis of Rostov NPP Influence on ¹³⁷CS Content in Natural Objects of Thirty-Kilometer Zone]//Global'naya yadernaya bezopasnost'[Global Nuclear Safety] (oficial'nyj sajt zhurnala - <http://gns.mephi.ru>), 2014. № 3 (12). – P. 5-10 (in Russian).
- [3] Bublikova I.A. Analiz vliyaniya Rostovskoj AES na dinamiku sodержaniya ⁶⁰CO v poverhnostnom sloe pochyv territorii razmeshcheniya [Analysis of Rostov NPP Influence on Dynamics of the ⁶⁰CO Content in the Surface Soil Layer of the Industrial Area]//Global'naya yadernaya

- bezopasnost'[Global Nuclear Safety] (oficial'nyj sayt zhurnala - <http://gns.mephi.ru>), 2015. - № 4 (17). P. 7–14 (in Russian).
- [4] Bublikova I.A., Cuverkalova O.F. Analiz dinamiki radiacionnyh faktorov territorii razmeshcheniya Rostovskoj AES [Analysis of Dynamics of Radiation Factors in the Territory Where the Rostov NPP is Located] //Global'naya yadernaya bezopasnost'[Global Nuclear Safety] (oficial'nyj sayt zhurnala -<http://gns.mephi.ru>), 2019, 3(32), P. 24-32 (in Russian)
- [5] Bublikova I.A., Aksenova K.S. Analiz dinamiki soderzhaniya radionuklidov v produktah pitaniya, vyrashchennyh v zone nablyudeniya Rostovskoj AES [Analysis of the Radionuclide Content Dynamics in Food Products Grown in the Observation Area of the Rostov NPP]//Sistemy obespecheniya tekhnosfernoj bezopasnosti: materialy VI Vserossijskoj konferencii i shkoly dlya molodyh uchenyh (s mezhdunarodnym uchastiem), g. Taganrog 4-5 oktyabrya 2019 g. [Technosphere Safety Systems: Materials of the VI All-Russian Conference and School For Young Scientists (with international participation), Taganrog, October 4-5, 2019] – Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU [Rostov-on-Don: South Federal University Publishing House], 2019. P. 65-66 (in Russian).
- [6] Bublikova I.A., Aksenova K.S. Modelirovanie nakopleniya radiacionnyh faktorov v produktah pitaniya, vyrashchennyh na territorii razmeshcheniya Rostovskoj AES [Modeling the Accumulation of Radiation Factors in Food Products Grown on Rostov NPP Territory]// Sovremennye tekhnologii i avtomatizaciya v tekhnike, upravlenii i obrazovanii: sbornik trudov II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Balakovo, 18 dekabrya 2019 g.[Modern Technologies and Automation in Engineering, Management and Education: Collection of Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, Balakovo, December 18, 2019 – Moskva [Moscow], 2020. P. 81-84 (in Russian).
- [7] I.A. Bublikova, O.F. Tsuverkalova and K.S. Aksenova Analysis of the Rostov NPP Operation Impact on the Radiation Factors of the Atmospheric Air in the Location Area // Journal of Physics: Conference Series. – 1701 012020. (in English).
- [8] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2009 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2009] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2010. – 199 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [9] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2010 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2010] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2011. – 240 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [10] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2011 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2011] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2012. – 247 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [11] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2012 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2012] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2013. – 220 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [12] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2013 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2013] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2014. – 223 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [13] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2014 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2014] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2015. – 233 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).

- [14] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2015 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2015] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2016. – 225 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [15] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2016 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2016] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2017. – 232 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [16] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2017 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2017] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2018. – 240 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [17] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2018 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2018] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2019. – 228 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [18] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2019 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2019] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2020. – 237 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [19] Federal'naya sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchej sredy / Nauchnoпроизводственное об"единение «Тайфун» [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring / Research and Production Association "Typhoon"] // Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2020 godu [Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighboring States in 2020] [Elektronnyj resurs]. - Obninsk, 2021. – 229 p. – Rezhim dostupa: <http://egasmro.ru/ru/data/overall/anrep/radsituation> (in Russian).
- [20] Arhiv pogody v Cimlyanske [Weather Archive in Tsimlyansk] [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://rp5.ru/arhiv-pogody-v-cimlyanske>, svobodnyj – (reference date: 22.09.2019) (in Russian).
- [21] Otchety po ekologicheskoj bezopasnosti Rostovskoj AES [Reports on Environmental Safety of Rostov NPP] [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: http://rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-rostovskoy-aes/bezopasnost-iekologiya/ekologicheskie-otchety/ (reference date: 20.02.2020) (in Russian).
- [22] Normy radiacionnoj bezopasnosti NRB – 99/2009. Sanitarnye pravila i normativy [Standards of Radiation Safety NRB-99/2009. Sanitary Rules and Regulations] [Elektronnyj resurs]: SanPiN 2.6.1.2523-09. – 87 s. – Rezhim dostupa: <http://www.consultant.ru/document/cons-doc-law-90936> (reference date: 20.03.2021) (in Russian).

Analysis of the Rostov NPP Operation Influence ON Radiation Factors of Industrial Area Atmospheric Air

I.A. Bublikova¹, O.F. Tsuverkalova², K.S. Aksenova³

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

¹ORCID iD: 0000-0002-4857-5271

e-mail: IABublikova@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0001-6304-4498

WoS Researcher ID: J-8183-2016

e-mail: ofttsuverkalova@mephi.ru

³*e-mail: kseniya26.08.2014@gmail.com*

Abstract – The operation of radiation hazardous facilities is currently the subject of discussion and controversy about their safety. The study of the influence of the operation of the Rostov NPP on the radiation factors of the atmospheric air of its location is carried out by the method of regression-correlation analysis. The work used the results of state monitoring of the radiation situation (monthly average and maximum monthly values) from January 2009 to December 2020 and the meteorological characteristics of the atmosphere at the NPP industrial site. The relationship between the investigated parameters in the mode of scheduled preventive maintenance, as well as in the overhaul period, is not established.

Keywords: RHF operation, total β -activity, atmospheric fallouts, precipitation, wind direction stability, location area, preventive maintenance, Rostov NPP, atmosphere.

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 533.6.07

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ФОНОВЫХ ЗАСВЕТКАХ

© 2021 С.И. Герасимов^{***}, В.И. Ерофеев^{**}, В.И. Костин^{**}, Е.Г. Косяк^{*},
П.Г. Кузнецов^{*}, Р.В. Герасимова^{*}

^{*} Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Нижегородская обл., Россия
^{**} Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

Описан способ, делающий возможным постановку аэробаллистических испытаний по изучению аэродинамических характеристик высокоскоростных объектов в условиях, когда наблюдается интенсивное самосвечение (сплошной смаз) объекта. При этом обеспечивается удовлетворяющая требованиям аэродинамической отработки точность внешнетраекторных фотограмметрических измерений пространственных линейных координат центра масс.

Ключевые слова: аэробаллистический эксперимент, линейные координаты, самосвечение, фотограмметрия, теневая проекция.

Поступила в редакцию 31.05.2021

После доработки 12.07.2021

Принята к печати 19.07.2021

Определение пространственного положения объекта испытания на траектории полёта основано на применении метода наземных стереофотограмметрических измерений. Данная задача решается по измерениям фотокоординат изображения марок, нанесенных на поверхность объекта испытания, на снимках стереопары, получаемых в процессе стереофоторегистрации объекта испытания в фиксируемый момент времени работы импульсных источников света, с последующей математической обработкой фотограмметрических измерений по заданному алгоритму [1-10].

На рисунке 1 приведены характерные изображения маркированной конической модели в аэробаллистическом эксперименте ($M \approx 5$), зарегистрированные одной из камер, входящей в состав данного стереопоста (№ 6).



Рисунок 1 – Четыре положения модели, зафиксированные в зоне регистрации отдельного стереопоста в аэробаллистическом эксперименте [Four positions of the model fixed in the registration area of a separate stereo post in an aeroballistic experiment]

Получаемые изображения формируются камерами с открытым затвором. При этом каждое последующее положение регистрируемой модели строится в отраженном свете при помощи отдельной импульсной подсветки, синхронизированной по времени с пролетом испытываемой моделью зоны регистрации камеры данного стереопоста [11, 12]. В случае наличия фоновой подсветки качество изображения ухудшается. Если

регистрируемый объект (процесс) сопровождается самосвечением, то ухудшение качества приходится, прежде всего, на зону изображения самого объекта. При увеличении интенсивности самосвечения интегральные фоновые потоки за время пролета моделью зоны регистрации превышают экспозицию импульсной подсветки, и вместе с изображением модели на фоточувствительном материале регистрируется сплошной светящийся трек. Установка экранов в пределах зон регистрации и резкости камер отдельного стереопоста позволяет помимо изображения модели в отраженном свете одновременно получать и ее теневое изображение, качество которого зависит от точности схемы. На рисунке 2 показаны отдельные изображения моделей, полученные при одновременной регистрации теневых изображений. Видно, что начиная с определенных значений скоростей, состояние поверхности модели качественно ухудшается, и нанесенные марки начинают вуалироваться. Приведенные примеры (рис. 2) показывают «стандартные» изображения (1, 2), отвечающие необходимым требованиям дешифровки, и изображения «пограничного» качества (3, 4), когда марки еще просматриваются, и, следовательно, определение всех угловых координат (углов тангажа, рыскания, крена) частично возможно.

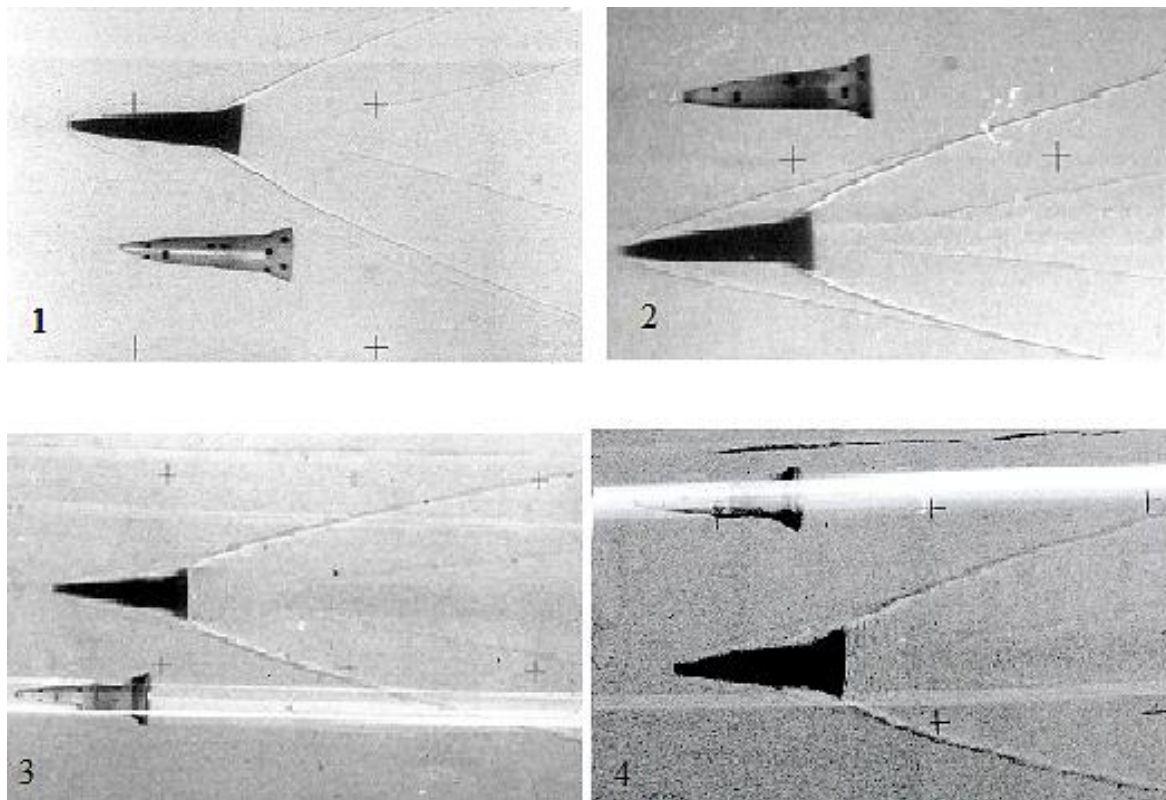
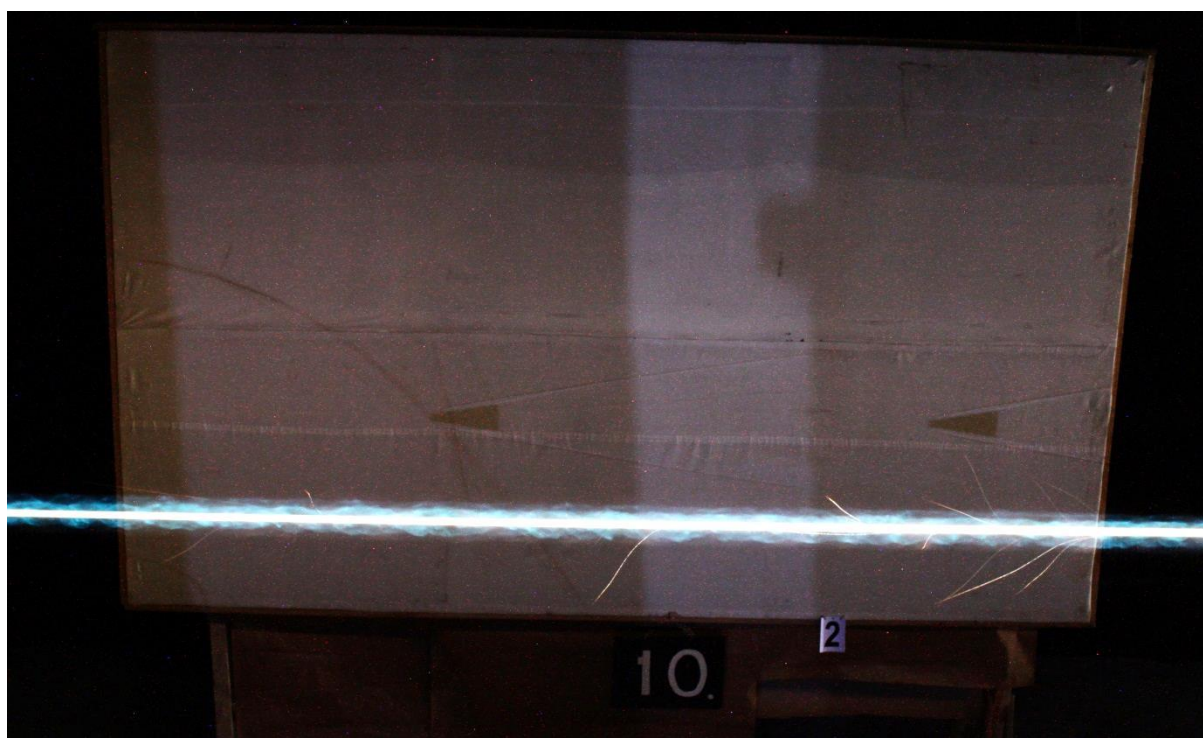


Рисунок 2 – Фотографии летящих моделей в отраженном свете и их теневые изображения, одновременно получаемые фотокамерами стереопостов аэробаллистической трассы с помощью импульсных точечных источников света ($v=1132$ м/с (кадр 1), $v = 1835$ м/с (кадр 2), $v = 1987$ м/с (кадр 3), $v = 2016$ м/с (кадр 4))

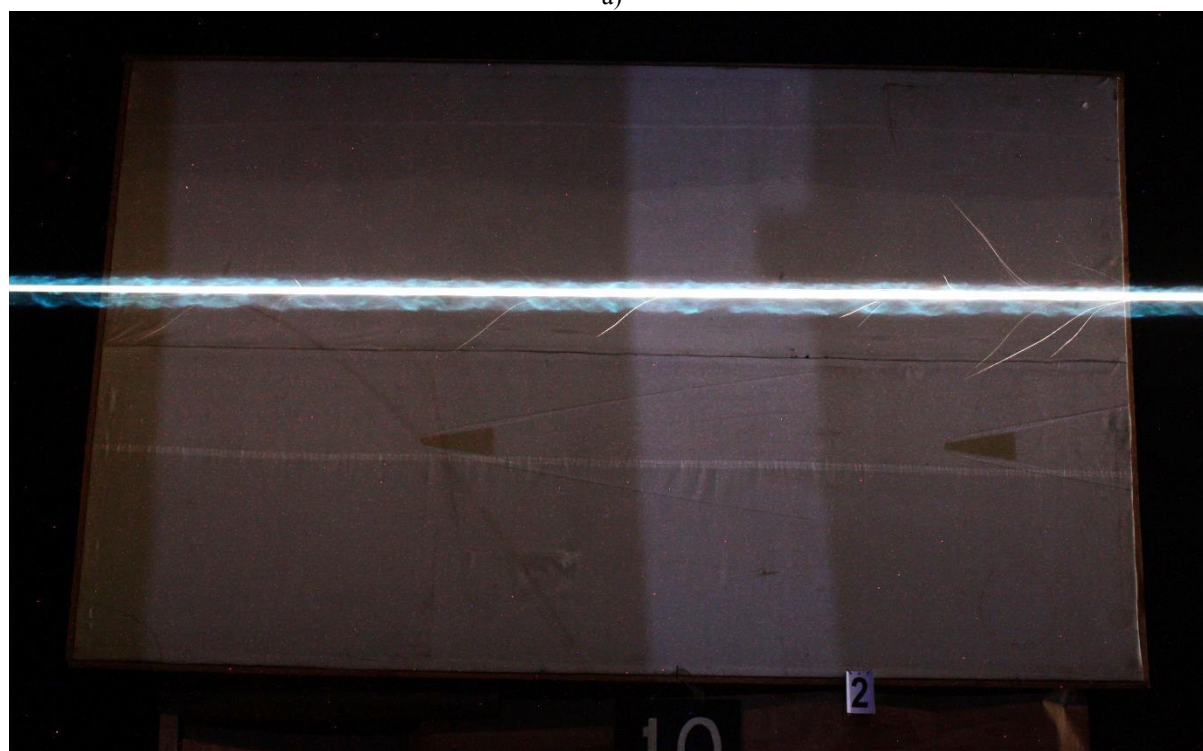
[Photographs of flying models in reflected light and their shadow images, simultaneously obtained by the cameras of the aeroballistic track stereo posts using pulsed point light sources ($v = 1132$ m/s (image 1), $v = 1835$ m/s (image 2), $v = 1987$ m/s (image 3), $v = 2016$ m/s (image 4))]

При более жестких условиях высокоскоростных экспериментов, характеризующихся сильным фоновым свечением ионизованного воздуха и обгаром испытываемых тел из-за большого аэродинамического нагрева и самосвечения высокоскоростной аэродинамической модели в свободном полёте, происходит ее полная засветка (вуалирование) как на высокочувствительной плёнке в случае аналоговых камер, так и на матрице в случае цифровых камер. Траектория полета изображается в виде сплошной линии-трека, на котором невозможно

идентифицировать модель для измерения её положения в пространстве традиционным способом фотограмметрической наземной съёмки (рис. 3).



а)



б)

Рисунок 3 – Кадры с двух цифровых камер одного стереопоста полета модели со скоростью 3.3 км/с
[Images of two digital cameras of one stereo post of the model flight at a speed of 3.3 km/s]

Яркий сплошной трек создается свечением в окрестности носика модели, вихревой след создается летящим вслед модели горящим поддоном. Видны треки частиц, образующихся вследствие аэротермомеханического разрушения материала теплозащитного покрытия. Теневые изображения строятся с помощью точечных

импульсных источников света, запуск которых синхронизирован с моментами нахождения модели в зоне регистрации стереопоста [11, 12].

Получение изображения модели в виде двух проекций, представляющих собой изображение сплошной линии-трека и дискретного теневого изображения модели на снимках, позволяет предложить метод, по которому аналитически можно найти действительное положение модели в пространстве.

Для этого на изображении сплошной линии-трека $n-n$ измеряют не менее двух точек (рис. 4). Через эти точки и центр проекции снимка S , с учётом элементов внутреннего и внешнего ориентирования, строят плоскость SNN . По пересечению прямой, проведенной из центра теневой проекции J и характерную точку T тени модели, с построенной плоскостью SNN определяют пространственные координаты положения точки M высокоскоростной модели на траектории полёта.

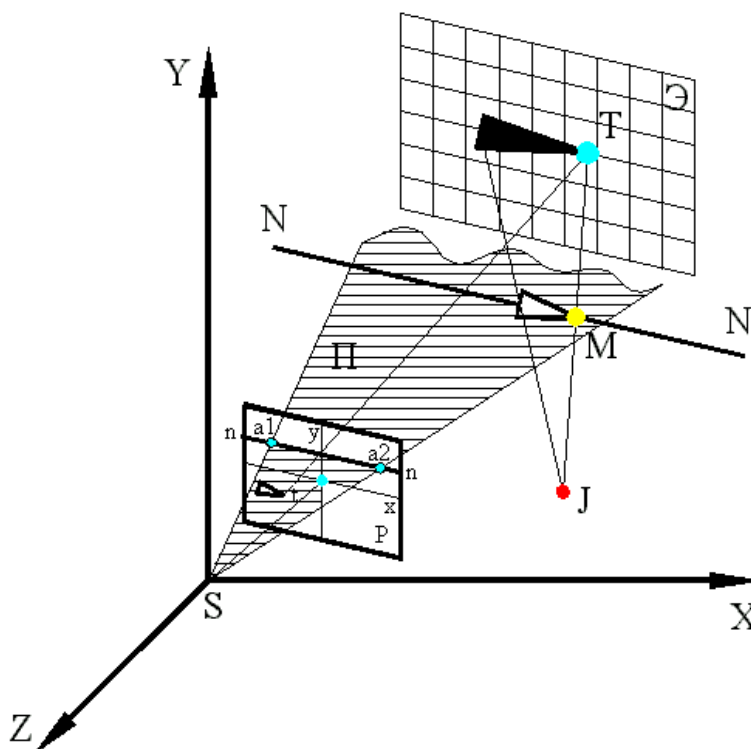


Рисунок 4 – Схема определения пространственного положения модели [Scheme of determining the model spatial position]

По окончании регистрации выполняются измерения на снимке координат изображения характерной точки t тени модели относительно координатных линий экрана и координат двух любых точек a_1, a_2 на изображении сплошной линии nn . По результатам измерений снимка определяются пространственные координаты характерной точки T тени от модели на экране, построение пересекающихся плоскости и прямой и определение пространственных координат летящей модели.

Ниже алгоритм предлагаемого способа описывается более детально.

В процессе движения самосветящейся модели в поле зрения съемочной камеры, располагаемой на близком расстоянии от оси полета модели NN , последняя вследствие вуалирования пленки от самосвечения модели, отобразится на снимке P в прямолинейную сплошную линию nn . В момент подсветки модели гомоцентрическим пучком света от импульсного источника света J с координатами фокуса X_j, Y_j, Z_j , характерная точка M модели с координатами X_M, Y_M, Z_M , проектируемая на экран $\mathcal{E}$ в точку T с координатами X_T, Y_T, Z_T отобразится на снимке P в точке t .

При измерении снимка на изображении прямолинейной линии nn выбирают две любые точки α_1, α_2 , располагаемые на возможно большем взаимном удалении и измеряют координаты этих точек в системе координат снимка. Через измеренные точки α_1, α_2 и центр проектирования S снимка строят плоскость Π с учетом элементов внутреннего и внешнего ориентирования. Уравнение плоскости в общем виде (1):

$$AX + BY + CZ = 0. \quad (1)$$

В этой плоскости Π находится ось NN траектории полета модели. Для повышения точности построения плоскости Π на изображении линии nn целесообразно измерять координаты более двух точек.

По известным координатам X_J, Y_J, Z_J фокуса J точечного импульсного источника света, являющегося центром теневой проекции модели на экране $\mathcal{E}$ и координатам X_T, Y_T, Z_T характерной точки T тени модели на экране, строят прямую JT . Очевидно, что эта прямая проходит через характерную точку M модели.

Уравнение прямой JT в параметрическом виде (2):

$$\begin{aligned} X &= (X_T - X_J) \cdot \alpha + X_J \\ Y &= (Y_T - Y_J) \cdot \alpha + Y_J \\ Z &= (Z_T - Z_J) \cdot \alpha + Z_J \end{aligned} \quad (2)$$

По данным построенных прямой JT и плоскости Π определяются координаты точки M как точки пересечения прямой и плоскости. Подставляя значения X, Y, Z из уравнения прямой (2) в уравнение плоскости (1) получают параметр α . Значение параметра α подставляется в уравнение (2) и определяются пространственные координаты X_M, Y_M, Z_M точки M модели на траектории полета.

По схеме стереопоста съемка траектории полета модели в аэробаллистической установке производится двумя съемочными камерами, располагаемыми на вертикальном базисе. Это дает возможность по измерениям координат изображений идентичных t тени модели на снимках стереопары определять пространственные координаты характерной точки T тени от модели на экране из решения прямой фотограмметрической засечки. Тем самым достигается упрощение процесса измерений, т.к. отпадает необходимость в точной геодезической установке экрана для получения тени и нанесения на нем линий координатной сетки. Экран в данном случае служит в качестве фона для получения тени от модели.

Производя аналогичные описанным выше операции измерений и построений по второму снимку стереопары, реализующие предлагаемый способ определения координат подвижного объекта с последующим осреднением получаемых результатов по двум снимкам, достигается повышение точности определения пространственных координат летящей модели.

Благодаря получению дискретной проекции в виде изображения тени летящей модели, проведению измерений на снимке координат произвольных точек, выбираемых на изображении траектории в виде сплошной линии (трека), и выполнению построений пересекающихся плоскости и прямой, удастся осуществить способ определения пространственных координат самосветящихся моделей в аэробаллистической установке, летящих со скоростью более 2.5 км/с.

Полученные при реализации способа среднеквадратические отклонения пространственных координат модели от их расчетных значений, вычисленных при использовании аппроксимирующей зависимости параметров траектории от времени

точным решением системы уравнений движения модели по методу наименьших квадратов, составили:

$$\delta X_M = \pm 1.5 \text{ мм}; \delta Y_M = \pm 1.5 \text{ мм}; \delta Z_M = \pm 2.0 \text{ мм}.$$

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-19-00613.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов, С.И. Повышение информативности аэробаллистического эксперимента как мера повышения точности определения коэффициента сопротивления / С.И. Герасимов, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин // Журнал технической физики. – 2016. – Т. 86. Вып.11. – С. 125-132.
2. Герасимов, С.И. Кумулятивные источники свет : монография / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков, С.А. Холин. – ФГУП Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ. – Саров, 2011. – 119 с.
3. Герасимов, С.И. Теневое фотографирование в расходящемся пучке света : монография / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков. – ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2010. – 344 с.
4. Герасимов, С.И. Об особенностях расчетно-экспериментальных исследований аэродинамических процессов при гиперзвуковых скоростях обтекания / С.И. Герасимов, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин // Вычислительная механика сплошных сред. – 2013. – Т.6, №1. – С. 34-40.
5. Герасимов, С.И. Расчетно-экспериментальная визуализация сверхзвукового обтекания управляющих щитков на телах вращения сегментно-конической формы / С.И. Герасимов, И.И. Каньгин, В.А. Кикеев, Р.В. Герасимова, К.В. Тотышев // Научная визуализация. – 2014. – Т.6, №3. – С. 55-67.
6. Герасимов, С.И. Визуализация дульного выхлопа при выстреле из легкогазовой пушки / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, И.И. Каньгин, Р.В. Герасимова, А.В. Сальников // Научная визуализация. – 2014. – Т.6, №2. – С. 92-103.
7. Герасимов, С.И. Визуализация сверхзвукового обтекания фрагментов кубической формы / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.А. Кикеев, Р.В. Герасимова, И.И. Каньгин, А.П. Фомкин // Научная визуализация. – 2015. – Т.7, №3. – С. 44-52.
8. Герасимов, С.И. Различные механизмы разрушения тел в гиперзвуковом потоке, выявленные с помощью оптической и рентгенографической регистрации / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.А. Кикеев, А.П. Фомкин // Научная визуализация. – 2015. – Т.7, №1. – С. 38-44.
9. Герасимов, С.И. Термомеханические и деформационные процессы при высокоскоростном скольжении нагрузок по рельсовым направляющим ракетного трека / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.Г. Камчатный, И.А. Одзериho // Вестник научно-технического развития. – 2017. – № 10(122). – С. 3-7.
10. Герасимов, С.И. Постановка испытаний топливных упаковочных комплектов на ракетном треке / С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, Р.В. Герасимова, К.И. Ляхов, А.В. Мельник, И.А. Одзериho, Б.А. Яненко // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 3(24). – С. 68-76.
11. Герасимов, С.И. Система запуска и управления оптико-физической аппаратурой на аэробаллистической трассе / С.И. Герасимов, В.Е. Лысенков // Труды четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования» – Санкт-Петербург, 2015. – Военмех. Вестник БГТУ. – 2015. – № 29. – С. 162-174.
12. Герасимов, С.И. Диагностика при исследовании эффектов, сопровождающих выход ударной волны на свободную поверхность при ударно-волновом нагружении / С.И. Герасимов // Нелинейный мир. – 2009. – Т.7, №7. – С. 526-527.

REFERENCES

- [1] Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Povyshenie informativnosti aeroballisticheskogo eksperimenta kak mera povysheniya tochnosti opredeleniya koefficienta soprotivleniya [Increasing the Information Content of Aeroballistic Experiment as a Measure of Increasing the Accuracy of Determining the Resistance Coefficient]. Povyshenie informativnosti aeroballisticheskogo eksperimenta kak mera povysheniya tochnosti opredeleniya koefficienta soprotivleniya [Journal of Technical Physics]. 2016. T. 86. Issue 11. P. 125-132 (in Russian).

- [2] Gerasimov S.I., Faykov Yu.I., Kholin S.A. Kumulyativnye istochniki svet: monografiya [Cumulative Light Sources: monograph]. FGUP Rossijskij federal'nyj yadernyj centr-VNIIEF [FSUE Russian Federal Nuclear Center-VNIIEF]. Sarov, 2011 (in Russian).
- [3] Gerasimov S.I., Faykov Yu.I. Tenevoe fotografirovanie v raskhodyashchemsya puchke sveta: monografiya [Shadow Photography in a Divergent Beam of Light: monograph]. FGUP RFYAC-VNIIEF [FSUE «RFNC-VNIIEF»]. Sarov, 2010 (in Russian).
- [4] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Ob osobennostyah raschetno-eksperimental'nyh issledovanij aerodinamicheskikh processov pri giperzvukovyh skorostyah obtekaniya [Features of Computational and Experimental Studies of Aerodynamic Processes at Hypersonic Flow Velocities]. Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred [Computational Mechanics of Continuous Media]. 2013. Vol.6. No.1. P.34-40 (in Russian).
- [5] Gerasimov S.I., Kanygin I.I., Kikeev V.A., Gerasimova R.V., Totyshev K.V. Raschetno-eksperimental'naya vizualizaciya sverhzhukovogo obtekaniya upravlyayushchih shchitkov na telah vrashcheniya segmentno-konicheskoy formy [Computational and Experimental Visualization of Supersonic Flow Around Control Panels on Bodies of Rotation of Segmented-Conical Shape]. Nauchnaya vizualizaciya [Scientific Visualization]. 2014. Vol.6. No.3. P.55-67 (in Russian).
- [6] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kanygin I.I., Gerasimova R.V., Salnikov A.V. Vizualizaciya dul'nogo vyhlopa pri vystrele iz legkogazovoj pushki [Visualization of Muzzle Exhaust When Fired from A Light-Gas Gun]. Nauchnaya vizualizaciya [Scientific Visualization]. 2014. Vol.6. No.2. P.92-103 (in Russian).
- [7] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Gerasimova R.V., Kanygin I.I., Fomkin A.P. Vizualizatsiya sverkhzhukovogo obtekaniya fragmentov kubicheskoy formy [Visualization of Supersonic Flow around Cubic Fragments]. Nauchnaya vizualizaciya [Scientific Visualization]. 2015. Vol.7. No.3. P.44-52 (in Russian).
- [8] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kikeev V.A., Fomkin A.P. Razlichnye mekhanizmy razrusheniya tel v giperzvukovom potoke, vyyavlennye s pomoshch'yu opticheskoy i rentgenograficheskoy registratsii [Various Mechanisms of Destruction of Bodies in a Hypersonic Flow Revealed by Optical and Radiographic Registration]. Nauchnaya vizualizaciya [Scientific Visualization]. 2015. Vol.7. No.1. P.38-44 (in Russian).
- [9] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kamchatny V.G., Odzericho I.A. Termomekhanicheskie i deformacionnye processy pri vysokoskorostnom skol'zhenii nagruzok po rel'sovym napravlyayushchim raketnogo treka [Thermomechanical and Deformation Processes During High-Speed Sliding of Loads Along the Rail Guides of a Rocket Track]. Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2017. No.10(122). P.3-7 (in Russian).
- [10] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Gerasimova R.V., Lyakhov K.I., Melnik A.V., Odzericho I.A., Yanenko B.A. Postanovka ispytaniy toplivnyh upakovочnyh komplektov na raketnom treke [Setting Up Tests of Fuel Packaging Kits on the Missile Track]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2017. No.3(24). P.68-76 (in Russian).
- [11] Gerasimov S.I., Lysenkov V.E. Sistema zapuska i upravleniya optiko-fizicheskoy apparaturoj na aeroballisticheskoy trasse [System of Launching and Controlling Optical-Physical Equipment on an Aeroballistic Track]. Trudy chetvertoj Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Fundamental'nye osnovy ballisticheskogo proektirovaniya» [Proceedings of the Fourth All-Russian Scientific and Technical Conference «Fundamental principles of ballistic design»]. St. Petersburg, 2015. Voenmekh. Vestnik BGTU [Voenmeh. Bulletin of BSTU]. 2015. No.29. P.162-174 (in Russian).
- [12] Gerasimov S.I. Diagnostika pri issledovanii effektiv, soprovozhdayushchih vyhod udarnoj volny na svobodnuyu poverhnost' pri udarno-volnovom nagruzhenii [Diagnostics in the Study of Effects Accompanying the Output of a Shock Wave on the Free Surface under Shock-Wave Loading]. Nelinejnyj mir [Nonlinear world]. 2009. Vol.7. No.7. P.526-527 (in Russian).

Determining the Model Spatial Position under Intense Background Illumination

S.I. Gerasimov^{*,1}, V.I. Erofeev^{**2}, V.I. Kostin^{**3}, E.G. Kosyak^{*4}, P.G. Kuznetsov^{*5},
R.V. Gerasimova^{*6}**

^{*}*Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University «MEPHI», Nizhny Novgorod region, Sarov, 6 Duchova str., 607186 Russia*

^{**}*Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Belinskogo str., 603024 Russia*

¹ORCID iD: 0000-0002-6850-0816

WOS Researcher ID: L-2727-2016

e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0002-6637-5564

e-mail: erf04@mts-nn.ru

⁵ORCID iD: 0000-0002-2711-3975

e-mail: costin.vasil@yandex.ru

⁴ORCID iD: 0000-0001-6291-2396

e-mail: keg@sarfti.ru

⁵ORCID iD: 0000-0003-2691-206X

e-mail: kpg@sarfti.ru

⁶ORCI iD: 0000-0002-2711-3975

e-mail: grv@sarfti.ru

Abstract – The paper describes the method that makes it possible to set up aeroballistic tests to study the aerodynamic characteristics of high-speed objects in conditions where there is an intense self-illumination (solid light) of the object. At the same time, the accuracy of external photogrammetric measurements of the spatial linear coordinates of the center of mass that meets the requirements of aerodynamic testing is provided.

Keywords: aeroballistic experiment, linear coordinates, self-illumination, photogrammetry, shadow projection.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 539.3:623.454.8

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТОВОЙ
ПРЕГРАДЫ НА МАЛОГАБАРИТНУЮ ЯДЕРНУЮ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКУЮ УСТАНОВКУ ПРИ АВАРИЙНОЙ
СИТУАЦИИ**

© 2021 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

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

В статье рассматривается развитие аварийной ситуации, при которой малогабаритная ядерная энергетическая установка под воздействием продуктов детонации обычного взрывчатого вещества осуществляет движение к грунтовой преграде. Представлена модель, позволяющая определить силу сопротивления преграды для различных начальных скоростей взаимодействия объекта с грунтом.

Ключевые слова: малогабаритная ядерная энергетическая установка, преграда, кинетические ударники, сила сопротивления грунта.

Поступила в редакцию 07.06.2021

После доработки 12.07.2021

Принята к печати 20.07.2021

Страны, обладающие ядерным оружием (ЯО), последовательно наращивают свой потенциал и развивают средства его доставки. Опыт последних вооруженных конфликтов с участием этих государств свидетельствует о низком пороге перехода от приграничных столкновений к полномасштабным боевым действиям [1–3]. Несмотря на то, что они осознают риск спровоцировать ядерный конфликт, при определенных условиях следует ожидать поражение пусковых установок ракет обычными средствами стратегической и тактической авиации, а также крылатыми ракетами морского базирования в рамках проводимой операции на театре военных действий. Возможно поражение или нарушение функционирования подобных ракетных комплексов диверсионно-разведывательными формированиями [4].

Из перечня возможных аварийных ситуаций (АС) с ядерными боеприпасами (ЯБП) и этапов их развития [5] выбрана логическая схема, представленная на рисунке 1.

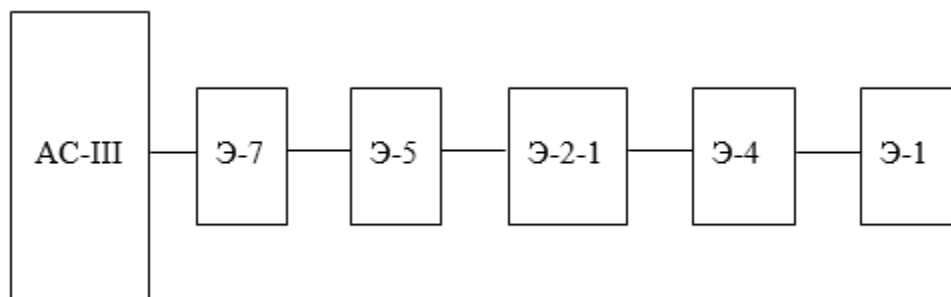


Рисунок 1 – Логическая схема развития аварийной ситуации: Э-7 – воздействие обычных средств поражения; Э-5 – разрушение корпуса двигательной установки; Э-2-1 – пожар (взрыв) топлива ракеты; Э-4 – воздействие фрагментов конструкции ракеты на ЯБП; Э-1 – удар ЯБП о поверхность (преграду).
[Logical scheme of the development of an emergency situation: Э-7 – the impact of conventional weapons; Э-5 – the destruction of the propulsion system body; Э-2-1 – fire (explosion) of the rocket fuel; Э-4 – the impact of fragments of the rocket structure on the nuclear munition; Э-1 – impact on the surface (barrier)]

Анализ возможных сценариев развития АС с твердотопливными двигательными установками ракет показал, что наиболее опасным для ЯБП, является ударное воздействие, создаваемое действием продуктов детонации и разгоняемыми элементами конструкции [6]. При взрыве заряда твердого ракетного топлива (ТРТ) давление продуктов детонации распределится по поверхности оболочки корпуса ракеты. Определение скорости метания конструкции U подробно рассмотрено в работе [7]. Наибольший интерес для исследования воздействия на ЯБП представляет:

– движение переднего днища и других элементов конструкции, разделяющих ТРТ и головную часть (агрегатный, соединительный и переходной отсеки), которые будут вовлечены в движение;

– характер ударно-волнового воздействия элементов конструкции ракеты на ЯБП;

– взаимодействие ЯБП с преградой (характеристики и параметры силы сопротивления преграды и ударных ускорений на элементах конструкции объекта).

Развитие рассматриваемой АС иллюстрируется на рисунке 2.

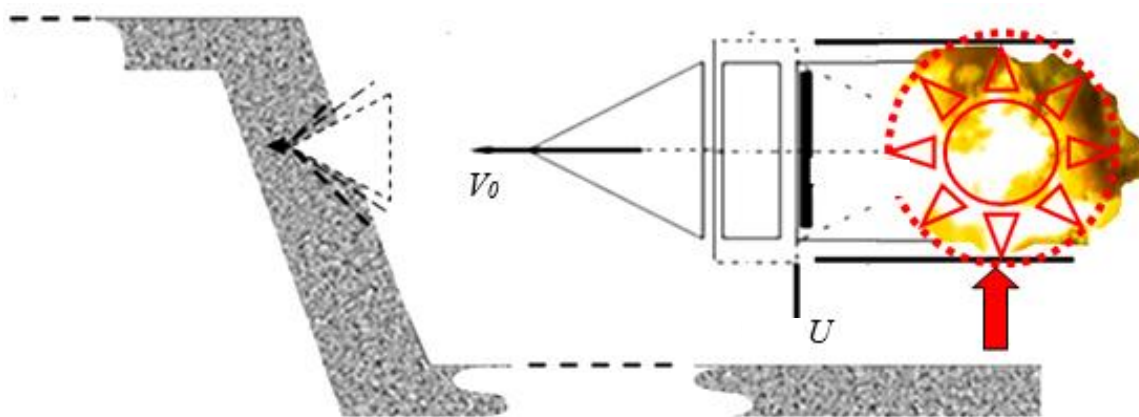


Рисунок 2 – Общая схема развития аварийной ситуации [General scheme of emergency situation development]

Для оценки силы сопротивления преграды и ударных ускорений на элементах конструкции объекта требуется знать закон изменения в течение расчетного отрезка времени силы взаимодействия рассматриваемого объекта с преградой, отражающей зависимость её от механических, геометрических и кинематических характеристик объекта и преграды. Рассмотрим силовые нагрузки при встрече с преградами типа грунт.

Рассмотрим динамику системы «ударник – возмущенная часть преграды», характеризующуюся переменной массой, участвующей в соударении. Объект, имеющий полусферический наконечник, представлен в виде эквивалентной в динамическом отношении многомассовой колебательной системы с сосредоточенными параметрами. Преграда из грунта рассматривается как сплошная среда, обладающая свойством изменять по определенному закону свою плотность при действиях больших по величине сжимающих нагрузок.

Примем следующую схему деформации грунта: при действиях на грунт давлений, не превосходящих некоторого характерного для данного грунта давления P_s , он деформируется по законам несжимаемой идеальной жидкости данной плотности ρ_0 . Введем величину Θ характеризующую сжатие грунта. Зависимость сжатия от величины давления показана на рисунке 2. При давлении, равном P_s , происходит «упаковка» грунта до плотности ρ , после чего он деформируется как идеальная жидкость, но уже новой постоянной плотности ρ (считаем, что переход из одного состояния в другое происходит мгновенно [8]). Так как для грунтов величина $P_s = 1,47 \div 1,96$ МПа, то

«упаковка» начинается практически одновременно с началом внедрения полусферического наконечника в преграду.

Принятая схема деформации (рис. 3) достаточно хорошо отражает основные свойства многих видов грунтов при действии относительно больших динамических нагрузок.

При соударении объекта с преградой из грунта, обладающим указанными выше свойством, в нем образуются две зоны:

а) зона упакованного грунта, прилегающая к сферической поверхности наконечника;

б) зона невозмущенного грунта.

Граница этих зон, являющаяся фронтом волны «упаковки», распространяется в материале преграды с некоторой скоростью a^* , зависящей от характеристик грунта и скорости соударения V_0 . Зона «упакованного» грунта в дальнейшем именуется возмущенной областью преграды

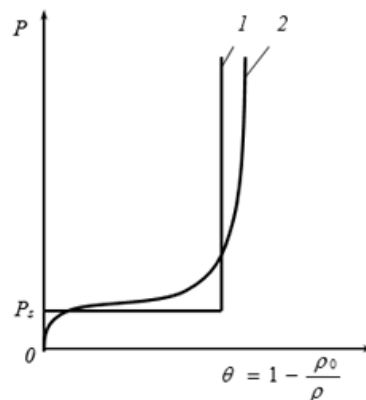


Рисунок 3 – Схема деформации идеального (1) и реального (2) грунтов [Scheme of deformation of ideal (1) and real (2) soils]

Приняв, что на первую массу m_1 эквивалентной системы не действуют никакие другие силы, кроме усилия в упругой связи с жесткостью C_1 , на основании теоремы об изменении количества движения можно записать:

$$(m_1 + m)V - (m_1 + m + \Delta m)(V - \Delta V) = C_1(x_1 - x_2)\Delta t, \quad (1)$$

где m – текущее значение массы возмущенной области;

V – текущее значение скорости встречи;

$\Delta m, \Delta V$ – изменение m и V за бесконечно малый промежуток времени Δt ;

x_1, x_2 – смещение соответственно первой и второй масс эквивалентной системы.

Пренебрегая слагаемыми второго порядка малости и переходя к пределу $\Delta t \rightarrow 0$, можно преобразовать зависимость (1):

$$m_1 \frac{dV}{dt} = \frac{m_1}{m_1 + m} \left[V \frac{dm}{dt} + C_1(x_1 - x_2) \right]. \quad (2)$$

Поскольку в рассматриваемом промежутке времени скорость ударника при соударении с преградой изменяется незначительно (на 5-7%), в уравнении (2) можно

принять $V = V_0$ и $\frac{m_1}{m_1 + m} \approx 1$.

Тогда, с учетом допущений,

$$m_1 \frac{dV}{dt} = V_0 \frac{dm}{dt} + C_1(x_1 - x_2). \quad (3)$$

В тоже время уравнение движения массы m_1 эквивалентной системы в случае рассмотрения динамики ГЧ под действием силы сопротивления $F(t)$ преграды имеет вид:

$$m_1 \frac{dV}{dt} = -F(t) + C_1(x_1 - x_2). \quad (4)$$

Из равенства правых частей уравнений (3) и (4) находится общий вид приближенной зависимости для определения силы сопротивления преграды:

$$F(t) = -V_0 \frac{dm}{dt}. \quad (5)$$

Следует отметить, что полученная формула справедлива как для случая представления ударника в виде эквивалентной схемы с любым числом масс, так и при рассмотрении ее в качестве абсолютно твердого тела.

Величина dm/dt является секундным приростом массы возмущенной области и определяется физическими характеристиками материала преграды и распределением скоростей частиц грунта, находящегося в этой области.

Выведем расчетной зависимости для определения силы сопротивления при допущении, что частицы грунта при встрече ударника с преградой получают скорости и перемещения в направлении вектора V_0 (рис. 2.8, а). Считается также, что вектор скорости V_0 , составляющий угол ψ с нормалью к поверхности преграды, направлен по оси ударника, а геометрическая форма наконечника в течении рассматриваемого промежутка времени не изменяется. Это означает, что вся масса грунта, сосредоточенного в возмущенной области, имеет скорость V_0 , а фронт волны «упаковки», являющийся одной из границ возмущенной области, распространяется в направлении вектора V_0 со скоростью

$$a^* = \frac{V_0}{1-b},$$

где $b = \frac{\rho_0}{\rho}$.

Масса грунта, заключенного в возмущенной области, находится по формуле:

$$m = \rho \int_0^t \pi r^2 (a^* - V_0) \cos \psi dt = \pi \rho V_0 a^* b t^2 \left(R - \frac{1}{3} V_0 t \right) \cos^2 \psi, \quad (6)$$

где R – радиус притупления наконечника; $r^2 = V_0 t (2R - V_0 t)$; $V_c = V_0 \cos \psi$.

Продифференцировав выражение (6) по t и, подставив dm/dt в формулу (5), получим расчетную зависимость для определения силы сопротивления преграды в виде

$$F = \pi \rho_0 V_0^2 a^* t (2R - V_0 t) \cos^2 \psi. \quad (7)$$

При $\psi=0$ зависимость (7) преобразуется в формулу для определения силы сопротивления преграды в случае встречи ударника с преградой по нормали:

$$F = \pi \rho_0 V_0^2 a^* t (2R - V_0 t). \quad (8)$$

Как отмечалось выше, в настоящее время для определения силы сопротивления преград типа грунт применяется формула, основанная на предположении, что в зоне деформации материала преграды создаются условия, аналогичные гидравлическому удару в трубах:

$$F = \pi \rho_0 V_0^2 a t (2R - V_0 t), \quad (9)$$

где a – скорость звука в грунте.

Сопоставление выражений (8) и (9) показывает, что их отличие заключается только в различном физическом толковании членов a^* и a . Входящая в формулу (9) величина a зависит только от параметров грунта и характеризует распространение в нем слабых возмущений, т.е. возмущений, при которых грунт можно рассматривать как линейно упругую среду. В тоже время известно, что явление соударения ударника с преградой сопровождается большими пластическими деформациями грунта. Величина a^* , входящая в формулу (8), характеризует распространение в грунте волн конечной амплитуды (сильных возмущений) и определяется величиной объёмной деформации грунта и скорости соударения.

Рассмотрим решение этой же задачи при допущении, что между поверхностями наконечника ударника и материалом преграды не существует касательных сил, и частицы грунта получают количество движения в направлении нормали к поверхности наконечника (рис. 4). В этом случае скорость частиц в возмущенной области зависит от их расположения относительно поверхности наконечника. Так, скорость частиц, расположенных левее плоскости, проходящей через линию $O-O$ и перпендикулярной плоскости чертежа (на рис. 4б область I), равна $V_0 \cos(\gamma - \psi)$, где γ – угол между нормалью к сферической поверхности наконечника в данной точке и нормалью к поверхности преграды. Скорость частиц грунта, распределенных в области II, равна $V_0 \cos(\gamma + \psi)$.

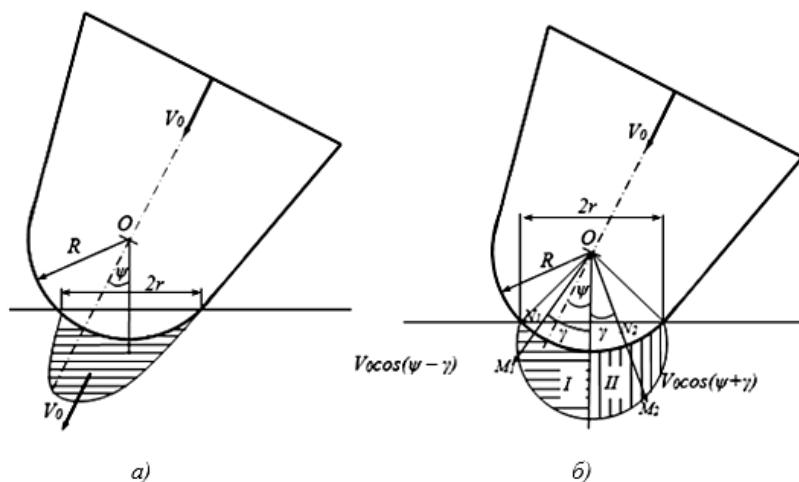


Рисунок 4 – Схема образования в грунте возмущенной области: а – при допущении о движении материала преграды в направлении V_0 ; б – при допущении о движении материала преграды в направлении нормали к поверхности наконечника [Scheme of formation of a disturbed area in the ground a – assuming the movement of the barrier material in the direction V_0 ; b – assuming the movement of the barrier material in the direction normal to the tip surface]

Количество движения, получаемое в направлении V_0 частицами грунта, «упакованными» вдоль отрезков M_1N_1 и M_2N_2 , пропорционально соответственно $\cos^2(\gamma - \psi)$ и $\cos^2(\gamma + \psi)$. Поэтому приведенные массы материала преграды, распределенного вдоль M_1N_1 и M_2N_2 , пропорциональны соответственно $M_1N_1 \cos^2(\gamma - \psi)$ и $M_2N_2 \cos^2(\gamma + \psi)$, а приведенная масса всей возмущенной области преграды эквивалентна массе грунта плотности ρ , заключенного в объеме, ограниченном сферической поверхностью наконечника и поверхностью, описываемой в сферической системе координат с полюсом в точке O уравнениями:

$$\begin{aligned} r_{Inn} &= R + \frac{ba^*}{V_0} [R \cos \gamma - (R - V_0 t)] \cos^3(\gamma - \psi), \\ r_{Inl} &= R + \frac{ba^*}{V_0} [R \cos \gamma - (R - V_0 t)] \cos^3(\gamma + \psi). \end{aligned} \quad (10)$$

Приведенная масса возмущенной области преграды находится по формуле:

$$\begin{aligned} m &= \rho \int_0^\pi \int_0^{r_{Inp}} \int_0^R r_\varphi^2 \sin \gamma d\gamma d\varphi d\rho + \rho \int_\pi^{2\pi} \int_0^{r_{Inp}} \int_0^R r_\varphi^2 \sin \gamma d\gamma d\varphi d\rho = \\ &= \frac{1}{3} \pi \int_0^\gamma [(r_{Inp}^3 - R^3) + (r_{Inl}^3 - R^3)] \sin \gamma d\gamma, \end{aligned} \quad (11)$$

где r_φ – радиус-вектор фронта волны «упаковки»;

$$\gamma_t = \arccos \frac{R - V_c}{R}.$$

Продифференцировав выражение (11) и подставив dm/dt в формулу (5), находим расчетную зависимость для определения силы сопротивления преграды

$$\begin{aligned} F(t) &= \pi \rho_0 V_0^2 a^* t (2R - V_0 t) \cos^2 \psi + \\ &+ \pi \rho_0 V_0 a^* \left\{ V_0 t (2R - V_0 t) \cos \psi \left[\frac{V_0 t}{2R^2} (2R - V_0 t) (3 - 4 \cos^2 \psi) - \sin^2 \psi \right] + \right. \\ &+ \frac{b^2 a^{*2}}{V_0^2} \left[\frac{(R - V_0 t)^{12}}{330 R^{10}} A_1(\psi) + \frac{(R - V_0 t)^{10}}{5 R^8} A_2(\psi) \right] + \frac{(R - V_0 t)^8}{14 R^6} A_3(a^*, \psi) + \\ &+ \frac{2(R - V_0 t)^6}{R^4} A_4(a^*, \psi) + \frac{(R - V_0 t)^4}{2 R^2} A_5(a^*, \psi) + (R - V_0 t)^2 A_6(a^*, \psi) + \\ &\left. + \frac{R(R - V_0 t)}{35} A_7(a^*, \psi) + R^2 A_8(a^*, \psi) \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где A_i – коэффициенты, зависящие от V_0 , ψ , b .

При $\psi = 0$ зависимость (12) преобразуется в формулу для определения силы сопротивления преграды при соударении с ней ударника по нормали:

$$F(t) = \pi \rho_0 V_0^2 a^* t (2R - V_0 t) + \pi \rho_0 V_0 a^* \left\{ -\frac{V_0^2 t^2}{2R^2} (2R - V_0 t)^2 + \frac{ba^*}{14V_0^2} \left[R(R - 8V_0 t) - \frac{(R - V_0 t)^8}{R^6} \right] - \frac{b^2 a^{*2}}{V_0^2} \left[\frac{(R - V_0 t)^{12}}{330R^{10}} - \frac{1}{5} (R - V_0 t)^2 + \frac{4}{11} R(R - V_0 t) - \frac{1}{6} R^2 \right] \right\}. \quad (13)$$

В качестве примера в таблице 1 представлены результаты расчета силы сопротивления преграды для объекта с полусферическим наконечником.

Таблица 1 – Результаты расчета [Calculation results]

V_0 , м/с	R , м	ψ , град	F , кН	
			по формуле (7)	по формуле (12)
235	30	70	36	34
240	30	45	49	41
210	30	0	98	56

Полученные результаты расчета различных вариантов (комбинации V_0 , R и ψ) для ударников с полусферическим наконечником позволили сделать следующие выводы: при взаимодействии с грунтовой преградой ударника (со скоростями до 1200 м/с) его следует рассматривать как абсолютно твердое тело [9]; наличие угла ψ приводит к неравномерности распределения давления по боковой поверхности ударника в окружном направлении и к увеличению его максимальной величины. Последний вывод указывает на необходимость исследовать влияние формы образующей поверхности ударника на характер проникания (учет касательных напряжений). Анализ результатов моделирования проникания в грунт ударников различных форм проводился на основе сравнения сил сопротивления как с учетом трения ($\mu = 0,5$), так и без него ($\mu = 0$). Установлено что, начиная со скоростей 100 м/с, учет касательных напряжений приводит к завышенным значениям силы сопротивления и в данном случае является необоснованным. Для расчета сил сопротивления использована модель с учетом нелинейной сжимаемости грунтовой среды и внутреннего трения [10]. На рисунке 5 представлены зависимости силы сопротивления от скорости V_0 в диапазоне от 90 до 280 м/с для ударников одинаковой массы при $\psi = 0^\circ$ (по нормали): конических с углами раствора конуса 30° и 60° , а также ударника оптимальной формы (образующая оживальной формы со сферическим наконечником).

Из графика видно, что для ударников с меньшим углом раствора при увеличении скорости сила сопротивления возрастает более плавно, чем для ударников с большим углом. Для скоростей около 90 м/с различие составляет $\sim 35\%$, а для скоростей около 200 м/с различие составляет $\sim 50\%$ от наибольшего значения.

Для проверки адекватности разработанной модели проводились экспериментальные исследования. На начальном этапе с целью определения исходных данных для планирования крупномасштабного эксперимента предварительно осуществлены исследования в лабораторных условиях. На стенде, включающем в себя баллистическую установку и контейнер-мишень с грунтом (рис. 6а) моделировалось проникание в грунт ударников (рис. 6б) различной формы и массы с различными скоростями.

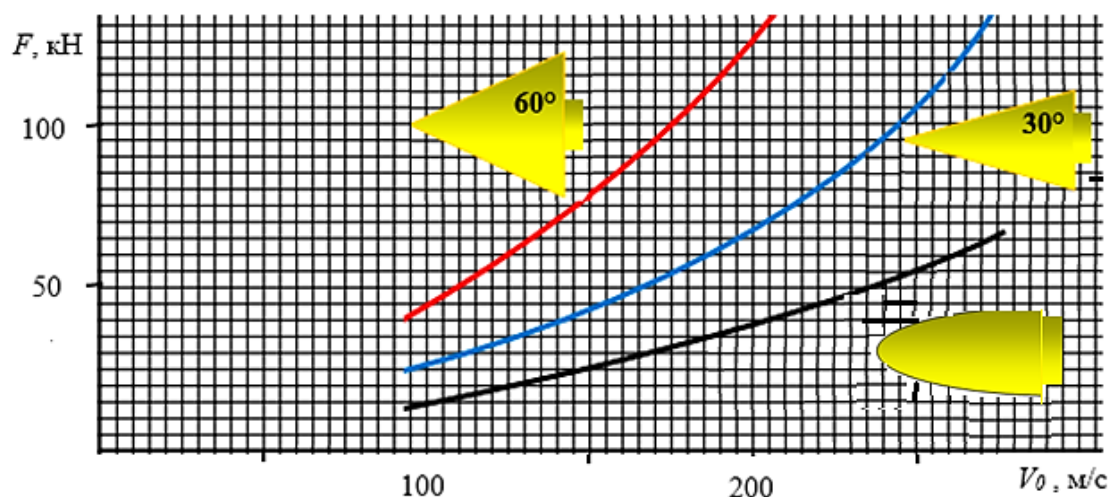


Рисунок 5 – Зависимость силы сопротивления от скорости и формы ударников
[Dependence of the resistance force on speed and shape of the strikers]



а)



б)

Рисунок 6 – Отработка элементов плана крупномасштабного эксперимента в лабораторных условиях:
а – контейнер-мишень; б – образцы ударников [Working out the elements of the plan of a large-scale experiment in the laboratory a – container-target; b – samples of strikers]

Так как грунт обладает свойствами упруго-пластичной среды, дополнительно исследован процесс проникания ударников различной формы в вязкую среду (рис. 7). Был использован пластилин, так как он имеет физико-механические характеристики близкие к свойствам глинистых грунтов. Данный процесс можно разделить на этапы: соударение; формирование каверны; режим развитой кавитации (за ударником образуется не схлопывающаяся каверна, диаметр которой превышает максимальный диаметр ударника) (рис. 7а); режим частичной кавитации, когда при снижении скорости диаметр каверны уменьшается и в итоге становится равным диаметру ударника (рис. 7б); сплошное обтекание (рис. 7в).

Исследования зависимости параметров движения ударника в вязкой среде от угла подхода к поверхности раздела проводились при практически постоянной температуре $17 \pm 1,5^\circ\text{C}$ (для обеспечения стабильности механических свойств вязкой среды). Скорость подхода ударника к преграде (границе раздела) составляла $132 \div 141$ м/с. Углы варьировались от 0° до 75° .

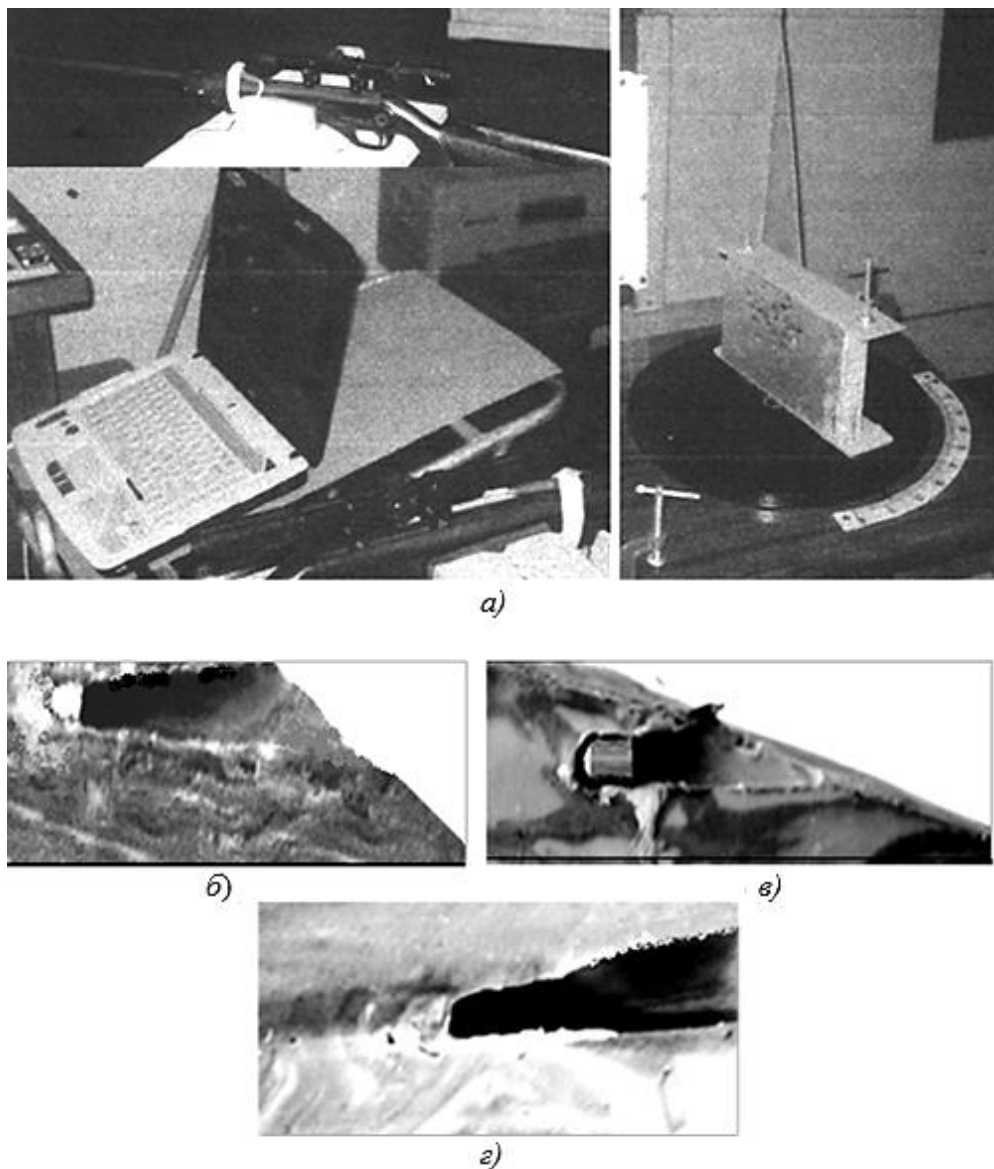


Рисунок 7 – Экспериментальные исследования процесса проникания ударников в вязкую среду: а – элементы экспериментальной установки; б – внедрение при $\psi = 45^\circ$; в – внедрение при $\psi = 70^\circ$; г – внедрение при $\psi = 0^\circ$ [Experimental studies of the process of penetration of strikers into a viscous medium: a – elements of the experimental setup; b-introduction at $\psi = 45^\circ$; c-introduction at $\psi = 70^\circ$; d-introduction at $\psi = 0^\circ$]

Установлено, что максимум перегрузки конический ударник будет испытывать при проникании на глубину равную высоте конуса (для ударников со сферическим наконечником общей высоте). Причем перегрузки для ударников с раствором 60° вдвое выше, чем для ударников с раствором 30° .

Полученные в ходе лабораторных исследований результаты позволили оптимизировать серию крупномасштабных экспериментов по моделированию ударно-волнового воздействия продуктов детонации на объект (рис. 8,а) с последующим прониканием его в грунтовой массив (рис. 8в,г). Для проведения исследований был использован стенд [12], расположенный на мишенном поле (рис. 8,б).

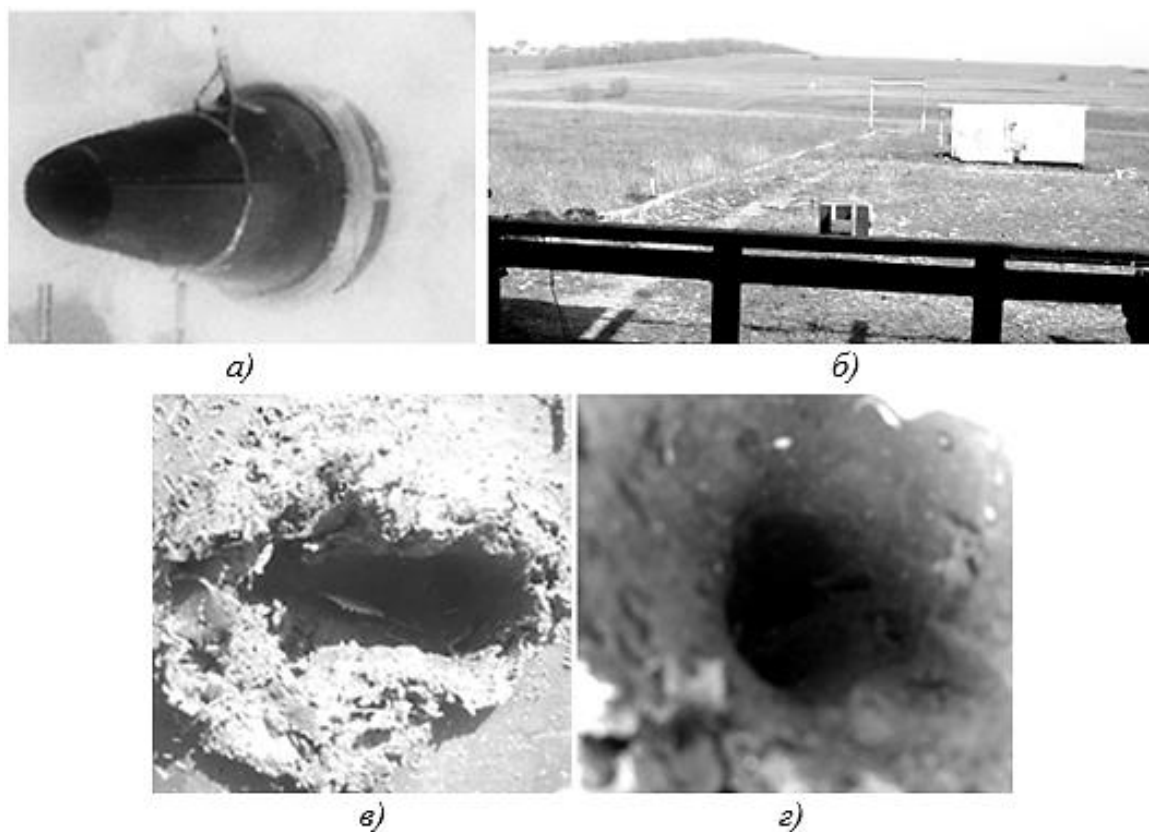


Рисунок 8 – Крупномасштабный эксперимент: *а* – момент срабатывания ПАД; *б* – мишенное поле; *в* – воронка при $\psi = 70^\circ$; *г* – воронка при $\psi = 45^\circ$ [Large-scale experiment: *a* – the moment when the PPA is triggered; *b* – the target field; *c* – the funnel at $\psi = 70^\circ$; *d* – the funnel at $\psi = 45^\circ$]

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать вывод что, возникновение аварийного взрыва объекта, а также разрушение его конструкции с возможным радиоактивным заражением местности осколками заряда при развитии данной аварийной ситуации маловероятно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зайцев, М.С.* Сравнительный анализ военных доктрин Индии и Пакистана / М.С. Зайцев // Сравнительная политика. – 2018. – № 3. – С. 14-25.
2. *Hoodbhoy P., Mian Z.* Nuclear battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists, May 4, 2016, Mode of access: <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415>.
3. *Hans M. Kristensen & Robert S. Norris.* North Korean nuclear capabilities, 2018, Bulletin of the Atomic Scientists, VOL.74, NO.1, 41-51, <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20>
4. *Денисов, О.В.* Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения: монография / О.В. Денисов, О.А. Губеладзе, Б.Ч. Месхи, Ю.И. Булыгин ; под общей редакцией Ю.И. Булыгина. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2016. – 278 с.
5. *Михайлов, В.Н.* Безопасность ядерного оружия России / В.Н. Михайлов. – Москва : Мин. по атомной энергии. – 1998. – 148 с.
6. *Губеладзе, О.А.* Оценка результатов нерегламентированных воздействий на взрывоопасный объект / О.А. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2011. – № 1. – С. 61-63.
7. *Губеладзе, О.А.* Экспресс-оценка результатов нерегламентированных деструктивных воздействий на ядерно- и радиационноопасный объект / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – №4. – С. 24-30.
8. *Лаврентьев, М.А.* Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – Москва : Наука – 1973. – 416 с.

9. Губеладзе, О.А. Определение ударных ускорений на элементах конструкции малогабаритной ядерной энергетической установки при ее падении на поверхность / О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 1. – С. 7-16.
10. Григорян, С.С. Приближенное решение задачи о проникании тела в грунт / С.С. Григорян // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 1993. – № 4. – С. 18-24.
11. Баженов, В.Г. Решение задачи о наклонном проникании осесимметричных ударников в мягкие грунтовые среды на основе моделей локального взаимодействия / В.Г. Баженов, В.Л. Котов // Прикладная математика и механика. – 2010. – Т. 74. Вып. 3. – С. 391-402.
12. ГОСТ Р ИСО 8568-2010 Национальный стандарт РФ. Стенды ударные (введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 441-ст от 12.11. 2010 г.) [Электронный ресурс]. – URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50555/> (дата обращения: 17.05.2021)

REFERENCES

- [1] Zaytsev, Mikhail S. Sravnitel'nyi analiz voennykh doktrin Indii i Pakistana [Comparative Analysis of Military Doctrines of India and Pakistan] Sravnitel'naja politika [Comparative Politics] 2018, No. 3, pp. 14-25(in Russian).
- [2] Hoodbhoy P., Mian Z. Nuclear Battles in South Asia // The Bulletin of the Atomic Scientists, May 4, 2016. URL: <http://thebulletin.org/nuclear-battles-south-asia9415> (in English).
- [3] Hans M. Kristensen, Robert S. Norris (2018) North Korean Nuclear Capabilities, 2018, Bulletin of the Atomic Scientists. Vol.74. No.1. P.41-51. URL: <https://www.tandfonline.com/loi/rbul20> (in English).
- [4] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territorij v chrezvy'chajny'x situacijax. Problemy i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions.]. Rostov-on-Don. Publishing center Don State Technical University. 2016. 278 p. (in Russian).
- [5] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moscow. Min. po atomnoj energii [Ministry of Nuclear Energy]. 1998. 148 p. (in Russian).
- [6] Gubeladze O.A. Otsenka rezul'tatov neregamentirovannykh vozdeystvii na vzryvoopasnyy ob'ekt [Estimating of Unregulated Influence Results on Explosive Object]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2011. №1(1). P.61-63 (in Russian).
- [7] Gubeladze O.A. Express-otsenka rezul'tatov neregamentirovannykh destruktivnykh vozdeystvii na yaderno- i radiatsionnoopasnyy ob'ekt [Express Assessment of Results of Independent Destructive Impacts on Nuclear and Radiation-Hazardous Object] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2018. №4(29). P.24-30 (in Russian).
- [8] Lavrent'ev M.A., Shabat B.V. Problemy gidrodinamiki i ih matematicheskie modeli [Problems of Hydrodynamics and their Mathematical Models]. Moscow. Nauka. 1973. 416 p. (in Russian).
- [9] Gubeladze O.A. Opredelenie udarnykh uskorenij na elementah konstrukcii malogabaritnoj yadernoj energeticheskoj ustanovki pri ee padenii na poverhnost [Determination of Shock Accelerations on Small Nuclear Power Plant Structural Elements in the Event of Fall to the Surface] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2020. №1(34). P.7-16 (in Russian).
- [10] Grigorjan S.S. Priblizhennoe reshenie zadachi o pronikanii tela v grunt [Approximate Solution of the Problem of Body Penetration into the Ground]. Izvestiya RAN. Mehanira zhidkosti i gaza [Izvestiya RAS. Fluid and Gas Mechanics]. 1993. №4. P.18-24 (in Russian).
- [11] Bazhenov V.G., Kotov V.L. Reshenie zadachi o naklonnom proniranii osesimmetrichnykh udarnikov v mjagkie gruntovye sredy na osnove modelej lokalnogo vzaimodejstvija [Solution of the Problem of Oblique Penetration of Axisymmetric Impactors into Soft Ground Environments Based on Local Interaction Models]. Prikladnaja matematika i mehanika [Applied Mathematics and Mechanics]. 2010. Volume 74. Issue 3. P.391-402 (in Russian).
- [12] GOST R ISO 8568-2010 Nazionalnyj standart RF. «Stendy udarnye» [National Standard of the Russian Federation. Shock Testing Machines. Declaration and Verification of Characteristics]. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50555/> (in Russian).

Determination of Soil Barrier Resistance Influence to Compact Nuclear Power Plant at Emergency Situation

O.A. Gubeladze¹, A.R. Gubeladze²

Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000

¹*ORCID iD: 0000-0001-6018-4989*

WoS Researcher ID: F-6921-201

e-mail: buba26021966@yandex.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-6966-6391*

WoS Researcher ID: F-7215-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Abstract – The article discusses the development of an emergency situation in which a compact nuclear power plant, under the influence of the conventional explosive detonation products, moves to a ground barrier. A model that makes it possible to determine the obstacle resistance force for various initial object-soil interaction velocities is presented.

Keywords: small-sized nuclear power plant, barrier, kinetic impactors, ground resistance force.

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

УДК 004.75

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ МЕТОД И МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ПАРАМЕТРОВ МЕЖМОДУЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В
СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЗАЩИТОЙ ТУРБОАГРЕГАТА ПО
ВИБРАЦИИ**

© 2021 Д.А. Плотников

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, Новочеркасск, Ростовская обл., Россия*

В работе кратко рассмотрена структура модульной системы управления защитой турбоагрегата по вибрации (СУЗВ), сформулированы задачи оценки параметров межмодульного взаимодействия, возникающие на ранних этапах проектирования СУЗВ. На основе анализа алгоритмов работы различных служб протокола *CANopen* предложен вероятностный метод определения основных параметров коммуникационных процессов в СУЗВ с использованием элементов теории массового обслуживания. Рассмотрена математическая модель СУЗВ, использующая предложенный метод, описаны её входные параметры, алгоритм функционирования и выходные данные. Описана методика исследования реальной СУЗВ с помощью модели, приведены результаты моделирования, выполнен их анализ, на базе которого предложены способы оптимизации некоторых параметров межмодульного взаимодействия.

Ключевые слова: защита по вибрации, вибромониторинг, модульная система, межмодульное взаимодействие, система массового обслуживания, моделирование *CANopen*, шина *CAN*.

Поступила в редакцию 05.07.2021

После доработки 08.07.2021

Принята к печати 19.07.2021

Введение

Возникновение и развитие дефектов в различных частях роторной машины в большинстве случаев сопровождается изменением параметров вибрации её элементов, а в некоторых ситуациях вибрация является не только индикатором, но и причиной развития дефектов. Поэтому одной из наиболее универсальных и совершенных методик диагностики роторных машин, к которым относятся и турбоагрегаты (ТА) электростанций, является вибродиагностика, т.е. выявление дефектов на основе анализа параметров вибрации элементов машины. Следовательно, разработка и внедрение высоконадёжных средств вибромониторинга, вибродиагностики и защиты по вибрации позволит продлить срок службы ТА, сократить сроки ремонта за счёт обнаружения дефектов на самых ранних стадиях их возникновения, а также предотвратить аварии с катастрофическими последствиями путём своевременной остановки ТА в случае недопустимого повышения уровня вибрации.

Современные системы управления защитой ТА по вибрации (СУЗВ) проектируются в соответствии с многоуровневой структурой. На нижнем уровне находятся первичные и вторичные преобразователи измеряемых параметров: ортогональных составляющих вибрации опор и шеек роторов, осевого расширения и сдвига ротора и некоторые другие. Информация с них поступает на средний уровень, где в результате её комплексной обработки формируются управляющие воздействия, инициирующие при необходимости аварийный останов ТА или включение

сигнализации. Наконец, на верхнем уровне на основе углублённого анализа текущих и ретроспективных данных с использованием прогнозных моделей формируются рекомендации по срокам профилактических работ, по проведению технического обслуживания, по замене элементов агрегата.

Из сказанного следует, что наиболее ответственные решения по автоматическому управлению защитой ТА принимаются на среднем уровне СУЗВ: безосновательный нештатный останов агрегата влечёт за собой существенные материальные затраты на его повторный ввод в эксплуатацию. К ещё большим проблемам, вплоть до разрушения ТА, может привести отсутствие сигнала на аварийный останов ТА при недопустимом повышении вибрации. Таким образом, разработке надёжных алгоритмов обработки, передачи и хранения данных при проектировании среднего уровня СУЗВ должно уделяться особое внимание.

Средний уровень СУЗВ обычно имеет модульную структуру, показанную на рисунке 1. В неё входят модули M различных типов, количество модулей каждого типа – m_k ($k = \{1, 2, \dots, M\}$). Модули взаимодействуют друг с другом по общей сети передачи данных (СПД). Описанная структура обусловлена тем, что для ТА электрических станций характерна необходимость измерения однотипных групп параметров в нескольких точках, количество которых зависит от сложности ТА. Примерами таких групп могут служить ортогональные составляющие вибрации опор, шеек роторов и некоторые другие. Каждый модуль СУЗВ обслуживает одну группу параметров, а количество модулей определяется сложностью ТА. Такой подход улучшает ремонтпригодность СУЗВ и упрощает масштабирование системы, однако требует организации надёжного и эффективного межмодульного взаимодействия.

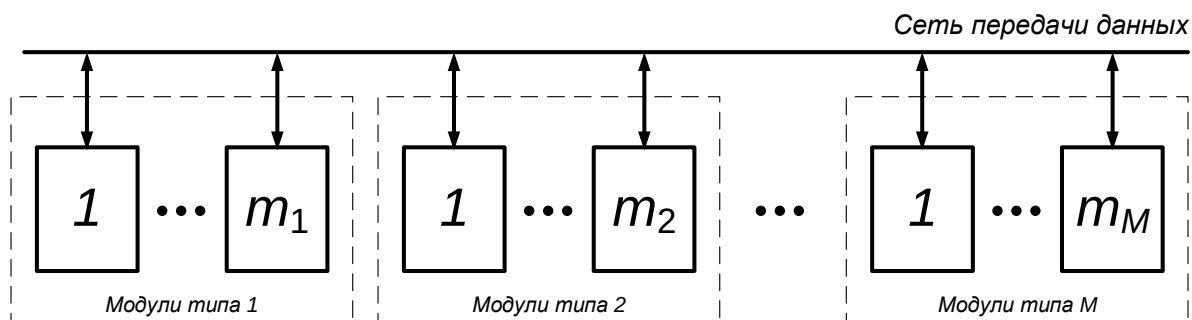


Рисунок 1 – Структура модульной СУЗВ (M – количество типов модулей, m_k ($k = \{1, 2, \dots, M\}$) – количество модулей k -го типа) [The structure of the modular VPCS (M is the number of types of modules, m_k ($k = \{1, 2, \dots, M\}$) – the number of the k -th type modules)]

Очевидно, что интенсивность потока данных, передаваемых модулями по СПД, определяется как количеством модулей, так и параметрами их настройки. С другой стороны, пропускная способность СПД остаётся постоянной и не зависит от конфигурации системы. Следовательно, на самых ранних этапах проектирования СУЗВ для конкретного ТА необходимо получить ответы на следующие вопросы:

- достаточно ли пропускной способности СПД для гарантированной и своевременной передачи высокоприоритетных данных от всех модулей?
- какова средняя скорость передачи низкоприоритетных данных?
- можно ли изменить параметры настройки модулей с целью получения удовлетворительных ответов на первые два вопроса и, если да, то как?

В некоторых источниках предлагаются методы и средства решения описанных задач путём имитационного моделирования коммуникационных процессов в системах на базе протокола *CANopen* [1, 2, 3]. Однако, обеспечивая воспроизведение отдельных реализаций этих процессов с высокой степенью достоверности, имитационные методы не позволяют оперативно оценить всю совокупность возможных реализаций: для этого

необходимо длительное моделирование с последующей статистической обработкой полученных результатов.

В данной статье предлагается вероятностный метод, позволяющий получить ответы на перечисленные вопросы с использованием математического аппарата теории массового обслуживания. Метод разработан для оценки параметров межмодульного взаимодействия в созданной с участием автора СУЗВ [4], использующей в качестве СПД шину CAN и протокол обмена данными *CANopen*, однако может применяться и в других модульных системах, работающих на базе этого протокола.

Разработка метода оценки параметров СУЗВ

СУЗВ (рис. 1) можно представить в виде системы массового обслуживания (СМО), схема которой приведена на рисунке 2.

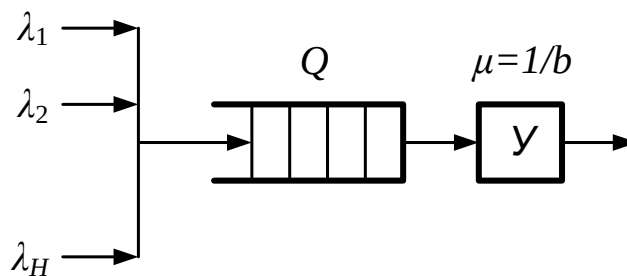


Рисунок 2 – Модель СУЗВ: λ_h – интенсивность h -го потока заявок, H – число классов заявок, Q – накопитель, Y – обрабатывающее устройство, μ – интенсивность обслуживания заявок, b – время обслуживания заявки [VPCS model: λ_h is the intensity of the h -th flow of requests, H – number of requests classes, Q – storage device, Y – processing device, μ is the intensity of requests processing, b is the request processing time]

От модулей СУЗВ в систему поступают потоки заявок на обслуживание (сообщений) с интенсивностями $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_H$, где H – число классов заявок. Каждый модуль может формировать заявки различных классов, причем, чем меньше номер класса, тем выше приоритет заявки.

Заявки поступают в накопитель Q , где ожидают обслуживания. Под накопителем подразумевается некая виртуальная очередь, которую образуют заявки, сформированные модулями СУЗВ и ожидающие передачи в линию связи (в шину CAN). Размер накопителя в системе, работающей без перегрузки, можно считать неограниченным.

Обслуживающим устройством Y является линия связи, в которую поступают заявки из очереди Q в соответствии с их приоритетами (классами). Алгоритм функционирования интерфейса CAN [5] определяет дисциплину обслуживания заявок с относительными приоритетами, то есть поступление заявки с более высоким приоритетом не прерывает обслуживание текущей заявки. Обслуживание заявки заключается в передаче сообщения по линии связи, поэтому интенсивность обслуживания μ связана с временем передачи сообщения b выражением $\mu = 1 / b$.

Описанная система является СМО с неоднородным потоком заявок. Для таких СМО определяются две группы характеристик:

- характеристики по каждому потоку заявок одного класса;
- характеристики суммарного потока заявок.

С целью определения этих характеристик рассмотрим более подробно взаимодействие модулей СУЗВ по протоколу *CANopen* [6]. В нормальном режиме оно осуществляется в основном с помощью служб *SYNC* (синхронизация), *PDO* (передача / приём текущих данных модулей), *Heartbeat* (проверка состояния модулей), *SDO* (передача / приём служебных данных). Первые три службы функционируют в синхронном режиме, четвёртая – асинхронно. Взаимодействие организовано

следующим образом. В начале каждого цикла синхронизации длительностью T_{SYNC} единственный ведущий модуль отправляет другим модулям сообщение $SYNC$. В ответ на это каждый модуль может выдать в линию одно или несколько сообщений PDO , причём в одном сообщении находятся несколько текущих значений измеряемых или вычисляемых величин. Передача выполняется в каждом B -м цикле синхронизации, а также может произойти досрочно в том случае, если одна из величин, передаваемых в PDO , изменила своё значение по сравнению с отправленным в предыдущем сообщении. Кроме того, один раз за несколько циклов синхронизации каждый модуль выдаёт в линию сообщение $HBEAT$, информирующее систему о наличии и текущем состоянии этого модуля. Наконец, без привязки к циклам синхронизации модули могут обмениваться сообщениями SDO , предназначенными для передачи информации, к времени доставки которой не предъявляются жёсткие требования. Здесь намеренно не рассматриваются другие службы $CANopen$: NMT , $TIME$, $EMCY$, поскольку в рабочем режиме СУЗВ количество генерируемых ими сообщений пренебрежимо мало по сравнению с описанными выше службами. Тем не менее, при необходимости приведённые далее рассуждения можно применить и к ним. Также не рассмотрена обработка ошибок передачи / приёма, приводящая к отправке дополнительных сообщений, поскольку в правильно спроектированной СПД на базе интерфейса CAN ошибки возникают крайне редко [7].

Каждое сообщение CAN имеет собственный приоритет, определяемый уникальным идентификатором сообщения, однако при исследовании протокола $CANopen$ удобнее работать с классами приоритетов. К первому, наиболее приоритетному классу относится сообщение $SYNC$. В следующие несколько классов $[2 \dots H-2]$ входят сообщения PDO , причём если модуль формирует несколько разных PDO , то они относятся к различным классам. Разные модули могут формировать PDO одного класса. К классу $H-1$ относятся сообщения $HBEAT$ всех модулей и, наконец, низшим приоритетом H обладают сообщения SDO .

Из приведённого описания следует, что поток сообщений $SYNC$ является детерминированным, его интенсивность определяется выражением:

$$\lambda_1 = 1/T_{SYNC}. \quad (1)$$

Интенсивность потока сообщений $HBEAT$ можно вычислить как:

$$\lambda_{H-1} = \frac{1}{T_{SYNC}} \sum_{k=1}^M \frac{m_k}{B_k}, \quad (2)$$

где M – количество типов модулей в СУЗВ;

m_k – количество модулей k -го типа;

B_k – период передачи сообщений $HBEAT$ модулями k -го типа, выраженный в циклах синхронизации.

Наиболее сложным является поток PDO . Рассмотрим часть этого потока $\lambda_{k,h}$, состоящую из заявок класса h , формируемых одним модулем k -го типа. Как следует из приведённого выше описания, поток можно представить состоящим из двух частей: детерминированной $\lambda_{k,h}^d$ и случайной $\lambda_{k,h}^r$. Интенсивность детерминированной составляющей определяется выражением:

$$\lambda_{k,h}^d = (B_{k,h} T_{SYNC})^{-1},$$

где $B_{k,h}$ – период передачи сообщений класса h модулем k -го типа, выраженный в циклах синхронизации.

Интенсивность случайной составляющей зависит от того, насколько часто возникают заявки, вызванные изменением хотя бы одного из $v_{k,h}$ значений, передаваемых в рассматриваемым PDO . Пусть интервалы времени между изменениями одного такого значения описываются случайной величиной $\xi_{h,k,i}$ ($i = \{1, \dots, v_{k,h}\}$), распределённой по экспоненциальному закону с параметром $\alpha_{k,h,i}$ (это допущение основано на физической природе величин, измеряемых СУЗВ, и впоследствии будет проверено экспериментально). Тогда величина $\xi_{k,h} = \min(\xi_{k,h,i})$, определяющая интервалы времени между заявками, также будет иметь экспоненциальное распределение с параметром:

$$\alpha_{k,h} = \sum_{i=1}^{v_{k,h}} \alpha_{k,h,i} . \quad (3)$$

Вероятность того, что заявка будет сформирована досрочно, то есть вследствие изменения одного из передаваемых значений, определяется выражением:

$$p_{k,h}^r = P(t < B_{k,h} T_{SYNC}) = 1 - e^{-\alpha_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}} ,$$

средняя длительность интервала между досрочными заявками:

$$\overline{\xi_{k,h}} = \frac{1}{p_{k,h}^r} \int_0^{B_{k,h} T_{SYNC}} t \alpha_{k,h} e^{-\alpha_{k,h} t} dt ,$$

интенсивность потока досрочных заявок:

$$\lambda_{k,h}^r = 1 / \overline{\xi_{k,h}} .$$

Тогда общая интенсивность потока заявок, соответствующего передаче PDO класса h одним модулем k -го типа, может быть описана формулой:

$$\lambda_{k,h} = p_{k,h}^r \lambda_{k,h}^r + (1 - p_{k,h}^r) \lambda_{k,h}^d .$$

Подставляя в неё приведённые выше выражения для p^r , λ^r и λ^d , а также учитывая, что с учетом особенностей организации взаимодействия модулей интенсивность потока $\lambda_{k,h}$ не может превышать $1 / T_{SYNC}$, получим:

$$\lambda_{k,h} = \min \left(\frac{1}{T_{SYNC}}, \alpha_{k,h} \frac{\left(1 - e^{-\alpha_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}}\right)^2}{1 - \left(1 + \alpha_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}\right) e^{-\alpha_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}}} + \frac{e^{-\alpha_{k,h} B_{k,h} T_{SYNC}}}{B_{k,h} T_{SYNC}} \right) . \quad (4)$$

Суммарная интенсивность потока заявок класса h ($h \in \{1, \dots, H-1\}$) от всех модулей системы вычисляется как:

$$\lambda_h = \sum_{k=1}^M m_k \lambda_{k,h} , \quad (5)$$

где M – количество типов модулей в СУЗВ;

m_k – количество модулей k -го типа.

Тогда с учётом (1), (2), (5) общая интенсивность потока заявок, формируемых всеми модулями СУЗВ (за исключением заявок SDO класса H), может быть описана так:

$$\lambda_S = \sum_{h=1}^{H-1} \lambda_h, \quad (6)$$

где H – количество классов заявок.

Заявки SDO (класса H) обслуживаются в последнюю очередь, причем с учетом специфики протокола $CANopen$ можно считать, что они формируются лишь в периоды простоя СПД. Вследствие этой особенности в данный момент поток λ_H можно не рассматривать.

После получения выражений, описывающих интенсивности потоков заявок, определим интенсивность обслуживания заявок, то есть интенсивность их передачи по линии связи. Она зависит от времени передачи сообщения, которое определяется скоростью передачи данных по шине CAN , а также форматом и содержанием сообщений. Скорость C шины CAN является величиной постоянной, задаётся в битах в секунду и связана с временем передачи одного бита T_0 соотношением: $T_0 = 1 / C$. Минимальное время передачи сообщения стандартного формата $CAN 2.0a$ [5], как показано автором в [8], можно вычислить с использованием выражения:

$$t^{min} = T_0 (44 + 8 \cdot d),$$

где d – значение поля DLC сообщения (от 0 до 8).

В процессе передачи в сообщение могут быть автоматически вставлены дополнительные биты [5, 8, 9]. В наименее благоприятном случае, когда число автоматически добавленных дополнительных бит максимально, время передачи определяется выражением:

$$t^{max} = T_0 (49 + 8 \cdot d + \lfloor 8 \cdot d / 5 \rfloor + A),$$

где $A=1$ при $d \in \{0, 1, 3, 8\}$; иначе $A=0$. Аналогичные зависимости приведены в [8] и для сообщений расширенного формата $CAN 2.0b$.

Количество автоматически добавленных бит является случайной величиной, закон распределения которой существенно зависит от специфики передаваемых данных и от их конкретных значений [10, 11], поэтому учесть его в описываемой модели СУЗВ не представляется возможным. Некоторые исследователи [1] вводят специальный параметр модели – константу, задающую количество дополнительных бит в каждом сообщении. Этот подход оправдан в случае постоянной длины сообщений, но не соответствует реальной ситуации при переменной длине. По мнению автора, более корректно будет ввести коэффициент, определяющий степень увеличения времени передачи сообщения, поскольку, чем длиннее сообщение, тем больше дополнительных бит может быть в него добавлено:

$$t^{bs} = t^{min} + \eta (t^{max} - t^{min}), \quad (7)$$

где t^{bs} – время передачи сообщения с учетом дополнительных бит;

$\eta \in [0, 1]$ – коэффициент увеличения времени передачи.

Значения поля *DLC* могут отличаться у сообщений разных классов, формируемых различными модулями, поэтому введём обозначение $t_{k,h}$, соответствующее времени передачи t^{bs} сообщения класса h , формируемого модулем k -го типа. Время b обслуживания заявки для системы, работающей без перегрузки, можно с учетом (6) получить из выражения:

$$b = \frac{\lambda_1 T_{1,1} + \sum_{k=1}^M \left(m_k \sum_{h=2}^{H-1} \lambda_{k,h} t_{k,h} \right)}{\lambda_S}, \quad (8)$$

Если при вычислении $t_{k,h}$ задать $\eta = 0$, то получим время обслуживания b^{min} в наиболее благоприятном случае, при $\eta = 1$ – время обслуживания b^{max} в наименее благоприятном случае. Интенсивность обслуживания заявок μ вычисляется как $\mu = 1 / b$, а нагрузка системы $y = \lambda_S / \mu$ или $y = \lambda_S b$.

Нагрузка y является наиболее важной характеристикой, определяющей качество функционирования системы. При $y \leq 1$ все поступающие заявки обслуживаются, а система работает без перегрузки. При $y > 1$ возникает перегрузка, вследствие которой часть заявок остаётся необслуженной или, в случае неограниченной ёмкости накопителя, очередь заявок бесконечно растёт. В рассматриваемом случае все заявки класса $h \in [1, H-1]$ должны быть обслужены (то есть все соответствующие сообщения должны быть доставлены), поэтому условие $y \leq 1$ является необходимым для нормального функционирования СУЗВ. Более того, поскольку по шине CAN дополнительно должны передаваться низкоприоритетные сообщения класса H , неравенство следует записать как строгое: $y < 1$.

Далее проанализируем возможности системы по обслуживанию потока низкоприоритетных заявок класса H . Уменьшение интенсивности обслуживания таких заявок и даже их потеря не оказывает влияния на общую работоспособность системы, но увеличивает время выполнения некоторых операций, например, считывания протокола событий или осциллограмм сигналов. Определим коэффициент простоя $\rho = 1 - y$, показывающий в нашем случае, какую часть времени система свободна от обслуживания высокоприоритетных заявок и, следовательно, может обслуживать заявки класса H . Время обслуживания этих заявок b_H можно получить из выражения (7), учитывая, что поле *DLC* для них всегда равно 8. Интенсивность обслуживания заявок класса H вычисляется как: $\mu_H = \rho / b_H$.

Получим выражение, позволяющее определить среднюю скорость передачи низкоприоритетных данных по известной интенсивности обслуживания μ_H . В рассматриваемой СУЗВ эти данные передаются службой *SDO* в так называемом блочном режиме. Согласно [6], в этом режиме вначале происходит установление связи путём отправки запроса и получения подтверждения (2 сообщения), затем передаются блоки данных, содержащие до 127 сообщений по 7 байтов в каждом. Получение каждого блока подтверждается сообщением от приёмника, после чего может передаваться следующий блок. По окончании передачи всех блоков выполняется процедура завершения связи (2 сообщения). Таким образом, общее число сообщений K , необходимых для передачи N байтов, можно получить по формуле:

$$K = 4 + \left\lceil \frac{N}{7} \right\rceil + \left\lceil \frac{\lceil N/7 \rceil}{127} \right\rceil.$$

Они будут переданы за время $T_K = K / \mu_H$, при этом скорость передачи в байтах в секунду составит:

$$Q_H = \mu_H N / \left(4 + \left\lceil \frac{N}{7} \right\rceil + \left\lceil \frac{\lceil N/7 \rceil}{127} \right\rceil \right). \quad (9)$$

Разработка модели СУЗВ

Описанный метод оценки параметров был реализован автором в математической модели, предназначенной для исследования различных конфигураций СУЗВ и параметров настройки её модулей. Исходными данными для модели являются:

C – скорость шины CAN, бит/с;

T_{SYNC} – длительность цикла синхронизации, с;

η – коэффициент увеличения времени передачи за счёт автоматической вставки бит;

α – параметр экспоненциального распределения времени между изменениями одного измеряемого или вычисляемого значения, передаваемого в PDO ;

H – количество классов заявок;

M – количество типов модулей в СУЗВ;

$\mathbf{M} = [m_1 \ m_2 \ \dots \ m_M]^T$ – столбец количества модулей разного типа;

$\mathbf{B}$ – матрица периодичности отправки заявок (периодичность задаётся в циклах синхронизации);

$\mathbf{D}$ – матрица длин сообщений (содержит значения DLC от 0 до 8 или -1, если модуль не передаёт сообщения данного класса):

$$\mathbf{B} = (b_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}}, \quad \mathbf{D} = (d_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}};$$

$\mathbf{V}$ – матрица, содержащая количество отдельных значений, передаваемых в каждом сообщении PDO .

$\mathbf{LM}$ – матрица режима вычисления интенсивностей потоков заявок; содержит «0» для заявок, отправляемых с заданной периодичностью, «1» – для заявок, отправляемых периодически с возможностью досрочной отправки, «2» – для заявок со специальным режимом вычисления интенсивности потока:

$$\mathbf{V} = (v_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}}, \quad \mathbf{LM} = (lm_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}}.$$

Необходимость использования матрицы $\mathbf{LM}$ объясняется тем, что закон распределения интервалов времени между изменениями значений некоторых параметров СУЗВ определить либо затруднительно, либо невозможно, поскольку он существенно зависит от текущего режима работы и степени износа турбоагрегата. Например, если значение какой-либо составляющей виброскорости не превышает 1...2 мм/с, то соответствующий дискретный флаг (признак) превышения предупредительного уровня вибрации 4.5 мм/с не изменяется и всегда равен нулю. С другой стороны, если вибрация достигнет уровня 4.4...4.6 мм/с, то этот же флаг начнёт изменяться достаточно часто за счёт незначительных колебаний вибрации около значения 4.5 мм/с. В СУЗВ имеются и более сложные зависимости. Для таких величин в матрице $\mathbf{LM}$ введён специальный режим вычисления «2», в котором интенсивность потока заявок зависит от дополнительного параметра модели $StressMode$. Если этот параметр равен нулю, то используется минимальная интенсивность потока, что в подавляющем большинстве случаев соответствует действительности. Если же задать $StressMode$ равным единице, то интенсивность потока таких заявок принимается максимально возможной, позволяя моделировать предельные режимы работы СПД.

Модель работает следующим образом. На первом этапе формируется матрица параметров экспоненциального распределения интервалов времени между заявками каждого класса от каждого типа модулей путём умножения параметра α на количество отдельных значений, передаваемых в сообщении:

$$\mathbf{A} = (\alpha_{k,h}) = \alpha \mathbf{V}.$$

При этом для простоты считаем, что α одинаков для всех значений, передаваемых в сообщениях. Если такое допущение некорректно, то для вычисления элементов матрицы $\mathbf{A}$ следует воспользоваться выражением (3).

Далее формируется матрица длительностей сообщений:

$$\mathbf{T} = (t_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}} : t_{k,h} = F_1(d_{k,h}, \eta),$$

где $F_1(d_{k,h}, \eta)$ – функция, определяемая выражением (7).

После этого создается матрица интенсивностей потоков заявок каждого класса, формируемых одним модулем каждого типа:

$$\mathbf{L} = (l_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}} : l_{k,h} = \begin{cases} 0 & \text{при } b_{k,h} = 0 \\ (T_{\text{SYNC}} b_{k,h})^{-1} & \text{при } lm_{k,h} = 0 \\ F_2(T_{\text{SYNC}}, b_{k,h}, \alpha_{k,h}) & \text{при } lm_{k,h} = 1 \\ (T_{\text{SYNC}} b_{k,h})^{-1} & \text{при } lm_{k,h} = 2 \text{ и } StressMode = 0 \\ T_{\text{SYNC}}^{-1} & \text{при } lm_{k,h} = 2 \text{ и } StressMode = 1 \end{cases},$$

где функция $F_2()$ вычисляется в соответствии с выражением (4).

На следующем шаге каждый столбец матрицы $\mathbf{L}$ поэлементно умножается на столбец $\mathbf{M}$ с целью получения интенсивностей потоков заявок каждого класса, формируемых всеми модулями каждого типа:

$$\mathbf{A} = (\lambda_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}} = \mathbf{L} \circ (\mathbf{E} \otimes \mathbf{M}),$$

где $\mathbf{E}$ – единичный вектор длиной $H-1$.

Общая интенсивность потока заявок вычисляется как сумма элементов матрицы $\mathbf{A}$:

$$\lambda_S = \sum_{k,h} \lambda_{k,h}.$$

Среднее время обслуживания заявки b вычисляется в соответствии с (8):

$$\mathbf{X} = (x_{k,h})_{\substack{k=\overline{1,M} \\ h=\overline{1,H-1}}} = \mathbf{T} \circ \mathbf{A}, \quad b = \lambda_S^{-1} \sum_{k,h} x_{k,h}.$$

Нагрузка системы y , коэффициент простоя ρ и интенсивность обслуживания низкоприоритетных заявок μ_H вычисляются по приведённым ранее формулам: $y = \lambda_S b$,

$\rho = 1 - y$, $\mu_H = \rho / b_H$, скорость передачи низкоприоритетных данных Q_H – по формуле (9).

Применение модели для исследования межмодульного взаимодействия

Описанная модель была использована автором для исследования межмодульного взаимодействия в проектируемой СУЗВ с целью формирования рекомендаций по выбору некоторых параметров настройки модулей. В состав рассматриваемой СУЗВ входят модули следующих типов:

- системный контроллер (тип 1) – 1 шт.;
- модуль измерения вибрации опор (тип 2) – 8 шт.;
- модуль измерения относительной вибрации (тип 3) – 4 шт.
- модуль измерения дополнительных параметров (тип 4) – 2 шт.

Системный контроллер с периодичностью $T_{SYNC} = 0.1$ с формирует высокоприоритетные сообщения *SYNC* (заявки класса 1). Остальные модули передают от двух до четырёх сообщений *PDO* (заявки классов 2...5), которые содержат от одного до четырёх отдельных значений. Часть этих значений является измеренными и вычисленными параметрами вибрации, другая часть – дискретными флагами состояния. Передача каждого *PDO* выполняется безусловно один раз в секунду и может произойти досрочно при изменении хотя бы одного из передаваемых значений. Сообщения *HBEAT* (заявки класса 6) формируются каждым модулем раз в секунду. Кроме того, системный контроллер обменивается служебной информацией с другими модулями по протоколу *SDO* (заявки класса 7). Скорость шины *CAN* предварительно выбрана максимально возможной: 1000 кбит/с.

С использованием этой информации были подготовлены следующие исходные данные для модели:

- количество классов заявок $H = 7$;
- количество типов модулей $M = 4$;
- столбец количества модулей разного типа $\mathbf{M} = [1 \ 8 \ 4 \ 2]^T$.
- матрицы периодичности отправки заявок $\mathbf{B}$, длин сообщений $\mathbf{D}$, количества отдельных значений в сообщении $\mathbf{V}$ и режима вычисления интенсивностей $\mathbf{LM}$:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 \\ 0 & 10 & 10 & 0 & 10 & 10 \\ 0 & 10 & 10 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 6 & 6 & 7 & 4 & 1 \\ -1 & 8 & 5 & -1 & 4 & 1 \\ -1 & 6 & 7 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 4 & 3 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 3 & 4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{LM} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

При формировании матрицы $\mathbf{D}$ дополнительно использовалась информация о размере передаваемых значений в байтах и о разметке *PDO* [6], описание которой выходит за рамки этой статьи.

Значение коэффициента увеличения времени передачи за счёт автоматической вставки бит было выбрано на основании сведений, приведённых в [10, 12]. В результате анализа множества сообщений в реальной системе на базе интерфейса *CAN* было установлено, что при максимальной длине поля данных к сообщению добавляется в среднем 7.89 дополнительных бит из восемнадцати возможных. С учетом этих сведений значение η было принято равным 0.438.

При выборе параметра α , характеризующего вероятность изменения измеряемых и вычисляемых значений в течение некоторого времени, было принято во внимание, что результат аналого-цифрового преобразования некоторого сигнала может меняться как минимум на единицу младшего разряда при каждом измерении, вследствие чего окажется неэффективным механизм увеличения интервалов между сообщениями при отсутствии изменений. Для решения проблемы была введена зона нечувствительности δ , а изменение фиксировалось лишь при выполнении условия $|x_0 - x_i| > \delta$, где x_0 – последнее переданное значение, x_i – текущий результат измерения (вычисления).

Для определения α автором обработаны более 50 графиков изменения вибрации опор и шеек роторов длиной от нескольких часов до нескольких суток с целью определения вероятности изменения сигнала более, чем на заданную величину, за некоторое время. Полученные экспериментально функции распределения для нескольких сигналов при $\delta = 0.5\%$, а также результат их аппроксимации функцией экспоненциального распределения (сплошная линия) показаны на рисунке 3а.

Очевидно, что частота регистрации изменений уровня сигнала зависит от ширины зоны нечувствительности, поэтому аналогичные исследования были выполнены и для других значений δ в диапазоне $0.1 \dots 2.5\%$; для каждого случая определялся усреднённый параметр α . Полученная экспериментально зависимость α от ширины зоны нечувствительности δ приведена на рисунке 3б. Для удобства дальнейшего использования она была аппроксимирована функцией (10):

$$\alpha = 3.123 \cdot e^{-2.12\delta} + 0.0714. \quad (10)$$

Таким образом, в модель СУЗВ добавился ещё один параметр, влияющий на случайную составляющую потока сообщений *PDO*: ширина зоны нечувствительности δ .

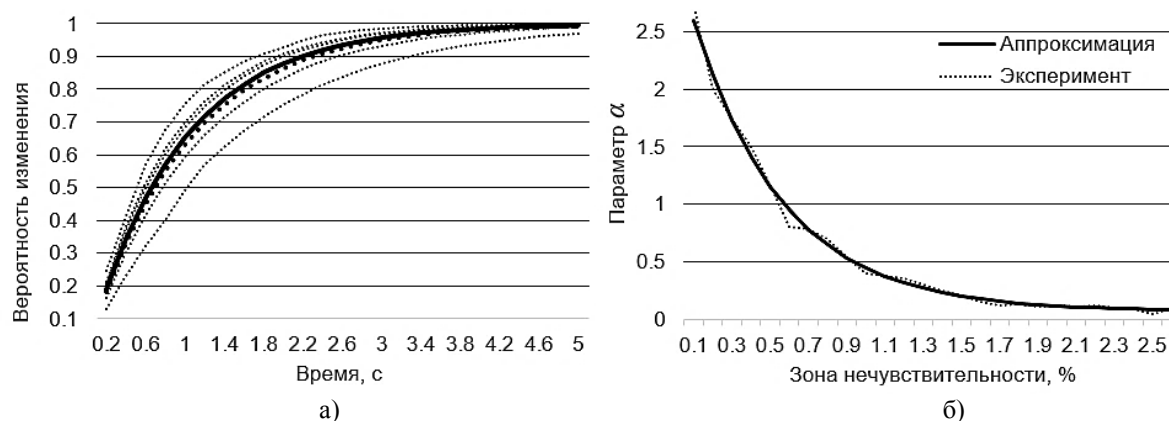


Рисунок 3 – Распределение вероятности изменения сигнала (а) и зависимость усреднённого параметра экспоненциального распределения от ширины зоны нечувствительности (б) [Probability distribution of the signal changes (a) and the dependence of the averaged parameter of the exponential distribution on the width of the dead zone (b)]

На первом этапе исследования СУЗВ была получена зависимость нагрузки СПД от ширины зоны нечувствительности (рис. 4 а). График обычной нагрузки соответствует режиму *StressMode* = 0, когда значения дискретных флагов изменяются сравнительно редко и не приводят к досрочной передаче соответствующих сообщений. График максимальной нагрузки получен в режиме *StressMode* = 1, то есть исходя из предположения, что изменения дискретных флагов происходят в каждом цикле синхронизации.

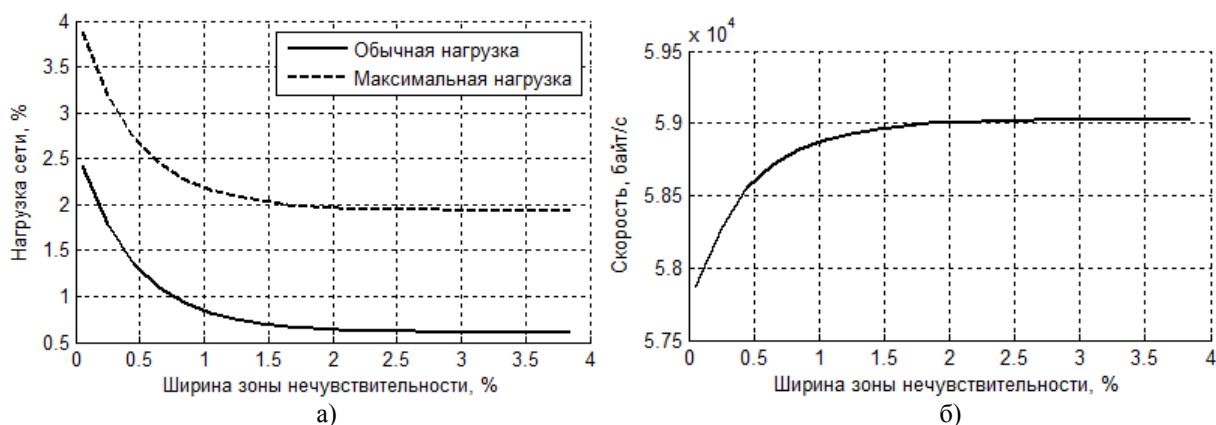


Рисунок 4 – Зависимость параметров СПД от ширины зоны нечувствительности δ : а – нагрузка y ; б – скорость передачи низкоприоритетных данных Q_H [Dependence of the data transmission network parameters on the dead zone width δ : а – load y ; б – low-priority data transmission rate Q_H]

Из графика видно, что при $\delta > 2\%$ влияние этого параметра на нагрузку сети практически отсутствует, а при $\delta < 1\%$ – наоборот, весьма заметно. Это согласуется с результатами наблюдений за параметрами вибрации ТА: изменения более чем на 2...5% обычно возникают при изменении нагрузки агрегата, что происходит сравнительно редко. С другой стороны, колебания значений на уровне менее 0.5...1 % могут быть обусловлены шумами, погрешностями измерений и вычислений, поэтому выявляются значительно чаще. При дальнейшем уменьшении δ возрастание нагрузки, согласно (4), должно прекратиться, но значения $\delta < 0.1\%$ находятся на уровне погрешности измерения и практического интереса не представляют, вследствие чего исследования в этой области не выполнялись.

Кроме описанных зависимостей была вычислена предельно возможная нагрузка СПД y_{max} , возникающая в ситуации, когда все сообщения каждого модуля в силу стечения обстоятельств передаются в одном цикле синхронизации. Эта ситуация встречается крайне редко, но выполнение условия $y_{max} < 100\%$ гарантирует, что все приоритетные сообщения в любом случае будут переданы своевременно, то есть в пределах одного периода синхронизации T_{SYNC} . Для заданных параметров СУЗВ величина y_{max} оказалась равной 5.5 %.

На рисунке 4б показана полученная в результате моделирования зависимость скорости передачи низкоприоритетных данных Q_H от заданной ширины зоны нечувствительности в режиме обычной нагрузки. В качестве примера были взяты наиболее часто передаваемые данные – осциллограммы сигналов виброскорости и виброускорения. Они имеют длину 4000 байт каждая и, как видно из графика, при $\delta = 1\%$ передаются на скорости около 58.8 кбайт/с. При этой скорости одна осциллограмма будет передана примерно за 68 мс, а 24 осциллограммы с восьми контролируемых опор – за 1.6 с.

Анализ результатов моделирования показал, что оптимальным значением ширины зоны нечувствительности δ можно считать 1 %: в этом случае при незначительном увеличении нагрузки на СПД (по сравнению с минимальной) обеспечивается оперативное информирование модулей системы о каких-либо значимых изменениях вибрации. Увеличение δ не даёт существенного снижения нагрузки, но уже заметно снижает чувствительность СУЗВ к изменениям вибрации, а уменьшение δ в разы повышает нагрузку на СПД без какой-либо практической пользы.

Второй вывод, сделанный по результатам моделирования, заключается в том, что при заданных параметрах системы и $\delta = 1\%$ коэффициент простоя СПД превышает 99 %. Это положительно сказывается на скорости передачи низкоприоритетных данных, но такие данные передаются очень редко, в основном по запросу оператора

или при возникновении нештатных ситуаций. С другой стороны, работа шины CAN на максимальной скорости снижает помехоустойчивость интерфейса и повышает тепловыделение модулей СУЗВ. Поэтому на следующем этапе исследований были получены и исследованы зависимости показателей СПД от скорости передачи данных по шине CAN при $\delta = 1\%$ (рис. 5).

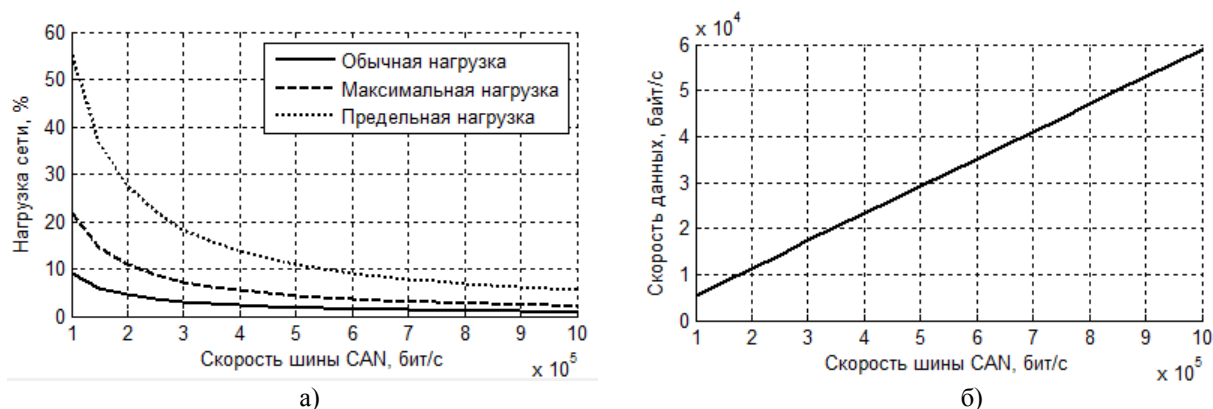


Рисунок 5 – Зависимость параметров СПД от скорости шины CAN: а – нагрузка; б – скорость передачи низкоприоритетных данных) [Dependence of the data transmission network parameters on the CAN bus speed: а – load y; б – low-priority data transmission rate Q_H]

На рисунке 5а видно, что даже десятикратное снижение скорости шины CAN (до 100 000 бит/с) не приводит к возникновению перегрузки СПД при передаче приоритетных сообщений. Более того, предельная нагрузка в этом случае не превышает 60 %, что, безусловно, гарантирует своевременную доставку всех приоритетных сообщений. С другой стороны, скорость передачи низкоприоритетных данных (рис. 5 б) практически линейно зависит от скорости шины и при её минимальном значении уменьшается с 58.8 до 5.4 кбайт/с. Такое снижение скорости несущественно при автоматической передаче накопленных данных с целью архивирования, поскольку модули имеют буферную память достаточного объёма, но создаёт неудобства при получении данных по команде оператора: в этом случае, например, окончания передачи всех осциллограмм после запроса придётся ждать уже не 1.6, а почти 18 с. Исходя из этих рассуждений скорость шины CAN для исследуемой конфигурации СУЗВ была понижена в два раза до 500 кбит/с, что позволило так же в 2 раза уменьшить тактовую частоту приёмопередатчиков CAN во всех модулях СУЗВ, снизив за счёт этого их тепловыделение при сохранении приемлемой скорости передачи низкоприоритетных данных.

Сравнение результатов моделирования с данными, полученными на действующем макете проектируемой СУЗВ описанной конфигурации, показало их хорошее совпадение: реальная скорость передачи низкоприоритетных данных в нескольких опытах находилась в диапазоне 25...30 кбит/с. Некоторое уменьшение средней скорости по сравнению с вычисленной (29 кбит/с) можно объяснить дополнительными задержками, связанными с обработкой данных системным контроллером и с передачей их на рабочую станцию оператора.

Заключение

Описанный метод и реализованная с его использованием математическая модель позволяют оценить параметры межмодульного взаимодействия в СУЗВ ТА на самых ранних этапах проектирования, исключая возможность возникновения грубых ошибок, связанных с перегрузкой сети передачи данных, а также выполнить более тонкую настройку параметров взаимодействия с учётом количества модулей разных типов в конкретной конфигурации СУЗВ. Модель может быть использована как при адаптации СУЗВ к определённому типу ТА, так и при модернизации программного обеспечения

СУЗВ – для оптимизации количества передаваемых модулями параметров, распределения их по сообщениям, выбора длительности цикла синхронизации, частоты передачи сообщений, а также для решения иных коммуникационных задач. Планируемая интеграция модели в разработанный с участием автора программный комплекс имитационного моделирования СУЗВ [3] позволит существенно упростить подготовку исходных данных для неё за счёт автоматического извлечения этих данных из EDS-файлов описания конкретной СУЗВ. Предложенный метод является универсальным и позволяет при необходимости моделировать работу других модульных систем на базе протокола *CANopen*, а после модификации метода оценки времени передачи сообщений [8] – и более быстрого протокола *CANopen FD*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lekidis Alexios, Bozga Marius, Bensalem Saddek*. Rigorous Modeling and Validation of CANopen Systems. 2014. doi: 10.13140/2.1.1742.1129.
2. *N. Sußmann, A. Meroth*. Model based development and verification of CANopen components 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ETFA.2017.8247745.
3. *Плотников, Д.А.* Разработка модели межмодульного взаимодействия в системах контроля вибрации на базе протокола CANopen / Д.А. Плотников, В.И. Лачин, В.К.М. Алджиязна, К.Ю. Соломенцев // Известия вузов. Электромеханика. – 2020. – Т. 63, № 2-3. – С. 68-75. – DOI: 10.17213/0136-3360-2020-2-3-68-75.
4. *Плотников, Д.А.* Цифровые технологии в системах вибромониторинга турбоагрегатов / Д.А. Плотников, В.И. Лачин, В.К.М. Алджиязна // Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XVII Международной научно-практической конференции, 26-28 мая 2021 г. / НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгоград : ВИТИ НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 16-19.
5. CAN Specification. Version 2.0 / ROBERT BOSCH GmbH, 1991. – 72 p.
6. CiA 301. CANopen application layer and communication profile. Version: 4.2.0. © CAN in Automation (CiA) 2011. URL: <https://www.can-cia.org> (дата обращения: 23.06.2021)
7. *K. Iehira, H. Inoue, K. Ishida*. Spoofing attack using bus-off attacks against a specific ECU of the CAN bus 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/CCNC.2018.8319180.
8. *Плотников, Д.А.* Оценка времени отклика элементов в модульных информационно-измерительных и управляющих системах, использующих интерфейс CAN / Д.А. Плотников // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2017. – № 1. – С. 13-18. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-1-13-18.
9. *Medhat Maha*. Bit stuffing techniques Analysis and a Novel bit stuffing algorithm for Controller Area Network (CAN). International Journal of Computer System (ISSN: 2394-1065), Volume 02– Issue 03, March, 2015
10. *Alaei Reza, Moallem Payman, Bohlooli Ali*. Statistical based algorithm for reducing bit stuffing in the Controller Area Networks. Microelectronics Journal. 101. 104794. – 2020. doi: 10.1016/j.mejo.2020.104794.
11. *Liu Yu, Yin Yue*. Statistical Analysis of Improved Bit-stuffing Method Based on CAN Bus. DEStech Transactions on Computer Science and Engineering. – 2018. doi: 10.12783/dtcse/ceic2018/24562..
12. *Nolte Thomas, Hansson Hans, Norström Christer, Punnekkat Sasikumar*. Using bit-stuffing distributions in CAN analysis. IEEE Real-Time Embedded Systems Workshop. – 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/255672829_Using_bit-stuffing_distributions_in_CAN_analysis (дата обращения: 15.06.2021).

REFERENCES

- [1] Lekidis Alexios, Bozga Marius, Bensalem Saddek. Rigorous Modeling and Validation of CANopen Systems. 2014. doi: 10.13140/2.1.1742.1129 (in English).
- [2] N. Sußmann, A. Meroth. Model Based Development and Verification of CANopen Components 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2017. P. 1-5, doi: 10.1109/ETFA.2017.8247745 (in English).
- [3] Plotnikov D.A., Lachin V.I., Aldzhiyazna V.K.M., Solomencev K.Yu. Razrabotka modeli mezhmodul'nogo vzaimodejstviya v sistemah kontrolya vibracii na baze protokola CANopen [Development of a Model of Intermodular Interaction in Vibration Control Systems Based on the

- CANopen Protocol]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [University News. Electromechanics]. 2020. Vol.63. №2-3. P.68-75. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-2-3-68-75 (in Russian).
- [4] Plotnikov D.A., Lachin V.I., Aldzhizayna V.K.M. Cifrovye tekhnologii v sistemah vibromonitoringa turboagregatov [Digital Technologies in Vibration Monitoring Systems of Turbine Units]. *Bezopasnost' yadernoj energetiki: tezisy dokladov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, 26-28 maya 2021 g. / NIYAU MIFI [i dr.] [Safety of Nuclear Energy: Abstracts of the XVII International Scientific and Practical Conference, May 26-28, 2021 / NRNU MEPhI [and others]. Volgogradsk: VITI NIYAU MIFI [Volgogradsk: VITI NRNU MEPhI]. 2021. P.16-19 (in Russian).
- [5] CAN Specification. Version 2.0 / ROBERT BOSCH GmbH, 1991. 72 p. (in English).
- [6] CiA 301. CANopen application layer and communication profile. Version: 4.2.0. © CAN in Automation (CiA) 2011. URL: <https://www.can-cia.org> (accessed: 23.06.2021) (in English).
- [7] K. Iehira, H. Inoue, K. Ishida. Spoofing attack using bus-off attacks against a specific ECU of the CAN bus 2018 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). 2018. P.1-4. DOI: 10.1109/CCNC.2018.8319180 (in English).
- [8] Plotnikov D.A. Ocenka vremeni otklika elementov v modul'nyh informacionno-izmeritel'nyh i upravlyayushchih sistemah, ispol'zuyushchih interfejs CAN [Evaluation of the Response Time of Elements in Modular Information-Measuring and Control Systems Using the CAN Interface]. *Izvestiya vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. Nauki* [University News. North Caucasus. region. Tech. science]. 2017. №1. P.13-18. DOI: 10.17213/0321-2653-2017-1-13-18 (in Russian).
- [9] Medhat Maha. Bit Stuffing Techniques Analysis and a Novel Bit Stuffing Algorithm for Controller Area Network (CAN). *International Journal of Computer System* (ISSN: 2394-1065), Volume 02. Issue 03. March, 2015 (in English).
- [10] Alaei Reza, Moallem Payman, Bohlooli Ali. Statistical Based Algorithm for Reducing Bit Stuffing in the Controller Area Networks. *Microelectronics Journal*. 101. 104794. 2020. DOI: 10.1016/j.mejo.2020.104794 (in English).
- [11] Liu Yu, Yin Yue. Statistical Analysis of Improved Bit-stuffing Method Based on CAN Bus. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*. 2018. DOI: 10.12783/dtcse/ceic2018/24562 (in English).
- [12] Nolte Thomas, Hansson Hans, Norström Christer, Punnekkat Sasikumar. Using Bit-Stuffing Distributions in CAN Analysis. *IEEE Real-Time Embedded Systems Workshop*. – 2009. URL: https://www.researchgate.net/publication/255672829_Using_bit-stuffing_distributions_in_CAN_analysis (accessed 15.06.2021) (in English).

Probabilistic Method and Model for the Intermodular Interaction Parameters Estimating in Vibration Protection Control Systems of Turbine Units

D.A. Plotnikov

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Prosveshcheniya St., 101,
Novocherkassk, Rostov region, Russia 346428
ORCID iD: 0000-0001-7551-1364
WoS Researcher ID: B-1248-2018
e-mail: dpl68@mail.ru*

Abstract – The paper briefly describes the structure of a turbine unit's modular vibration protection control system (VPCS), formulates the problems of estimating the intermodular interaction parameters that arise at the early stages of VPCS design. Based on the algorithm analysis for the operation of various CANopen protocol services, a probabilistic method is proposed for determining the main communication processes parameters in the VPCS using the queuing theory elements. The mathematical model of the VPCS using the proposed method is considered, its input parameters, the functioning algorithm and output data are described. A technique for studying a real VPCS using a model is described, the results of modeling are presented, their analysis is carried out, based on which methods for optimizing some parameters of intermodular interaction are proposed.

Keywords: vibration protection, vibration monitoring, modular system, intermodular interaction, queuing system, CANopen modeling, CAN bus.

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

УДК 621.039.517.5

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА НА
ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ МИКРОЯЧЕЙКИ
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА ВОДО-ВОДЯНОГО
ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

© 2021 В.К. Семенов, Н.Б. Иванова, М.А. Вольман, А.А. Беляков

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, Иваново, Россия

Оптимизация состава активной зоны водо-водяных реакторов связана с расчетом температурных полей микроячеек теплообмена, содержащих отдельные тепловыделяющие элементы. Учет радиационно-кондуктивного теплообмена внутри твэла основан на утверждении, что гелиевый зазор между столбом таблеток топлива и стенкой твэла обладает свойствами абсолютно черного тела. Это неверно, поскольку гелий является одноатомным газом, он не поглощает и не излучает, т.е. прозрачен для теплового излучения. В статье обоснована физическая и математическая модель микроячейки тепловыделяющего элемента водо-водяного ядерного реактора с учетом радиационного теплообмена. В модели учтено, что гелий прозрачен для теплового излучения, а охлаждение твэла осуществляется проточной системой теплоносителя. Реализация модели осуществлена аналитически методом интегральных соотношений Кармана-Польгаузена. Рассчитаны температурные поля столба топливных таблеток и канала теплоносителя, определены температуры боковых поверхностей ячейки и оценено влияние радиационного теплообмена на распределение температуры в ячейке.

Ключевые слова: микроячейка твэла, температурное поле, метод Кармана-Польгаузена, сложный кондуктивно-радиационный теплообмен, среднемассовая температура теплоносителя.

Поступила в редакцию 24.07.2021

После доработки 30.08.2021

Принята к печати 06.09.2021

Активная зона водо-водяного реактора имеет цилиндрическую форму и состоит из тепловыделяющих элементов (твэл), собранных в тепловыделяющие сборки (ТВС) и окруженных замедлителем, который одновременно является и теплоносителем. Объемное выделение энергии в реакторе обусловлено цепной реакцией, происходящей под действием тепловых нейтронов, поглощающихся ядрами топлива в твэлах. Совершенствование конструкций реакторов базируется на решении взаимосвязанных задач – экономических и связанных с ядерной безопасностью [1–4]. С экономической точки зрения целесообразно уменьшение массы топливной загрузки реактора, что требует уменьшения диаметра твэлов и дополнительного обогащения топлива нуклидом ^{235}U . Такое решение приведёт к возрастанию температуры топливных таблеток твэла и возрастанию теплового потока через его стенку, так как минимальный диаметр твэла определяется именно этими двумя параметрами. Причём для реакторов на быстрых нейтронах, охлаждаемых жидкими металлами с большой теплопроводностью, решающим является условие ограничения температуры твэла температурой его плавления, тогда как для водо-водяного реактора решающим является значение теплового потока, поступающего через стенку твэла. В том и другом

случаях требуется рассчитать температурное поле твэла. Этот расчёт требует определения потока тепловых нейтронов в твэле.

Плотность потока тепловых нейтронов внутри ТВС не является постоянной величиной, она достигает максимальных значений в замедлителе в промежутке между соседними твэлами внутри ТВС и в замедлителе в промежутке между отдельными ТВС. При этом плотность потока тепловых нейтронов уменьшается к центру каждого твэла и ТВС, достигая там локального минимума. Полное распределение нейтронного потока тепловых нейтронов по объёму зоны складывается из распределения по объёму гомогенизированной активной зоны, распределения по макроячейке, образованной ТВС, и микроячейке, образованной твэлом [5] (рис. 1). Распределение плотности потока тепловых нейтронов, а значит и плотности объёмного тепловыделения $Q(r)$ в радиальном направлении является весьма сложным, однако распределение этих величин по высоте зоны в силу однородности состава зоны в этом направлении является одинаковым для всех ячеек и подчиняется закону $Q(z) \sim \sin(\pi z / H_{A3})$, где H_{A3} – экстраполированная высота активной зоны реактора.

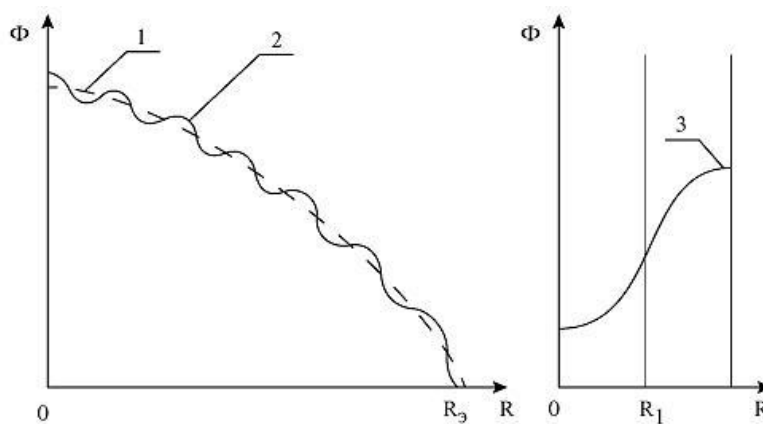


Рисунок 1 – Качественные распределения плотности потока нейтронов в активной зоне: Φ – плотность потока тепловых нейтронов, вызывающих деление ядер топлива, R_1 – радиус поверхности столба топливных таблеток, R_3 – экстраполированный радиус активной зоны, 1 – гомогенизированное распределение, 2 – распределение в гетерогенной активной зоне, 3 – распределение внутри твэла (локальный минимум) и в теплоносителе (локальный максимум) [Qualitative distributions of the neutron flux density in the core: Φ – flux density of thermal neutrons causing fission of fuel nuclei, R_1 – radius of the surface of the column of fuel pellets, R_3 – extrapolated radius of the core, 1 – homogenized distribution, 2 – distribution in the heterogeneous core, 3 – distribution inside the fuel element (local minimum), and in the coolant (local maximum)]

Охлаждение отдельных твэлов осуществляется общим потоком теплоносителя, проходящего через ТВС. В силу этого детальный расчет теплообмена между отдельным твэлом и теплоносителем в реальном реакторе представляет собой сложную задачу [5-8]. Дело усложняется еще и тем, что внутри твэла имеет место сложный радиационно-кондуктивный теплообмен. Ввиду того, что плотность потока лучистого теплообмена составляет около 10% от общего потока теплоты, в технических расчетах его обычно не учитывают [8, 9]. Однако определенный интерес представляет непосредственная оценка влияния этого процесса на температурное поле твэла.

В работе [10, 11] учет радиационного механизма выполнен численно с использованием пакета Comsol Multiphysics в предположении, что гелиевая прослойка между столбом топливных таблеток и стенкой твэла является абсолютно черным телом. Это предположение, как показывает анализ, является физически неправомерным, и от него следует отказаться. Также вызывает сомнения используемая модель отвода теплоты от твэла. Здесь в качестве расчётной модели микроячейки теплообмена рассматривается твэл, погружённый в толстый слой неподвижной воды, при этом на

боковой поверхности ТВЭЛ используется граничное условие третьего рода, задаваемое в виде закона Ньютона. Согласно этому закону плотность потока теплоты от ТВЭЛ к жидкости пропорциональна разности между температурой стенки ТВЭЛ и температурой воды вдали от стенки, а коэффициентом пропорциональности является коэффициент теплоотдачи стенки ТВЭЛ. Однако, коэффициент теплоотдачи сам может зависеть от перепада температуры между стенкой и жидкостью, поэтому закон Ньютона носит приближённый характер, а коэффициент теплоотдачи будет сложной функцией от координат поверхности ТВЭЛ, т.к. с разных сторон ТВЭЛ условия его охлаждения будут различны. И еще одно замечание. В законе Ньютона тепловой поток зависит от перепада температуры между стенкой ТВЭЛ и жидкостью вдали от стенки, но для отдельного ТВЭЛ нельзя брать температуру окружающей жидкости за пределами сборки, её нужно брать перед другими ТВЭЛами, но где именно – совершенно неизвестно. В этой ситуации граничное условие третьего рода теряет всякий смысл. Кроме того, поскольку теплота из активной зоны выносится потоком теплоносителя в парогенератор и охлаждение отдельных ТВЭЛов осуществляется потоком жидкости, то нужно использовать другое граничное условие.

В нашей работе предлагается модель микроячейки теплообмена, основанная на упрощающем расчет допущении, что каждый ТВЭЛ охлаждается не общим потоком теплоносителя всей ТВС, а индивидуально, т.е. ТВЭЛ находится в отдельном канале с проточным теплоносителем [12] (рис. 2). Однако параметры канала охлаждения – его радиус и расход теплоносителя – напрямую задать трудно, мы их найдем, приняв подогрев теплоносителя при заданном номинальном тепловыделении в ТВЭЛ между входом и выходом на 30К. На наш взгляд, такая модель ближе к реальной ситуации. Также предположим, что гелий в тонком замкнутом с торцов канале между столбом таблеток топлива и стенкой ТВЭЛ неподвижен (толщина канала доли миллиметра). В этой модели объемное тепловыделение в ТВЭЛ можно представить формулой (1):

$$Q_v(r, z) = Q_0 \varphi(r) \sin(\pi z / H_{A3}), \quad (1)$$

где H_{A3} – экстраполированная высота активной зоны реактора;

Q_0 – объемное тепловыделение в центральной точке оси ТВЭЛ;

$\varphi(r)$ – функция, определяющая радиальную зависимость плотности объемного тепловыделения.

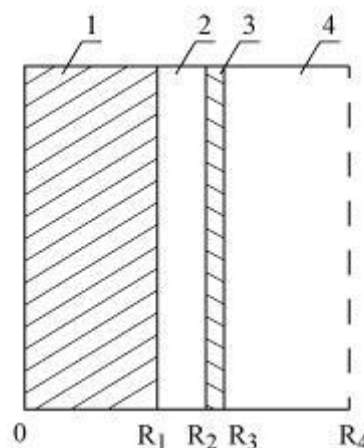


Рисунок 2 – Расчётная схема ТВЭЛ: 1 – слой топливных таблеток, 2 – гелиевый зазор, 3 – стенка ТВЭЛ, 4 – теплоноситель, R_1 – радиус поверхности столба таблеток, R_2 – внутренний радиус оболочки ТВЭЛ, R_3 – наружный радиус ТВЭЛ, R_4 – фиктивный радиус канала охлаждения [Design scheme of a fuel element: 1 – layer of fuel pellets, 2 – helium gap, 3 – wall of a fuel element, 4 – coolant, R_1 – radius of the surface of the column of pellets, R_2 – inner radius of the fuel element cladding, R_3 – outer radius of a fuel element, R_4 – fictitious radius of the cooling channel]

Рассматриваемая стационарная задача подчиняется следующей системой дифференциальных уравнений (2)-(5):

$$\lambda_1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + \lambda_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + Q_v(r, z) = 0, \quad (2)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \lambda_2 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) = 0, \quad (3)$$

$$C_p \gamma \left(U \frac{\partial T}{\partial z} + V \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \lambda_3 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \lambda_3 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV) = 0. \quad (5)$$

Здесь θ – температура таблеток топливного столба, t – температура гелиевой прослойки, T , γ , C_p – соответственно температура, плотность и удельная теплоемкость охлаждающей жидкости, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – соответственно коэффициенты теплопроводности топлива, гелия, стенки твэла и воды, U , V – соответственно осевая и радиальная составляющие скорости потока жидкости. Уравнение (2) определяет температурное поле топливного столба, уравнение (3) – температурное поле гелиевой прослойки, уравнение (4) – температурное поле охлаждающей жидкости, уравнение (5) – уравнение непрерывности для потока жидкости.

Для оценки роли радиационного теплообмена зависимость коэффициентов переноса, а также удельной теплоемкости и плотности воды от температуры одинаковым образом влияет на расчет температурных полей с учетом указанного механизма и без него, поэтому будем их считать осредненными по рабочему интервалу температур для каждой среды.

Прежде чем сформулировать граничные условия к поставленной задаче, рассмотрим вопрос о характере радиационно-кондуктивного теплообмена в гелиевой прослойке между боковой поверхностью столба топливных таблеток и внутренней стенкой оболочки твэла. Теоретически поток фотонов, поглощённых слоем гелия толщиной l , записывается в виде $\phi_{\text{погл}} = \phi_0 (1 - \exp(-\sigma n l))$. Здесь σ – дифференциальное сечение взаимодействия потока фотонов с атомом гелия, n – число атомов гелия в единице объема. Для всех одноатомных газов, в том числе и гелия, выполняется условие $\sigma n l \ll 1$, т.е. гелий для теплового излучения прозрачен – он не поглощает и не излучает. Дело в том, что поглощение и излучение фотонов отдельными атомами связано только с переходами между электронными уровнями, а энергии квантов теплового излучения малы по сравнению с расстояниями между уровнями, поэтому поток теплового излучения между поверхностью топливного столба и внутренней стенкой твэла проходит через прослойку гелия, не взаимодействуя с ним. Это условие будет учтено при формулировании граничных условий поставленной задачи.

С учетом сказанного граничные условия для поставленной задачи имеют следующий вид (6)-(13):

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \text{ при } r=0, -\lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial r} = j_1, \text{ при } r = R_1, \quad (6)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial \theta}{\partial r} - \sigma (\theta_1^4 - t_2^4) = -\lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r}, \text{ при } r = R_1, \quad (7)$$

$$\varepsilon \sigma (\theta_1^4 - t_1^4) \frac{R_1}{R_2} - \lambda_2 \frac{\partial t}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r}, \text{ при } r = R_2, \quad (8)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \text{ при } r = R_4, \quad (9)$$

$$j_1 \frac{R_1}{R_3} = j_3, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \text{ при } z = 0, z = H, \quad (11)$$

$$T(r, 0) = \theta(r, 0) = 0, \quad (12)$$

$$G = \int_{R_3}^{R_4} U 2\pi r dr = \text{const}, V = 0 \text{ при } r = R_3 \text{ и } r = R_4. \quad (13)$$

Здесь G – расход теплоносителя, j_1 – поверхностная плотность теплового потока, поступающего от топлива, ε – приведённая излучательная способность поверхности столба топлива и внутренней стенки твэла [8], j_3 – поверхностная плотность теплового потока, полученного теплоносителем, H – высота микроячейки теплообмена. Отсчёт температуры теплоносителя и топлива идет от входа в канал.

Рассматриваемая задача не имеет точного аналитического решения. Её можно решить, используя приближённый метод – либо численный, либо аналитический. Поскольку нас интересует физическая сторона дела, то для решения поставленной задачи воспользуемся приближённым аналитическим методом интегральных соотношений, широко применяемым в гидродинамике и теплофизике [13]. Его суть состоит в том, что исходные дифференциальные уравнения путём интегрирования поперёк расчётной ячейки приводятся к эквивалентным им точным интегральным соотношениям с неизвестным распределением температуры поперёк ячейки. Приближённость метода состоит в том, что температурный профиль внутри ячейки подбирается в известном смысле произвольно лишь на основе удовлетворения граничным условиям. Если профиль выбран удачно, то всё решение является весьма удовлетворительным.

При расчёте температурного поля такой сложносоставной ячейки обычно задаётся q_0 – линейная плотность потока теплоты на наружной поверхности середины твэла, омываемого водой [8], поэтому расчет температурного поля удобнее начать с последнего звена – канала охлаждения. Для этого умножим уравнение непрерывности (5) на $C_p \gamma$ и сложим с уравнением (4), умноженным на T (14):

$$C_p \gamma \left(\frac{\partial}{\partial z} (UT) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rVT) \right) = \lambda_3 \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \lambda_3 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (14)$$

Далее проинтегрируем это уравнение поперёк канала теплоносителя. Учитывая, что в силу граничных условий $\int_{R_3}^{R_4} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rVT) 2\pi r dr = 0$ и считая, что всё количество теплоты, выделенное в твэле, передается через боковую поверхность в теплоноситель, получим (15):

$$\int_{R_3}^{R_4} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_3 \frac{\partial T}{\partial r} \right) 2\pi r dr = Q_v(z) = 2\pi R_3 j_3(z) = q_0 \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right), \quad (15)$$

с учетом оценки $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \sim \frac{(R_4 - R_3)^2}{H^2} \ll 1$ получим уравнение для определения

среднемассовой температуры $\langle T \rangle = \frac{\int_{R_3}^{R_4} UT 2\pi dr}{G}$, где $G = \int_{R_3}^{R_4} U 2\pi dr$ – расход теплоносителя. С учетом оценки $\langle T \rangle$ (16):

$$C_p \rho G \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial z} = q_0 \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right). \quad (16)$$

Далее, учитывая, что температура отсчитывается от входа в канал, после интегрирования получим (17):

$$\langle T \rangle = B \left(1 - \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \right), \text{ где } B = \frac{q_0 H}{\pi \rho C_p G}. \quad (17)$$

С учетом граничных условий (9) на стенках канала теплоносителя решение представим в виде (18):

$$T(r, z) = T_3(z) - f(z) \left(1 - \frac{(R_4 - r)^2}{(R_4 - R_3)^2} \right). \quad (18)$$

Так как $\lambda_3 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_3} = -\frac{q_0}{2\pi R_3}$, то после подстановки сюда $T(r, z)$ получим (19):

$$f(z) = \frac{(R_4 - R_3) q_0}{4\pi \lambda_4 R_3} \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right). \quad (19)$$

Подставляя (19) в (18), получим (20):

$$T(r, z) = T_3(z) - \frac{(R_4 - R_3) q_0}{2\pi \lambda_4 R_3} \left[1 - \frac{(R_4 - r)^2}{(R_4 - R_3)^2} \right] \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right). \quad (20)$$

Подставляя это выражение в формулу (15), получим (21):

$$\langle T(z) \rangle = T_3(z) - \frac{q_0 M}{2\pi R_3 \lambda_4} \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right), \quad (21)$$

где $M = \frac{1}{\pi(R_4 + R_3)} \int_{R_3}^{R_4} \left[1 - \frac{(R_4 - r)^2}{(R_4 - R_3)^2} \right] 2\pi dr$.

С учетом (17) получим (22):

$$T_3(z) = \frac{qH}{\pi C_p G} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right) \right) + \frac{q_0 M}{2\pi R_3 \lambda_4} \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right) \quad (22)$$

Займемся теперь расчетом температурного поля в топливе. Решение для температуры столба топлива с учетом граничных условий (6) будем искать в виде (23):

$$\theta(r, z) = \theta_1(z) + f_1(z) \left(1 - \left(\frac{r^2}{R_1^2} \right) \right), \quad (23)$$

где $\theta_1(z)$ – подлежащая определению температура на границе столба топлива.

Из граничных условий (6) и (10) находим (24):

$$f_1(z) = \frac{q_0}{4\pi\lambda_1} \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right). \quad (24)$$

Зависимость $\theta_1(z)$ найдем по уравнению теплового баланса (25):

$$\theta_1(z) = T_3(z) + \frac{q_0}{2\pi} \left[\frac{(R_3 - R_2)}{R_2 \lambda_3} + \frac{0.9(R_2 - R_1)}{R_1 \lambda_2} \right] \sin\left(\frac{\pi z}{H}\right). \quad (25)$$

Здесь учтено, что плотность радиационного потока составляет 10% от полного потока. Без учета радиационного теплообмена второе слагаемое в правой части не будет содержать множителя 0.9.

На рисунках 3-6 в качестве примера расчета представлены графики зависимости температурного поля ячейки с учетом радиационного теплообмена и без него при $q_0 = 325$ Вт/см. Температура измерена в градусах Кельвина.

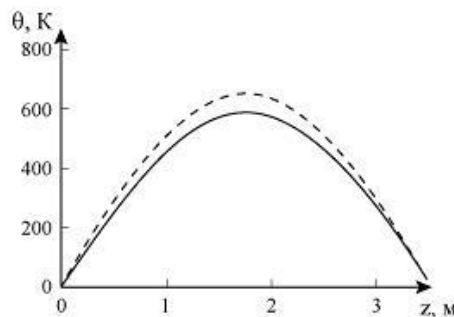


Рисунок 3 – Зависимость температуры боковой поверхности топливного столба от вертикальной координаты (верхняя кривая без учета лучистого теплообмена) [Dependence of the temperature of the fuel column side surface on the vertical coordinate (upper curve excluding radiant heat exchange)]

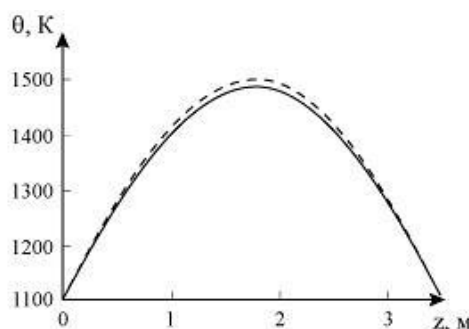


Рисунок 4 – Зависимость температуры на оси топливного столба от вертикальной координаты [Dependence of the temperature on the fuel column axis on the vertical coordinate]

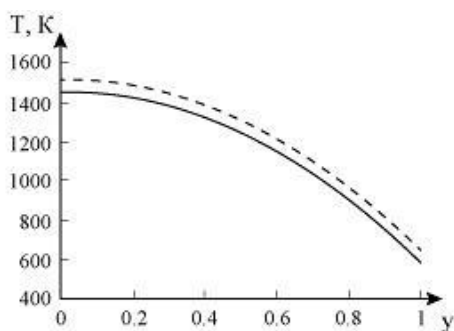


Рисунок 5 – Зависимость температуры топливного столба от безразмерного параметра $y=r/R1$ при $z=H/2$
[Fuel column temperature dependence on dimensionless parameter $y = r/R1$ at $z = H/2$]

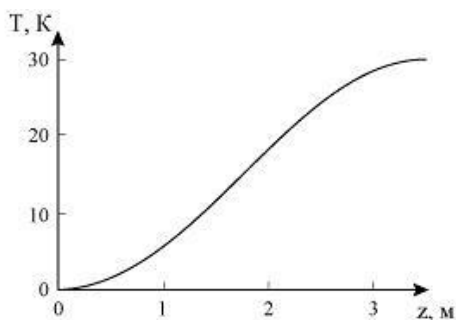


Рисунок 6 – Зависимость среднемассовой температуры теплоносителя от вертикальной координаты
[Dependence of the change in the coolant average mass temperature on the vertical coordinate]

Верхние кривые на рисунках 3-5 относятся к расчету без учета радиационного теплообмена. Из проведенных оценочных расчетов видно, что лучистый теплообмен не влияет на температурное поле теплоносителя и в большей степени влияет на температуру боковой поверхности столба топливных таблеток, различие в зависимости температуры от высоты столба в максимуме порядка 62 К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скляренко, В.А.* О материалах для оболочек твэл реакторов с водным теплоносителем сверхкритического давления / В.А. Скляренко, А.Г. Зубков, В.М. Зорин, А.В. Аникеев // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – № 8. – С. 33-42.
2. *Зорин, В.М.* Энергетический баланс и показатели тепловой экономичности энергоблока атомной электрической станции / В.М. Зорин, И.В. Устюхина, А.В. Бесова // Вестник Московского энергетического института. – 2020. – № 2. – С. 34-41.
3. *Карташов, К.В.* Поканальный теплогидравлический расчет активной зоны реактора ВВЭР-СКД 30 МВт (тепл.) при номинальных режимах работы / К.В. Карташов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2016. – № 3. – С. 127-131.
4. *Jian Li.* Materials Selection for the Canadian Supercritical Water-Cooled Nuclear Reactor Concept // JOM. 2016. V. 68. № 2.
5. *Ганев, И.Х.* Физика и расчет реактора / И.Х. Ганев. – Москва : Энергоиздат, 1991. – 368 с.
6. *Колпаков, Г.Н.* Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов / Г.Н. Колпаков, О.В. Селиваникова. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
7. *Кириллов, П.Л.* Тепломассообмен в ядерных энергетических установках / П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская. – Москва : Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
8. *Кириллов, П.Л.* Справочник по теплогидравлическим процессам в ядерной энергетике, т. 2 / П.Л. Кириллов, В.П. Бобков, А.В. Жуков, В.С. Юрьев. – Москва : ИздАТ, 2010.
9. *Семенов, В.К.* Обоснование математической модели теплообмена для реактора с сосредоточенными параметрами / В.К. Семенов, М.А. Вольман // Глобальная ядерная безопасность. – № 4(17), 2015. – С. 35-42.
10. *Горбунов, В.А.* Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения / В.А. Горбунов, С.Г. Андрианов, С.С. Коновальцева // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 23-31.

11. Горбунов, В.А. Разработка модели по определению температурного поля твэла в двумерной постановке задачи / В.А. Горбунов, Н.Б. Иванова, Н.А. Лоншаков, Я.В. Белов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 174-184.
12. Дементьев, Б.А. Ядерные энергетические реакторы. – Москва : Энергоатомиздат, 1990.
13. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – Москва : Наука, 1974.

REFERENCES

- [1] O materialah dlya obolochek tvel reaktorov s vodnym teplonositelem sverhkriticheskogo davleniya [Materials for Fuel Element Cladding of Reactors with Supercritical Water Coolant] / Sklyarenko V.A., Zubkov A.G., Zorin V.M., Anikeev A.V. // Novoe v rossijskoj elektroenergetike [New in the Russian Electric Power Industry]. – 2019. – №8. – pp. 33-42 (in Russian).
- [2] Zorin V.M., Ustyuhina I.V., Besova A.V. Energeticheskij balans i pokazateli teplovoj ekonomichnosti energobloka atomnoj elektricheskoy stancii [Energy Balance and Indicators of Thermal Efficiency of Power Unit of Nuclear Power Plant] // Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI [Moscow Power Engineering Institute Bulletin]. 2020. № 2. pp. 34-41 (in Russian).
- [3] Kartashov K.V. Pokanal'nyj teplogidravlicheskiy raschet aktivnoj zony reaktora VVER-SKD 30 MVt (tepl.) pri nominal'nyh rezhimakh raboty [Channel-by-Channel Thermohydraulic Calculation of the 30 MW (th) WVER-SKD Reactor Core at Nominal Operating Modes] // Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: YAderno-reaktornye konstanty. [Issues of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Reactor Constants] – 2016. – № 3. – pp. 127-131 (in Russian).
- [4] Jian Li. Materials Selection for the Canadian Supercritical Water-Cooled Nuclear Reactor Concept // JOM. 2016. V. 68. № 2. (in English)
- [5] Ganey I.H. Fizika i raschet reaktora [Physics and Calculation of the Reactor]. -Moscow: Energoizdat, 1991. -368 p. (in Russian).
- [6] Kolpakov G.N., Selivanikova O.V. Konstrukcii tvelov, kanalov i aktivnykh zon energeticheskikh reaktorov [Designs of Fuel Elements, Channels and Cores of Power Reactors]. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University], 2009. – 118 p. (in Russian).
- [7] Kirillov P.L., Bogoslovskaya G.P. Teplomassoobmen v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh [Heat and Mass Transfer in Nuclear Power Plants]. Moscow: Energoatomizdat, 2000. – 456 p. (in Russian).
- [8] Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., YUr'ev V.S. Spravochnik po teplogidravlicheskim processam v yadernoj energetike, t.2 [Handbook on Thermohydraulic Processes in Nuclear Power, vol. 2]. - M.: Izdat. 2010 (in Russian).
- [9] Semenov V.K., Vol'man M.A. Obosnovanie matematicheskoy modeli teploobmena dlya reaktora s sosredotochennymi parametrami [Substantiation of Mathematical Model of Heat Transfer for a Reactor with Lumped Parameters] // Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. – No4 (17), 2015. – pp. 35–42 (in Russian).
- [10] Gorbunov V.A., Andrianov S.G., Konoval'ceva S.S. Ocenka vliyaniya radiacionnogo teploobmena na parametry temperaturnykh polej tvelov razlichnogo konstruktivnogo ispolneniya [Assessment of the Influence of Radiation Heat Transfer on the Parameters of the Temperature Fields of Fuel Elements of Various Designs]. // Vestnik IGEU [ISUE Bulletin]. – 2021. – Vyp. 2. – pp. 23-31 (in Russian).
- [11] Razrabotka modeli po opredeleniyu temperaturnogo polya tvela v dvumernoj postanovke zadachi [Development of a Model for Determining the Temperature Field of a Fuel Element in a Two-Dimensional Formulation of Problem] / V.A. Gorbunov, N.B. Ivanova, N.A. Lonshakov, YA.V. Belov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. YAdernaya energetika [News of Higher Educational Institutions. Nuclear Energy]. - 2019. - № 2. - pp. 174-184 (in Russian).
- [12] Dementev B.A. Yadernye energeticheskie reaktory [Nuclear Power Reactors].-Moscow: Energoatomizdat, 1990 (in Russian).
- [13] Shlihting G. Teoriya pogranichnogo sloya [Theory of Boundary Layer]. – Moscow: Nauka, 1974 (in Russian).

Evaluation of Radiant Heat Transfer Influence on the Temperature Field of Fuel Element Microcell of Pressurized Water-Cooled Nuclear Reactor

V.K. Semenov¹, N.B. Ivanova², M.A. Volman³, A.A. Belyakov⁴

Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin, Rabfakovskaya St., 34, Ivanovo, Russia 153003

¹*ORCID iD: 0000-0001-9765-2096*

WoS Researcher ID: T-1066-2017

e-mail: semenov_vk@mail.ru

²*ORCID iD: 000-002-9519-6047*

WoS Researcher ID: AAU-285-2021

e-mail: rgr_ivanova@rambler.ru

³*ORCID iD: 0000-0001-6805-6287*

WoS Researcher ID: M-1304-2018

e-mail: maria_volman@mail.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0003-4374-3077*

WoS Researcher ID: S-7878-2017

e-mail: bel.aes@ya.ru

Abstract – Optimization of the core composition of the pressurized water reactors is associated with the calculation of the temperature fields of heat exchange microcells containing separate fuel elements. Taking into account the radiation-conductive heat transfer inside the fuel element is based on the statement that the helium gap between the column of fuel pellets and the wall of the fuel element has the properties of a black body. This is not true as helium is a monatomic gas, it neither absorbs nor emits, i.e. transparent to heat radiation. The article substantiates the physical and mathematical model of a microcell of a fuel element of a pressurized water-cooled nuclear reactor, taking into account radiation heat transfer. The model takes into account that helium is transparent to thermal radiation, and the fuel element is cooled by a flow-through system of the coolant. The implementation of the model is carried out analytically using the Karman-Pohlhausen integral relations method. The temperature fields of the column of fuel pellets and the coolant channel are calculated, the temperatures of the side surfaces of the cell are determined, and the effect of radiation heat transfer on the temperature distribution in the cell is estimated.

Keywords: fuel element microcell, temperature field, Karman-Pohlhausen method, complex conductive-radiative heat transfer, temperature drop on the fuel element wall, coolant mass average temperature.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК : 621.039.517 : 621.039.519

**ПРОВЕРКА ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОДА МОНТЕ-КАРЛО
OPENMC С ПОМОЩЬЮ КОДА UNK ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ
ТВС ВВЭР-1200**

© 2021 Х.А. Танащ, Д.А. Соловьёв, В.Г. Зимин, А.А. Семенов, Н.В. Щукин,
А.З. Альхмуд, Б. Джарум, А. И. Аль-Шамайлах

Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия

Новый код Монте-Карло под названием OpenMC был разработан Массачусетским технологическим институтом. В данной работе рассматривается проверка детерминированного транспортного кода решетки реактора OpenMC для различных типов тепловыделяющих сборок ВВЭР 1200. Трехмерная полная модель с обогащением по ^{235}U урана 4,95%, 4,0% и 1,3% построена с использованием кода Монте-Карло для переноса частиц OpenMC. Значения эффективного коэффициента умножения (k_{eff}) для свежего топлива с двумя конфигурациями топлива и конца жизненного цикла (EOL) выполнены для трех типов ТВС с разным обогащением и выполнены для каждого из девяти случаев; результаты показывают согласование с двумя другими кодами (Serpent и UNK). Значения интегральных параметров, рассчитанные OpenMC, сравнивались с кодом UNK, результат коэффициента диффузии показывает большое относительное отличие от UNK, поскольку метод кумулятивной миграции не реализован в коде OpenMC.

Ключевые слова: код Монте-Карло для переноса частиц OpenMC, ВВЭР-1200, эффективный коэффициент умножения, интегральные параметры.

Поступила в редакцию 13.07.2021
После доработки 03.09.2021
Принята к печати 07.09.2021

Introduction

The commissioning of VVER-1200 was one of the most important events in the nuclear power industry of Russia and the whole world [1]. The VVER technology [2] undoubtedly played a decisive role in the key stages of the formation and development of nuclear power in the Soviet Union and Russia. Different fuel assemblies of a VVER-1200 reactor indicated the calculation of this problem in order to compare the consistency of the reactor physics constant. Recently, many studies discussed this characteristic of reactor to validate reactor physics and neutronics by use several simulation code with different nuclear data libraries [3]. In this work, we use OpenMC Monte Carlo simulation platform, which was developed in 2011 by the Computational Reactor Physics Group members at the Massachusetts Institute of Technology (MIT) [4].

The initial work on OpenMC has focused on criticality calculations as applied to the simulation of nuclear reactors. The platform has its powerful from the huge numbers of tallies efficiently (reaction rate, fission, flux, etc.) that available to the user with progressing plotting to track geometry and post-processing the data. This continuous development makes OpenMC capable to design arbitrary complex geometric objects with advance plotting/post-processing. In the last decade, many studies for calculation of reactor physics and simulation of particle transport in reactor were performed using OpenMC Monte Carlo, because of its high performance and simply extensible for research purposes, In addition to its accuracy for neutron calculation and the ability of simulating 3D models using a constructive solid geometry representation. OpenMC uses data of particle interaction on HDF5 format, which

can be generated from the ACE or ENDF/B format as in the MCNP [5] and Serpent Monte Carlo platform.

2 VVER-1200 Reactor

VVER reactors are undoubtedly one of the most important pressurized water reactors, which played a decisive role in key stages of the formation and development of nuclear power in the Soviet Union and Russia. All of its kind power units based on VVER technology [1]. The core of a VVER-1200 reactor assembled from 163 hexagonal fuel assemblies, close by design for fuel assemblies of a VVER-1000 reactor. The power frame of the fuel assembly is formed by 18 guide channels and 13 spacer grids welded to them. Each fuel assembly contains 312 fuel rod elements, located with spacers at the corners of a uniform triangular mesh, as shown in Fig. 1. The fuel is enriched uranium dioxide isotope uranium-235. Uranium enrichment is constant along the fuel rod height. Average enrichment fuel FA does not exceed 4.95%. With such fuel enrichment, one fuel assembly subcritical in cold water without boron taking into accounts the calculation error. In fuel loads presented in the work use fuel elements with fuel enrichment U-235 equal to 1.3%, 4.0% and 4.95%. Where the basic characteristics of the core VVER-1200 shown in Table 1.

3 Material and methods

In this work, VVER-1200 fuel assemblies have been used to analyse and the simulation was generated. Three-dimensional fuel assembly model was built using the design specifications data of the VVER-1200. Reactor analysis was performed at three enrichments 1.3%, 4%, and 4.95%. In addition, two states of the fuel life configuration: fresh and end of lifecycle were also taken into account for different enrichment.

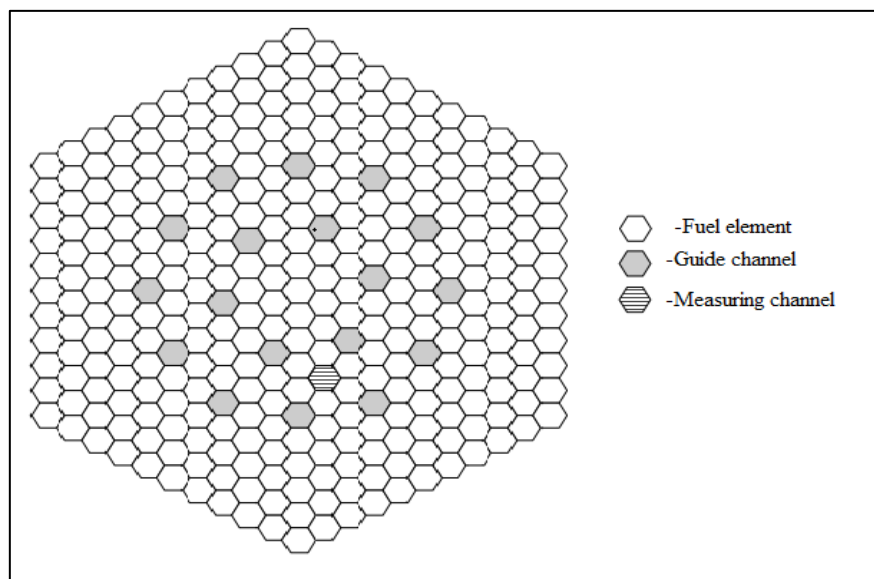


Figure 1– Cartogram fuel assemblies Z13, Z40, and Z49 of the reactor VVER-1200

In this study, we used OpenMC Monte Carlo simulation platform, the simulation platform is supported by the Python programming language, which make it conforming to perform and having the contemporaneous standard rather than a complex language like FORTRAN. This Monte Carlo simulation code focused criticality on neutron calculations and particle transport calculation. The simulation platform OpenMC uses 3D models that depend on constructive solid geometry representation with second-order surfaces. OpenMC can represent any closed volume as the union, intersection, and/or difference of multiple half-spaces. This allows to design all available geometry surfaces of nuclear reactor. All input user files in OpenMC platform uses Extensible Markup Language (XML), which make it very easy to examine the input file and get the determined data from output file.

The cross section treatments in OpenMC support in tow energy modes (continuous-energy and multi-group), for continuous energy particle interaction data, native HDF5 format is utilized by OpenMC that can be created from ACE and ENDF/B files like the MCNP and Serpent Monte Carlo codes. As most Monte Carlo codes OpenMC can create the HDF5 files data with the NJOY. In this study was used ENDF/B-VII.1 version for nuclear material cross-sectional data by The National Nuclear Data Centre (NNDC). The version of OpenMC used in this study was 0.12.0. A three-dimensional geometric model of the fuel assembly (FA) of VVER-1200 reactor was designed to do our neutronic calculations. Using Python package gives the user more flexibility to generate plots and in data post-processing and enables us to simply manipulate of the HDF5 data. In our work the reading of criticality calculation was taken for 50000 particles with 100 batches and 50 inactive batches, all the reactions rates are obtained with relative statistical errors in the average of 0.005%. The source space was treated as a box with dimensions 37 cm -37 cm in X- axis, 35 cm -35 cm in Y-axis and 187 to -187 in Z-axis direction.

Table 1 – Main characteristics of the VVER-1200 core.

Parameter name	Value
Reactor thermal power (nominal), MW.	3200
Number of fuel assemblies in the core.	163
Number of fuel rods in fuel assembly.	312
Pitch between fuel elements, mm.	12.75
Fuel height, nominal, mm.	3730
Outer diameter of the fuel element cladding, mm.	9.10
Inner diameter of the fuel element cladding, mm.	7.73
Clad material.	Alloy E110
Fuel material.	UO ₂
fuel mass (UO ₂) in a fuel element (nominal), kg.	1.71
Outer diameter of the fuel element , mm.	7.6
Number of guide channel.	18
Outer diameter of guide channel, mm.	12.9
Inner diameter of guide channel, mm.	11.0

Serpent is three-dimensional continuous-energy Monte Carlo particle transport code, developed by the VTT Technical Research Center of Finland. Serpent uses ACE cross-sectional libraries based on the converted JEFF-2.2, JEFF-3.1, JEFF-3.1.1, ENDF/B-VI.8 and ENDF/B-VII evaluated nuclear data files. ACE is a special format for presenting data from various libraries of cross sections for the interaction of neutrons with nuclei in the epithermal energy range. Data are available for 432 nuclides at 6 temperatures from 300 to 1800 K. While the UNK program is intended for calculating the neutronic characteristics of cells and fuel assemblies of various types of nuclear reactors. The nuclear data library of the program includes about 300 isotopes and was calculated using the NJOY program from the evaluated data files ENDF / B-VI, JEFF-2.2 and JENDL-3.2. The main energy grid includes 89 groups: 24 groups in the region of deceleration to 2.15 eV and 65 thermal groups. The integral equation of neutron transport in the transport approximation is solved by the method of the probability of the first collisions (ITF). Matrices of the IPM method are calculated analytically in the case of one-dimensional geometry, for complex geometry matrices are determined by numerical integration using the method of characteristics.

4Discussion of results

In this study three-dimensional FA model was built by OpenMC to perform the calculations reactor physics parameters. The simulation calculation runs in the OpenMC was taken for 50000 particles with 100 batches and 50 inactive batches. The values of multiplication factor K_{eff} was calculated for FA with three different enrichments at three

different cods (OpenMC, Serpent, UNK), after that we analyzed the value of Integral parameters, that getting in OpenMC with other code UNK.

4.1 Validation OpenMC code

The values of multiplication factor K_{eff} was calculated at three different enrichment shown in Table 2, the calculation was performed under a hot state condition ($T_f=1027$ K, $T_c=575$ K, without boric acid, density of water= 0.7235 g/cm³), the results of OpenMC are compared with two differences codes Serpent [6] and UNK [7]. The results show good agreements with each other as shown in Table 3, while the slightly difference refer to the different in the nuclear data libraries which used and to the computational method of each codes. In this study, we used ENDF/B-VII.1 nuclear cross-sectional data for OpenMC and Serpent.

At the same hot state condition, the values of the K_{eff} versus burnup for Z40, TVS obtained by three codes are presented in Figure 2.

Table 2 – Critically calculation of K_{eff} for VVER-1200 FA, with three different enrichment, for fresh fuel and end life of cycle

		OpenMC	Serpent	UNK
1.30%	Fresh fuel	1.08370+/-0.00060	1.08416 +/- 0.00033	1.07752
	EOL	1.00128+/-0.00062	1.00720 +/- 0.00035	1.00526
	CR(B ₄ C)	0.74788 +/- 0.0005	0.74807 +/- 0.00045	0.72773
4.00%	Fresh fuel	1.37029+/-0.00104	1.37124 +/- 0.00030	1.37711
	EOL	1.014981+/-0.00064	0.99951 +/- 0.00045	1.00270
	CR(B ₄ C)	1.05514 +/- 0.00066	1.05647 +/- 0.00054	1.05667
4.95%	Fresh fuel	1.40444 +/- 0.00114	1.40622 +/- 0.0004	1.41594
	EOL	1.014981+/-0.00064	0.98261 +/- 0.00050	1.00589
	CR(B ₄ C)	1.10314 +/- 0.00062	1.10396 +/- 0.00055	1.10685

Table 3 – Mean deviation between OpenMC-UNK and OpenMC-Serpent for three cases

		Fresh fuel	CR(B ₄ C)	End of life
Mean deviation %	OpenMC-UNK	0.628	1.058	1.110
	OpenMC-Serpent	0.0795	0.075	0.172
Maximum deviation %	OpenMC-UNK	0.819	2.694	1.226
	OpenMC-Serpent	0.126	0.126	0.364
Standard deviation	OpenMC-UNK	0.168	1.419	0.186
	OpenMC-Serpent	0.043	0.050	0.174

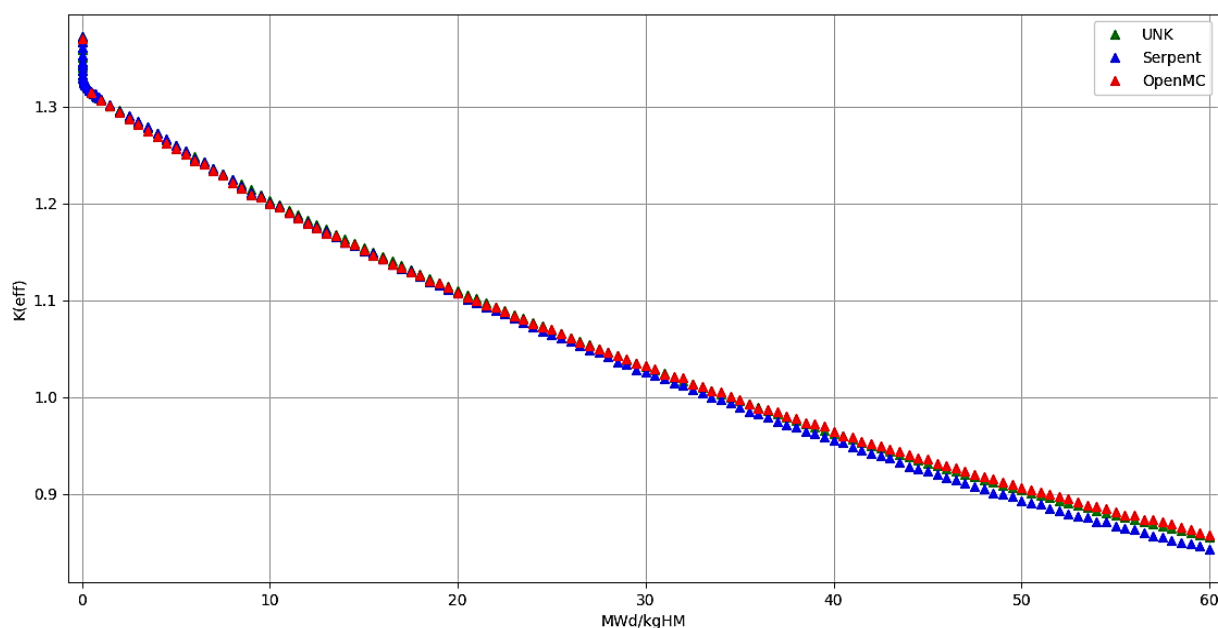


Figure 2 – K_{eff} versus burnup for Z40 TVS

4.2 Integral parameters calculations

The values of the reactor parameters were computed by OpenMC code, diffusion coefficient D , absorption Σ_a , fission Σ_f and nu-fission Σ_{nf} macro cross-sections, at hot state condition ($T_f=1027$ K, $T_c=575$ K, without boric acid, density of water= 0.7235 g/cm³) and without control rods for 2-group energy, after that these value were compared by the values which getting in UNK code as shown in table 4. The thermal cutoff energy in our calculations is set to 2.15 eV. For both codes neutron cross sections are processed based on the ENDF/B-VII.1 evaluated data file.

Table 4 – Integral parameters calculated by UNK and OpenMC for VVER-1200 TVS

TVS	Code	Integral parameter							
		D_1 (cm)	D_2 (cm)	Σ_{a1} (cm ⁻¹)	Σ_{a2} (cm ⁻¹)	Σ_{nf1} (cm ⁻¹)	Σ_{nf2} (cm ⁻¹)	Σ_{f1} (cm ⁻¹)	Σ_{f2} (cm ⁻¹)
Z13	OpenMC	1.0681E+00	3.9318E-01	9.1617E-03	4.7799E-02	4.3758E-03	6.6159E-02	1.6628E-03	2.7151E-02
	UNK	0.6694E+00	2.6856E+00	7.8367E-03	4.1058E-02	3.7085E-03	5.4766E-02	1.4047E-03	2.2486E-02
Z40	OpenMC	1.0729E+00	4.0859E-01	1.1035E-02	9.0612E-02	7.8921E-03	1.6008E-01	3.0969E-03	6.5697E-02
	UNK	0.6813E+00	2.6028E+00	0.9555E-02	7.8606E-02	6.7714E-03	1.3690E-01	2.6524E-03	5.6274E-02
Z49	OpenMC	1.0705E+00	4.1147E-01	1.1575E-02	1.0280E-01	9.0033E-03	1.8646E-01	3.5514E-03	7.6524E-02
	UNK	0.6814E+00	2.5877E+00	1.0037E-02	0.8860E-01	7.7316E-03	1.5878E-01	3.0454E-03	3.04544E-03

In the comparison of the values of Integral parameters, which calculated by OpenMC to UNK code for fuel assembly Z40, it is showing good agreement except for the values of the diffusion coefficient. The maximum relative difference from UNK was 0.843 % for the fast group diffusion coefficient these large values of relative difference because the cumulative migration method is not implemented into OpenMC code until now, while the relative difference for other parameters was not more than 2%. OpenMC and other Monte Carlo codes used B_1 equations to tally micro-group cross sections, these equations are solved for a critical spectrum, which is used to recondense the cross sections into leakage-corrected few-group constants. While generating micro-group cross sections need more tallying and computation work, so diffusion coefficients cannot be tallied directly into the desired group structure. This is one of the main challenges in the implementation of Monte Carlo codes; an accurate theory for computing diffusion coefficients and transport cross sections is yet to be implemented, more details you can see in this paper [8].

Table 5 – The relative difference from UNK = $[(\text{OpenMC} - \text{UNK})/\text{UNK}] \times 100$ in %, for Z40

D_1	D_2	Σ_{a1}	Σ_{a2}	Σ_{nf1}	Σ_{nf2}	Σ_{f1}	Σ_{f2}
0.575	0.843	0.155	0.153	0.166	0.169	0.168	0.167

4 Conclusions

The importance of this work lies in studying. The VVER-1200 benchmark problems were chosen for this work, based on requirements technical specifications and requirements of regulatory documents in Russian Federation, and experience in the design and operation of VVER reactors in Russia. In our calculation, we used OpenMC Monte Carlo simulation platform, which is a powerful simulation platform for analyzing integral parameters of nuclear reactors using continuous energy cross-section data provided by the NNDC.

The aspects of this study with different enrichments of the fuel assembly of VVER 1200 reactor were compared and verified the values of multiplication factor [9], which calculated in this OpenMC simulation with two codes (Serpent and UNK) and showed reasonable agreement with each other. The integral parameters show no significant differences between UNK and OpenMC except for the value of the diffusion coefficient. This reflects that the benchmark models developed by the OpenMC code was good in predicting the integral parameters of light water reactors, while the slight difference between the other parameters are due to the different solution methods of each code with its associated nuclear data.

Therefore, Monte Carlo code OpenMC is a reliable neutronic code to make calculation scheme and nuclear data for further neutronic analysis.

REFERENCES

- [1] V. G. Asmolov, I. N. Gusev, V. R. Kazanskiy, V. P. Povarov, and D. B. Statsura, "New generation first-of-the kind unit – VVER-1200 design features," *Nucl. Energy Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 260–269, Dec. 2017.
- [2] S. B. Ryzhov *et al.*, "VVER-Type Reactors of Russian Design," in *Handbook of Nuclear Engineering*, Springer US, 2010, pp. 2249–2320.
- [3] S. Dawahra, K. Khattab, and G. Saba, "Study the effects of different reflector types on the neutronic parameters of the 10 MW MTR reactor using the MCNP4C code," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 85, pp. 1115–1118, Apr. 2015.
- [4] P. K. Romano, N. E. Horelik, B. R. Herman, A. G. Nelson, B. Forget, and K. Smith, "OpenMC: A State-of-the-Art Monte Carlo Code for Research and Development," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 82, pp. 90–97, 2015.
- [5] E. Breismeister, J.F., "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," Los Alamos, 1997.
- [6] J. Leppänen., *Serpent – a Continuous-energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code*. VTT Technical Research Centre of Finland, 2015.
- [7] В. Ф. Цибульский, В.Ф. Давиденко, "UNK программа детального расчета спектра в элементарной ячейке реактора," *Нейтроника-97*, 2008.
- [8] J. O. Zhaoyuan Liu a, Kord Smith a, Benoit Forget a, "Cumulative migration method for computing rigorous diffusion coefficients and transport cross sections from Monte Carlo," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 112, pp. 507–516, 2018.
- [9] C. K. S. and M. S. M, "Burnup dependent Monte Carlo neutron physics calculations of IAEA MTR benchmark," *Prog.Nucl.Energy*, vol. 81, pp. 43–52, 2015.

Validation of the Physical Parameters of Monte Carlo Code Openmc by Unk Code for Different VVER 1200 Fuel Assemblies

**H.A. Tanash¹, D.A.Solovyev², V.G.Zimin³, A.A.Semenov⁴, N.V. Schukin⁵,
B. Djaroum⁶, A.I. Al-Shamayleh⁷**

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

¹ORCID iD: 0000-0002-7831-8516

e-mail: tanash_hamza@yahoo.com

²ORCID iD: 0000-0002-0507-0839

e-mail: vulture@inbox.ru

³ORCID iD: 0000-0002-0334-3741

e-mail: vgzimin@mail.ru

⁴ORCID iD: 0000-0002-5495-3662

e-mail: dozaand@mail.ru

⁵ORCID iD: 0000-0002-4228-7228

e-mail: pikenv@gmail.com

⁶ORCID iD: 0000-0002-1862-8838

e-mail: bel.djar111215@gmail.com

⁷ORCID iD: 0000-0002-7831-8516

e-mail: tanash_hamza@yahoo.com

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.311.25:621.039.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА ТРУБОПРОВОДОВ И МОНИТОРИНГ ЕГО РАЗВИТИЯ НА ОСНОВЕ МАГНИТОАНИЗОТРОПНОГО МЕТОДА

© 2021 А.К. Адаменков*, И.Н. Веселова**

**АО ИК «АСЭ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

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

В рамках проведения экспериментальной оценки напряженно-деформированного состояния элементов трубопроводов АЭС с помощью приборов на основе магнитоанизотропного метода, были получены и оценены изменения толщины стенки локального участка образца трубопровода и величины разности главных механических напряжений (РГМН). Выполненный анализ изменения данных, характеризующих напряженно-деформированное состояние (НДС), таких как: РГМН, первая частная производная РГМН по кольцевой образующей образца, модуль градиента РГМН, указывает на наличие трех зон, характеризующих различное НДС исследуемой области натурного образца трубопровода в течение проведения эксперимента по мере утонения локальной зоны.

Ключевые слова: метод магнитоанизотропии, разность главных механических напряжений (РГМН), локальные участки, модуль градиента РГМН, цикличность нагружения, стенд для испытаний.

Поступила в редакцию 05.07.2021

После доработки 08.07.2021

Принята к печати 19.07.2021

Безопасность, надежность, экономичность эксплуатации АЭС в значительной степени зависят от надежного функционирования теплообменного оборудования и трубопроводов конденсатно-питательного тракта. Технологические системы конденсатно-питательного тракта АЭС имеют значительную протяженность, сложную конфигурацию и работают в условиях, при которых основным видом дефектов металла трубопроводов и теплообменного оборудования, изготовленных из углеродистой стали, является эрозионно-коррозионный износ (ЭКИ).

Анализ результатов контроля состояния металла показывает существенную неравномерность эрозионно-коррозионного износа трубопроводов и оборудования, который зависит от большого числа факторов. Знание механизма эрозионно-коррозионного износа, его зависимости от физико-химических свойств металла, геометрических характеристик, эксплуатационных режимов позволит на стадии эксплуатации АЭС оптимизировать объемы эксплуатационного контроля, уменьшить количество отказов оборудования и внеплановых остановов энергоблоков.

В настоящее время на АЭС России для контроля развития ЭКИ реализуется типовая программа «Контроль состояния основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций с реакторной установкой ВВЭР-1000 в проектном сроке эксплуатации» [1]. Основное содержание мероприятий указанной программы – периодический контроль толщины предварительно определенных участков (гибы, тройники и т.п.) трубопроводов [2]. Но выполнение данных мероприятий сопряжено с двумя аспектами:

1. Измерение толщины требует выполнения трудоемких подготовительных мероприятий на контролируемых участках.

2. Анализа данных эксплуатационного контроля показывает, что для определенного количества элементов (до 30 % по объему) минимальные толщины стенок равны или превышают значения номинальных толщин. Рассчитать скорость ЭКИ и длительность эксплуатации трубопроводов с минимальными толщинами стенок равными или меньшими номинальных толщин с использованием номинальных толщин не представляется возможным и для этих целей принимаются средние значения толщин [3].

Для оценки возможности определения уровня эксплуатационной надежности трубопроводов в части подверженности ЭКИ альтернативным методом магнитной анизотропии [4-6] был выполнен натурный эксперимент, имитирующий постепенное локальное утонение стенки трубопровода по механизму развития ЭКИ, на стенде для пневматических и гидравлических испытаний и настройки предохранительных клапанов с использованием сканера механических напряжений «STRESSVISION» Expert [7] и УЗ толщиномера.

В качестве натурального образца был использован элемент трубопровода, состоящий из трех деталей: корпус, заглушка и фланец, которые были соединены между собой с использованием сварки. Сварку производили сплошным швом по контуру прилегания деталей. Сварку выполняли в среде углекислого газа сварочной проволокой Св-08Г2С по ГОСТ 2246–70. Параметры натурального образца приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика деталей трубного образца [Characteristics of pipe sample parts]

Наименование детали	Маркировка	Размеры			Масса, кг
		Диаметр, мм	Длина, мм	Толщина, мм	
Корпус	159×6 ГОСТ 8732–78 Б 20 ГОСТ 8731–87	159	502	6	11,3
Заглушка	6 ГОСТ 19903–2012 Ст3пс ГОСТ 14637–89	152	–	6	3,7
Кольцо	8 ГОСТ 19903–2015 Ст3пс ГОСТ 14637–89	160×219	–	6	0,8

Перед испытаниями на образец была нанесена координатная сетка, с шагом 20х20 мм (рис. 1).



Рисунок 1 – Фотография опытного образца с координатной сеткой на стенде
[Photo of a prototype with a grid on the stand]

Эксперимент проводился по следующему алгоритму:

1 шаг – с помощью сканера механических напряжений «Stressvision» выполнялась оценка напряженного состояния образца по углам координатной сетки. С помощью ультразвукового толщиномера Transport по этим же углам сетки производилось измерение толщины стенки элемента трубопровода.

2 шаг – образец устанавливался на стенд (рис. 1) подвергался нагружению давлением 2 МПа. После выдержки (двое-трое суток) осуществлялся сброс давления.

3 шаг – повторялись действия шага 1.

4 шаг – с помощью ручной шлифовальной машины выполнялась выборка толщины внутреннего слоя локального участка трубы в зоне разметки.

5 шаг – выполнялись действия шага 2.

6 шаг – выборка толщины, как указано в шаге 4.

Действия алгоритма повторялись до тех пор, пока визуально не было зарегистрировано изменение геометрии наружной поверхности участка трубы в зоне выборки толщины стенки (выпуклость). Всего было выполнено 29 циклов нагружения/разгрузки с выборкой толщины. Все результаты измерений сохранялись в памяти приборов для последующей обработки.

В ходе выполнения эксперимента зарегистрированы следующие основные параметры, фрагмент которых представлен в таблице 2. В таблице использованы следующие сокращения: РГМН – разность главных механических напряжений, dX – первая частная производная РГМН по кольцевой образующей образца, GRAD – модуль градиента РГМН [8], ТОЛЩ – толщина стенки участка трубы в месте выборки.

Таблица 2 – Основные параметры [Main settings]

№ опыта	1	2	3	...	27	28	29
РГМН	-9,8	-4,49	-5,13	...	-55,78	-34,68	-27,6
dX	0,2	0,03	-0,08	...	0,83	0,17	0,2
GRAD	2,9	1,62	2,17	...	4,9	4,12	3,7
ТОЛЩ	7,37	6,421	6,421	...	1,99	1,85	1,65

По результатам экспериментов (см. табл. 1) построены кривые, отражающие изменения параметров, часть из которых представлена на рисунке 2, где горизонтальная ось – номер опыта, а вертикальная – изменение толщины (а), изменение значения РГМН (б).

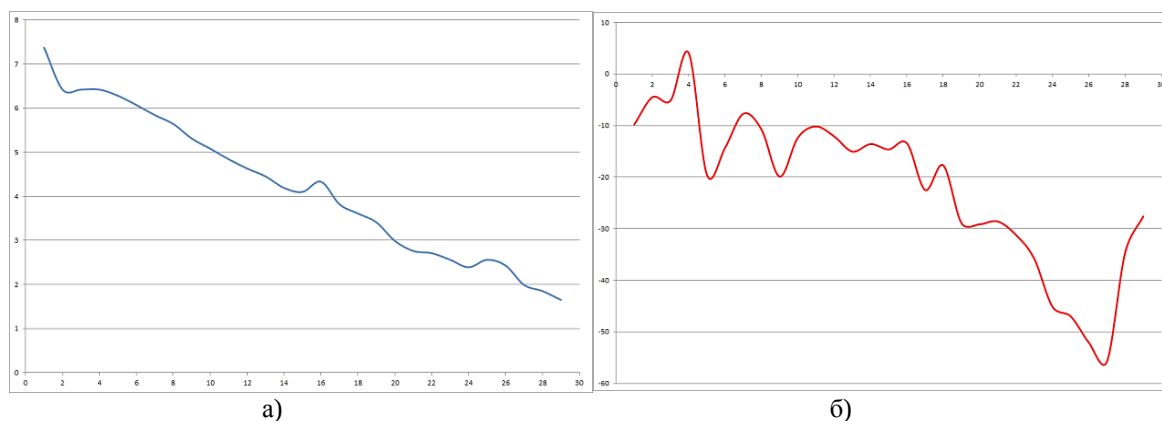


Рисунок 2 – Изменения параметров натурного образца в ходе эксперимента: а) изменение толщины стенки; б) изменение значения РГМН [Changes in the parameters of a full-scale sample during the experiment: а) change in the wall thickness; б) change in the value of the main mechanical stresses]

Предварительный графический анализ изменения нормализованных данных указывает на наличие, по мере утонения локальной области натурального образца, трех зон, характеризующих различное напряженно-деформированное состояние (НДС) [9-11] исследуемой области натурального образца трубопровода в течение проведения эксперимента по мере уменьшения толщины стенки (рис. 3).

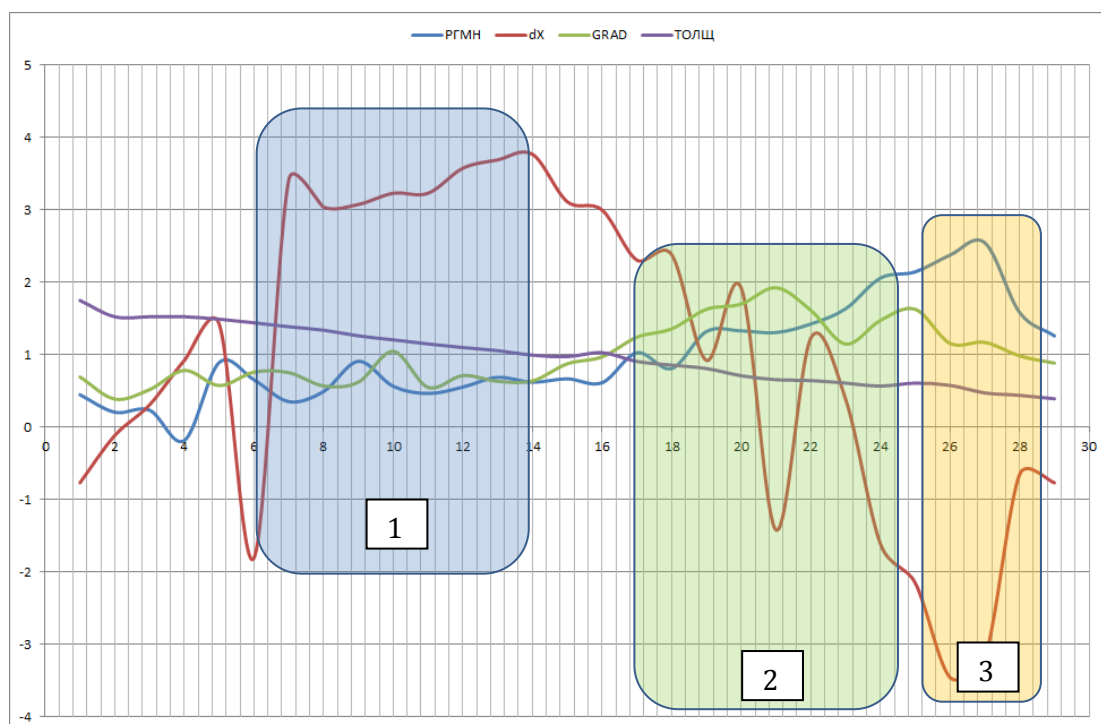


Рисунок 3 – График изменения нормализованных значений параметров, характеризующих напряженное состояние исследуемой зоны, в ходе проведения эксперимента: 1, 2, 3 – зоны различного характера изменений параметров [The graph of the change in the normalized values of the parameters characterizing the stressed state of the investigated zone during the experiment: 1, 2, 3 - zones of different character of parameter changes]

Зона 1. Область, в которой по мере уменьшения толщины (до 45% в абсолютном значении), изменения НДС материала практически не фиксируется.

Зона 2. При уменьшении толщины стенки в области выборки (более чем на 50%), происходит перераспределение напряжений, характеризующее начало пластической деформации участка [12].

Зона 3. Область, определяющая визуально фиксируемую пластическую деформацию участка образца трубопровода. При уменьшении толщины (до 7% от начальной), эксперимент был прекращен в связи с вероятным аварийным разрушением образца.

Выводы:

В ходе выполнения эксперимента продемонстрирована возможность мониторинга развития ЭКИ трубопроводов с помощью регулярного (периодического) обследования их потенциально опасных участков методом магнитной анизотропии.

При этом никакой предварительной подготовки обследуемого участка не требуется. Оценка РГМН и других параметров с помощью сканера механических напряжений возможна не только в период проведения ремонтных работ, но и в режиме «энергоблок на мощности».

Дальнейшая обработка полученных в ходе испытаний данных, позволит определить критерии, характеризующие эксплуатационную надежность трубопроводов [13], в части подверженности ЭКИ, в соответствии с действующей НТД [1, 2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *ТПРГ 1.1.3.09.1515-2018*. Контроль состояния основного металла, сварных соединений и наплавленных поверхностей оборудования, трубопроводов и других элементов атомных станций с реакторной установкой ВВЭР-1000 в проектном сроке эксплуатации. Типовая программа. Введена в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 16.01.2019 №9/44-П. Разработана Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»). – Москва : Акционерное общество «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2018.
2. *РД ЭО 1.1.2.11.0571-2015* «Нормы допускаемых толщин стенок элементов трубопроводов из углеродистых сталей при эрозионно-коррозионном износе». Руководящий документ. Введен в действие приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 06.08.2015 №9/876-П. Разработан Акционерным обществом «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (АО «ВНИИАЭС»). – Москва : Акционерное общество «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях», 2015.
3. *Бараненко, В.И.* О разработке нормативной документации по эрозионно-коррозионному износу для энергоблоков АЭС [Электронный ресурс] / В.И. Бараненко, Ю.А. Янченко, О.М. Гулина [и др.]. – URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/documents/sgpg2010-052.pdf>.
4. *Адаменков, А.К.* Оценка развития эрозионно-коррозионного износа с помощью метода измерения магнитной анизотропии / А.К. Адаменков, И.Н. Веселова, В.Я. Шпицер // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 1(30). – С. 113-119.
5. *SAKAI Yoshiaki, UNISHI Hiroyuki, YAHATA Teruo.* Non-destructive Method of Stress Evaluation in Linepipes Using Magnetic Anisotropy Sensor. JFE TECHNICAL REPORT No. 3 (July 2004).
6. *Ничипурук, А.П.* О возможности использования магнитных методов для оценки уровня одноосных пластических деформаций и остаточных напряжений в низкоуглеродистых сталях / Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Огнева М.С. [и др.]. // ИФМ УрО РАН. – Дефектоскопия. – 2015. – С. 201-207.
7. Патент № 2195636. Российская Федерация, МПК G01L1/12 (2006.01). Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления: № 2001106509/28 : заявл. 05.03.2001: опубл. 27.12.2002 / С.В. Жуков, В.С. Жуков, Н.Н. Копица. – 2 с.
8. *Новопашин, М.Д.* Градиентные критерии предельного состояния / М.Д. Новопашин, С.В. Сукнев // Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия. – 2007. – № 4(54). – С. 316-319.
9. *Александров, А.В.* Сопротивление материалов / А.В. Александров. – Москва: Высшая школа, 2003. – С. 380-383.
10. *Hosford, W.F.* Mechanical Behavior of Materials / W.F. Hosford. – New-York: Cambridge University Press, 2005. – 342 p.
11. *Матвиенко, Ю.Г.* Развитие моделей и критериев разрушения в современных проблемах прочности и живучести / Ю.Г. Матвиенко // Вестник научно-технического развития. – 2014. – №7(83). – С.48-51.
12. *Соснин, О.В.* К обоснованию энергетического варианта теории ползучести и длительной прочности металлов / О.В. Соснин, А.Ф. Никитенко, Б.В. Горев // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т.51. №4. – С.188-196.
13. *Никитин, В.Е.* Контроль остаточных сварочных напряжений с помощью магнитоанізотропного метода после применения ультразвуковой ударной обработки / В.Е. Никитин, Я.И. Евстратикова // Наука и техника. Сварка и диагностика. – 2019. – №4. – С. 38-42.

REFERENCES

- [1] TPRG 1.1.3.09.1515-2018. Kontrol sostoyaniya osnovnogo metalla, svarnykh soedinenii i naplavlennyykh poverkhnostei oborudovaniya, truboprovodov i drugikh elementov atomnykh stantsii s reaktornoй установкой VVER-1000 v proektnom sroке ekspluatatsii. Tipovaya programma. Vvedena v deistvie prikazom AO «Kontsern Rosenergoatom» ot 16.01.2019 №9/44-P. Razrabotana Aktsionernym obshchestvom «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po ekspluatatsii atomnykh elektrostantsii» (AO «VNIIAES») [TPRG 1.1.3.09.1515-2018. Monitoring the Condition of the Base Metal, Welded Joints and Weld-On Surfaces of Equipment, Pipelines and Other Elements of Nuclear Power Plants with a WWER-1000 Reactor in the Design Life. Typical Program. It was put into effect by order of Rosenergoatom Concern JSC dated January 16, 2019 No. 9/44-P. Developed by the All-Russian Scientific Research Institute for the Operation of Nuclear

- Power Plants Joint Stock Company (VNIIAES JSC)]. Moskva. Aktsionernoe obshchestvo «Rossiiskii kontsern po proizvodstvu elektricheskoi i teplovoi energii na atomnykh stantsiyakh» [Moscow: Joint Stock Company «Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants»]. 2018 (in Russian).
- [2] RD EO 1.1.2.11.0571-2015 «Normy dopuskaemykh tolshchin stenok elementov truboprovodov iz uglerodistykh stalei pri erozionno-korroziionnom iznose». Rukovodyashchii document. Vveden v deistvie prikazom AO «Kontsern Rosenergoatom» ot 06.08.2015 №9/876-P. Razrabotan Aktsionernym obshchestvom «Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut po ekspluatatsii atomnykh elektrostantsii» (AO «VNIIAES») [RD EO 1.1.2.11.0571-2015 «Standards for Permissible Wall Thicknesses of Pipeline Elements Made of Carbon Steels During Erosion-Corrosive Wear». Guidance document. It was put into effect by order of Rosenergoatom Concern JSC dated 06.08.2015 No. 9/876-P. Developed by the Joint Stock Company All-Russian Scientific Research Institute for the Operation of Nuclear Power Plants (JSC VNIIAES)]. Moskva. Aktsionernoe obshchestvo «Rossiiskii kontsern po proizvodstvu elektricheskoi i teplovoi energii na atomnykh stantsiyakh» [Moscow: Joint Stock Company «Russian Concern for the Production of Electric and Thermal Energy at Nuclear Power Plants»]. 2015 (in Russian).
- [3] Baranenko V.I., Yanchenko U.A., Gulina O.M. O razrabotke normativnoi dokumentatsiii po erozionno-korroziionnomu iznosu dlya energoblokov AES [The Development of Regulatory Documentation on Erosion and Corrosion Wear for NPP Power Units]. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/seminar8/documents/sgpg2010-052.pdf> (in Russian).
- [4] Adamenkov A.K., Veselova I.N., Shpicer V.Y. Ocenka razvitiya erozionno-korroziionnogo iznosa s pomoshchiu metoda izmereniya magnitnoy anizotropii [Assessment of the Development of Erosion and Corrosion Wear Using the Method of Measuring Magnetic Anisotropy]. Globalnaya yadernaya bezopasnost [Global Nuclear Safety]. 2019. №1(30). P.113-119 (in Russian).
- [5] SAKAI Yoshiaki, UNISHI Hiroyuki, YAHATA Teruo. Non-destructive Method of Stress Evaluation in Linepipes Using Magnetic Anisotropy Sensor. JFE TECHNICAL REPORT No.3 (July 2004) (in English).
- [6] Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Ogneva M.S. O vozmozhnosti ispolzovaniya magnitnikh metodov dlya osienki urovnya odnoosnikh plasticheskikh deformatsiii i ostatochnikh napryazhenii v nizkouglerodistikh stalyakh [Possibility of Using Magnetic Methods to Assess the Level of Uniaxial Plastic Deformations and Residual Stresses in Low-Carbon Steels]. IFM UrO RAN. Defektoskopiya [IFM UrO RAN. Flaw Detection]. 2015. P.201-207 (in Russian).
- [7] Patent RF № 2195636. Russian Federation, MPK G01L1/12 (2006.01). Sposob opredeleniia mekhanicheskikh napriazhenii i ustroystvo dlia ego osushchestvleniia [Method for determining mechanical stresses and device for its implementation]. Zhukov S.V., Zhukov V.S., Kopitsa N.N. № 2001106509/28 : zayav 05.03.2001: opubl. 27.12.2002 (in Russian).
- [8] Novopashin M.D., Suknev S.V. Gradientnye kriterii predelnogo sostoiianiia [Gradient Criteria of the Limit State]. Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaia seriia [Bulletin of the Samara State University. Natural Science Series]. 2007. №4(54). P.316-319 (in Russian).
- [9] Aleksandrov A.V. Soprotivlenie materialov [Strength of Materials]. Moskva: Vysshay shkola [Moscow: High School]. 2003. P.380-383 (in Russian).
- [10] Hosford W.F. Mechanical Behavior of Materials. – New-York: Cambridge University Press, 2005. 342 p. (in English).
- [11] Matvienko U.G. Razvitie modelei i kriteriev razrusheniya v sovremennikh problemakh prochnosti i zhivuchesti [Development of Fracture Models and Criteria in Modern Problems of Strength and Survivability]. Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya [Bulletin of Scientific and Technical Development]. 2014. №7 (83). P.48-51 (in Russian).
- [12] Sosnin O.V., Nikitenko A.F., Gorev B.V. K obosnovaniyu energeticheskogo varianta teorii polzuchesti i dlitelnoi prochnosti metallov [Substantiate the Energy Version of the Theory of Creep and Long-Term Strength of Metals]. Prikladnaya mekhanika i tehnicheskaya fizika. [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2010. T.51. №4. P.188-196 (in Russian).
- [13] Nikitin V.E., Evstratikova Y.I. Kontrol ostatochnih svarochnih napryazhenii s pomoshchiu magnitoanizotropnogo metoda posle primeneniya ultrozvukovoi udarnoi obrabotki [Control of Residual Welding Stresses Using the Magnetic Anisotropic Method after the Application of Ultrasonic Shock Treatment]. Nauka i tekhnika. Svarka i diagnostika [Science and technology. Welding and Diagnostics]. 2019. №4. P.38-42 (in Russian).

Modeling of Erosion-Corrosion Wear of Pipelines and Monitoring of its Development Based on Magnetic Anisotropic Method

A.K. Adamenkov^{*1}, I.N. Veselova^{**2}

**AO EC «ASE», Volgodonsk, Rostov region, Russia*

***Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»*

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

¹ORCID iD: 0000-0001-7342-0231

WoS Researcher ID: O-1921-2018

e-mail: anri_61@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0001-5867-5690

WoS Researcher ID: M-1893-2018

e-mail: INVeselova@mail.ru

Abstract – As part of the experimental assessment of the stress-strain state of the NPP pipeline elements using devices based on the magnetic anisotropic method, changes in the wall thickness of the local section of the pipeline sample and the difference in the main mechanical stresses are obtained and evaluated. The analysis of changes in the data characterizing the stress-strain state, such as: the main mechanical stresses, the first partial derivative of the main mechanical stresses with respect to the annular generator of the sample, the modulus of the gradient of the main mechanical stresses, indicates the presence of three zones characterizing different of the studied area of the full-scale sample of the pipeline during the experiment as the local zone is thinned.

Keywords: magnetic anisotropic method, difference of the main mechanical stresses, local areas, modulus of main mechanical stresses gradient, the cyclicity of loading, the test bench.

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

УДК 338.24 : 351.862.6

**ОСОБЕННОСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ КАК ОБЪЕКТА
УПРАВЛЕНИЯ**

© 2021 М.В. Головки*, Ю.В. Вертакова**, В.Е. Галковская***,
А.Н. Сетраков****

*Негосударственное аккредитованное некоммерческое частное образовательное учреждение высшего образования «Академия маркетинга и социально-информационных технологий – ИМСИТ», Краснодар, Россия

**Курский филиал федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Курск, Россия

***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», Курск, Россия

****Волгодонский филиал ФГКОУ ВО «Ростовский юридический институт Министерства внутренних дел Российской Федерации, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В данной статье рассматриваются особенности атомной энергетики как объекта управления. Приводятся нормативно-правовые акты, регламентирующие данный процесс, и выводы о направлениях их совершенствования. Отмечается такая особенность объектов атомной энергетики как затратность проектов строительства и эксплуатации, а также необходимость обеспечения безопасности в строгом соответствии с действующими стандартами, отличающие их от других субъектов хозяйствования. Рассматривается опыт применения механизма государственно-частного партнерства и его роль в формировании конкурентных позиций Госкорпорации «Росатом» на рынке развивающихся стран.

Ключевые слова: атомная энергетика, радиационная и ядерная безопасность, топливный бизнес-процесс, государственно-частное партнерство, нормативно-правовая база, Госкорпорация «Росатом», атомные электростанции.

Поступила в редакцию 13.07.2021

После доработки 23.08. 2021

Принята к публикации 27.08.2021

Особенность атомной энергетики как объекта управления – это необходимость соблюдения мер, направленных на обеспечение ядерной и радиационной безопасности. Это уникальные и специфические виды безопасности, присущие только данному сегменту топливно-энергетического комплекса страны. Ядерная безопасность подразумевает формирование возможностей предотвращения недопустимых повреждений активной зоны реактора, а безопасность радиационная – недопущение сверхнормативного загрязнения окружающей среды и связанного с ним радиационного воздействия на человека. Проблемы ядерной и радиационной безопасности не теряют своей актуальности, т.к. их решение и преодоление – это перманентный процесс, необходимый для нормальной эксплуатации всех потенциально опасных объектов атомной отрасли. Ряд тяжелых аварий, таких как аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» в США, Чернобыльской АЭС в СССР и АЭС «Фукусима» в Японии обусловили ужесточение международных и отечественных требований к безопасности.

На сегодняшний день сформирована достаточно обширная нормативно-правовая база, ориентированная на организацию и контроль безопасного использования атомной энергии. Основные направления государственной политики в этой области определены Президентом РФ и отражены в «Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности РФ на период до 2025 года», утвержденных Указом Президента РФ № 585 от 13.10.2018, Федеральном законе № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996, в основе которого лежит приоритетность безопасности перед другими интересами участников этой деятельности, что отличает его от других законов, регламентирующих техническое регулирование в других отраслях экономики, Федеральном законе № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 11.07.2011, а также в ряде федеральных норм и правил в области промышленной безопасности и атомной энергии, регламентирующих процессы производства ядерного топлива и процессы, смежные с ними. Указанные нормы для предприятий атомной отрасли носят обязательный характер.

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (далее – Росатом) является государственным органом, ответственным за выполнение национальных обязательств в сфере соблюдения мер по обеспечению физической защиты ядерного материала в Международном агентстве по атомной энергии и других международных организациях. В действующих правилах ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07, утвержденных Постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 4 от 10.12.2007 г. отмечено данный вид безопасности определяется техническим совершенством проектов, необходимым качеством изготовления, монтажа, наладки и испытаний элементов и систем, требуемых для обеспечения безопасности, а также их эксплуатационной надежностью, непрерывной диагностикой технического состояния оборудования, контроля качества и своевременным проведением техобслуживания и ремонта оборудования, грамотным менеджментом всех техпроцессов при эксплуатации, и, что крайне важно, квалификацией, профессионализмом и дисциплиной персонала [1, 2].

Система организационно-технических мер, предусмотренных концепцией глубокоэшелонированной защиты, формирует основу ядерной безопасности радиоактивных установок и АЭС путем:

- применения и развития свойств внутренней самозащищенности объектов;
- функционирования систем безопасности, сформированных на принципах независимости, дифференциации и резервирования; единичного отказа;
- использования высокоэффективных управленческих, технических решений, разработки и реализации научно-обоснованных методик и расчетов, результатов экспериментальных исследований;
- соблюдения нормативно-правовых требований качества, регламентов, норм безопасности на всех этапах жизненного цикла ядерных объектов;
- инновационности и надежности технологических процессов;
- внедрения и постоянного контроля соблюдения принципов культуры безопасности на всех этапах жизненного цикла ядерных объектов.

В целом, на основе основополагающих принципов работы всех объектов атомной отрасли, можно построить иерархическую структуру ее особенностей как объекта управления (рис. 1).

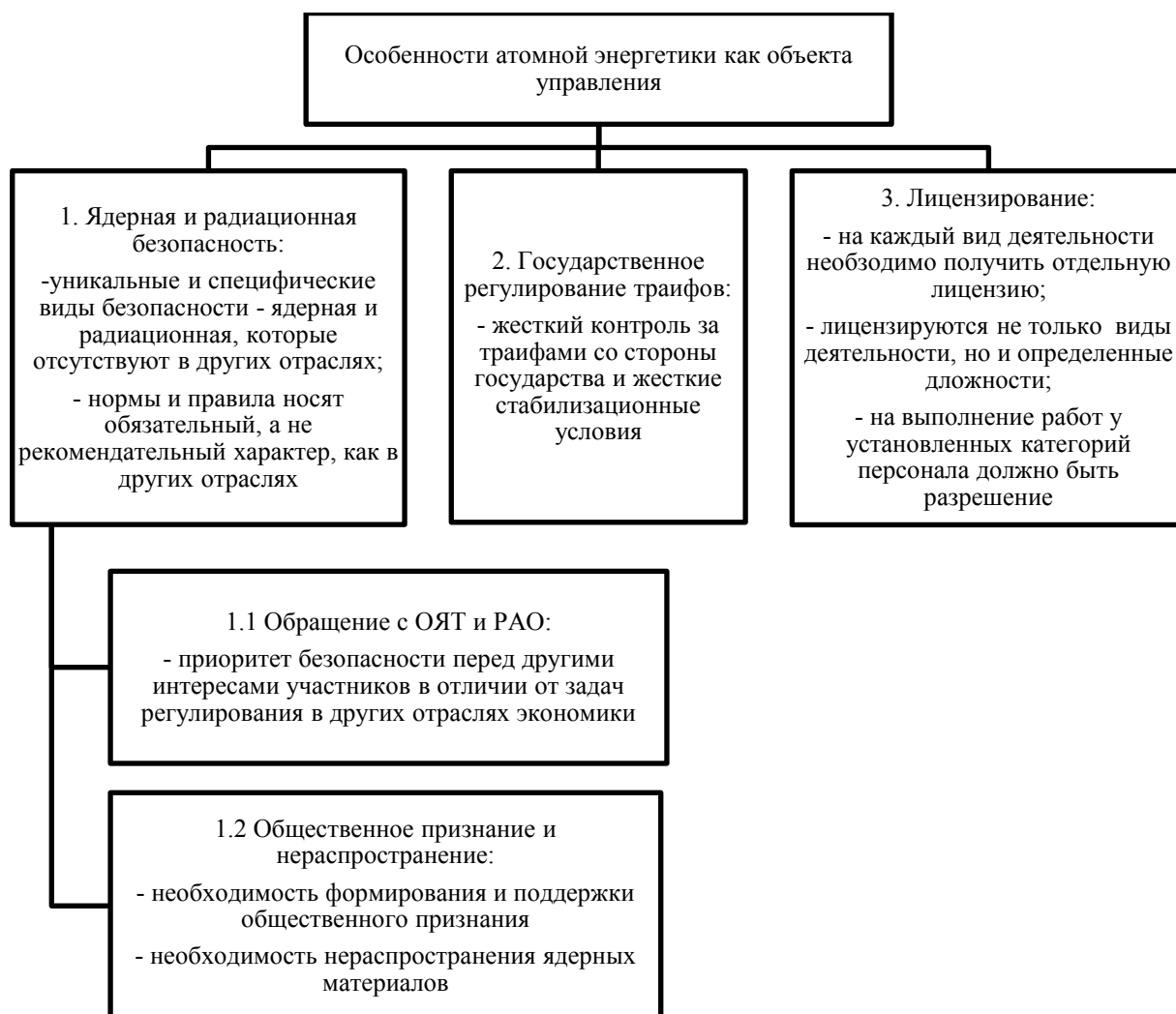


Рисунок 1 – Особенности атомной энергетики как объекта управления [Special aspects of nuclear energy as object to control]

Как показали результаты исследования особенностей атомной отрасли, в том числе, нормативно-правовой базы ее регулирования, существуют некоторые пробелы в области регулирования вопросов управления отработавшим ядерным топливом. На основе программно-целевого подхода разработана карта приоритетов развития управления в сфере атомной энергетики (табл. 1).

Таблица 1 – Карта приоритетов развития управления в атомной отрасли [Chart of management development priorities in the nuclear industry]

Особенность атомной отрасли, подлежащая регулированию	Ответственный	Функция	Правовая база
Ядерная и радиационная безопасность	Федеральные органы законодательной власти		
	Президент РФ	Определяет основные направления государственной политики в области использования атомной энергии; принимает решения по вопросам безопасности при использовании	Приказ Президента РФ № 585 от 13.10.2018 «Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности РФ на период до 2025 г.»; Федеральный закон №170-ФЗ от 21.11.1995 «Об использовании атомной энергии»

Продолжение таблицы

		атомной энергии, предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций при использовании атомной энергии	
	Федеральные органы исполнительной власти		
	Госкорпорация «Росатом»	Нормативно-правовое регулирование в области использования атомной энергии	Федеральный закон №317-ФЗ от 01.12.2007 «О государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
	АО Концерн «Росэнергоатом»	Управление атомными станциями и обеспечение безопасности	Указ Президента РФ от 07.09.1992 № 1055 «Об эксплуатирующей организации атомных станций Российской Федерации»; Федеральный закон №170-ФЗ от 21.11.1995 «Об использовании атомной энергии»
	Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору	Обеспечение ядерной и радиационной безопасности	Постановление Правительства РФ № 401 от 30.07.2004 «Об утверждении Положения о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору»; Федеральный закон №170-ФЗ от 21.11.1995 «Об использовании атомной энергии»; Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07
Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами	Радиоактивные отходы		
	Госкорпорация «Росатом»	Создание федеральной схемы и внедрение единой государственной информационной системы обращения с опасными отходами. Создание инфраструктуры для переработки и утилизации опасных отходов	Федеральный закон № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 11.07.2011
	Отработавшее ядерное топливо		
	Отсутствует	-	Отсутствует
Нераспространение	Госкорпорация «Росатом»	Государственное управление деятельности, связанной с разработкой, изготовлением, утилизацией ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения	Федеральный закон №317-ФЗ от 01.12.2007 «О государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».
Лицензирование	Ростехнадзор	Осуществление лицензирования деятельности в области использования атомной энергии	Постановление Правительства РФ № 280 от 29.03.2013 «О лицензировании деятельности в области использования атомной энергии»
Регулирование тарифов	Федеральная служба по тарифам	Регулирование тарифов на электроэнергию	Постановление Правительства РФ №332 от 30.06.2004 «Об утверждении Положения о Федеральной службе по тарифам» Приказ ФСТ России от 30.10.2009

Продолжение таблицы

			№ 268-э/1 «Об утверждении формул индексации регулируемых цен (тарифов) на электрическую энергию (мощность), применяемых в договорах купли-продажи электрической энергии (мощности), порядка их применения, а также порядка установления плановых и фактических показателей, используемых в указанных формулах»
--	--	--	--

Анализ карты дает возможность заключить, что на сегодняшний день в стране не в полной мере решена проблема обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ). Так, в частности, отсутствует законодательство в сфере ОЯТ, не определен собственник ОЯТ, стоимость переработки ОЯТ является договорной, отсутствует государственное регулирование цен в сфере обращения с ОЯТ, а также методика и методология ценообразования на оказание услуг по переработке ОЯТ. Потребность разработки стратегии обращения с ОЯТ предопределена особенностями топлива, жизненный цикл которого интегрирован в рамки ядерного топливного цикла.

Современная концепция обеспечения конкурентоспособности Госкорпорации «Росатом» сформировалась под воздействием глобальных вызовов на мировом рынке электроэнергии. Приоритет закрепляется за гибкой моделью принятия решений и оперативной реакцией на рыночные трансформации в условиях турбулентности внешней среды [3, 4]. Это предъявляет требования к развитию двух основных векторов концепции конкурентоспособности: инвестиционного и операционного. Инвестиционный ориентир представляет собой капиталовложения в строительство и финансирование эксплуатационных процессов атомных электростанций и является экзогенной переменной, детерминируемой рыночной конъюнктурой, влияние на которую отдельным рыночным субъектом件 невозможно. Операционный вектор, в том числе процессы по организации эксплуатации атомных электростанций, управлению затратами на топливо, деятельности по утилизации ОЯТ и РАО, является эндогенной переменной. Именно в рамках данного вектора должны определяться направления разработки мероприятий по обеспечению конкурентоспособности корпорации и повышению ее уровня.

Сложность технико-экономических систем в рамках деятельности Госкорпорации «Росатом», предопределяет инертность управления и высокую затратность, что влияет на экономическую эффективность предприятий корпорации в стратегической перспективе [5]. В результате, развитие атомной энергетики件 невозможно без поддержки государства, которое принимает важнейшие политические решения по вопросам необходимости ее интеграции в национальное энергетическое портфолио, обладает полномочиями по созданию институционально-экономических условий финансирования проектов строительства и эксплуатации атомных электростанций, контролирует условия и сроки реализации проектов, предпринимая меры по недопущению их нарушения с целью контроля необоснованного роста издержек и/или отмены проектов [6].

Доминирующая роль государства в развитии атомной отрасли и обеспечении лояльного отношения к ней со стороны населения обусловлена такими ее особенностями, как масштабы инвестиций в строительство и эксплуатацию, а также затраты на обеспечение безопасности всех объектов атомной отрасли, которые не являются экономически эффективными в традиционном понимании.

Правовые основы государственной поддержки атомной отрасли сформулированы в Федеральном законе от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии», Указе Президента РФ от 27.04.2007 №556 «О реструктуризации атомного энергопромышленного комплекса Российской Федерации», Федеральном законе от 31.12.2014 № 488-ФЗ «О промышленной политике в Российской Федерации».

В Указе Президента РФ №585 от 13.10.2018 «Об утверждении основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности РФ на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» обозначено, что финансовыми источниками реализации государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности являются средства федерального бюджета и бюджетов субъектов Российской Федерации, а также средства специальных резервных фондов, создаваемых за счет отчислений организаций, эксплуатирующих атомные электростанции. Согласно «Правилам отчисления предприятиями и организациями, эксплуатирующими особо радиационно-опасные и ядерно-опасные производства и объекты (атомные станции), средств для формирования резервов, предназначенных для обеспечения безопасности атомных станций на всех стадиях их жизненного цикла и развития» АО «Концерн Росэнергоатом» формирует резервы финансирования затрат по обеспечению ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасности; по обеспечению физической защиты, учета и контроля ядерных материалов; по обеспечению развития атомных станций; по обеспечению вывода из эксплуатации атомных станций.

Помимо высокого уровня первоначальных капиталовложений, особенностью атомной энергетики является длительность срока окупаемости данных инвестиционных проектов [7]. Согласно данным Всемирной Ядерной Ассоциации, средний срок строительства атомной электростанции составляет около 7-8 лет, а срок окупаемости инвестиций – 15-25 лет. В связи с этим в мировой практике сформировалась ведущая роль государства в инициировании и финансировании данных проектов. В то же время, следует отметить, что ограниченность и масштабы ресурсов, необходимых для реализации проектов строительства и эксплуатации атомных электростанций, привели к необходимости реализации методов комбинированного финансирования – государственного и коммерческого – государственно-частное партнерство [8-11].

Реализация проектов государственно-частного партнерства в сфере атомной энергетики стала реальностью с внесением изменений в Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в части предоставления возможности российским юридическим лицам, перечень которых утвержден Федеральным законом от 05.02.2007 № 13-ФЗ «Об особенностях управления и распоряжения имуществом и акциями организаций, осуществляющих деятельность в области использования атомной энергии, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», право приобретать ядерные установки. Вместе с тем, в российской практике не было реализовано ни одного проекта в сфере атомной энергетики по схеме государственно-частного партнерства – планы по строительству Балтийской АЭС с привлечением зарубежных инвесторов так и не стали реальностью, а строительство станции заморожено.

Первым проектом, который в настоящее время реализуется по схеме ВОО (строй-владей-эксплуатируй) в атомной энергетике, является строительство Росатомом АЭС «Аккую» в Турции. Проект оценивается в 20,8 млрд долл. и предполагает первоначальное финансирование со стороны российской стороны с последующей передачей 49% акций турецкой проектной компании. Для обеспечения гарантии возврата инвестиции подразумевается заключение соглашения о поставках электроэнергии (от англ. PPA – power purchase agreement) на 15 лет, начиная с ввода в коммерческую эксплуатацию каждого из четырех энергоблоков станции. Схема

предполагает продажу 70% электроэнергии, вырабатываемой блоками №1 и №2, и 30% электроэнергии – блоками №3 и №4 (на условиях фиксированной средневзвешенной цены 12,35 цента США за КВт·ч).

Постановлением Правительства Российской Федерации от 02.06.2014 г. № 516-12 была утверждена Государственная программа Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса» с изменениями и дополнениями в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 28.03.2019 г. №338-194. В данной программе отражено, что строительство новых АЭС должно финансироваться за счет федерального бюджета и средств резерва на развитие АО «Концерн Росэнергоатом». Таким образом, на законодательном уровне закреплено участие генерирующих компаний в финансировании новых проектов строительства энергоблоков.

В настоящее время практика финансирования за счет собственных средств генерирующих компаний имеет тенденцию к трансформации в схемы, где ключевая роль отводится инвестициям в проект со стороны потребителей электроэнергии. В дальнейшем, по мнению экспертов (в том числе и экспертов МАГАТЭ), при сохранении тенденций к диверсификации источников поступления капитала проектное финансирование окончательно оформится как одна из приоритетных форм реализации новых проектов в атомной энергетической отрасли. Что касается таких качественно новых форм, как ВОО, то их применение в атомной энергетике представляется возможным, однако требует практического подтверждения [12].

Характерным примером современной схемы комплексного финансового решения для атомного энергетического проекта является строительство АЭС «Олкилуото-3» в Финляндии [13, 14]. В рамках данного проекта ведущие энергетические и промышленные компании создали совместное предприятие TVO (Total Value of Opportunity, методология идентификации и контроля инвестиций, оказывающих непосредственное влияние на финансовое оздоровление компании, на основе метрик всестороннего инвестиционного анализа инициатив для бизнеса) для осуществления инвестиций в сооружение и эксплуатацию АЭС «Олкилуото-3» в Финляндии, возврат инвестиций планируется за счет продажи электроэнергии. Проект финансируется за счет собственных средств компании и за счет заемного финансирования, которое получено при поддержке французского государственного экспортно-кредитного агентства (ЭКА) COFACE. Немаловажное значение здесь имеет тот факт, что схема заемного финансирования стала возможной благодаря участию компании Orano (бывшая AREVA) в сооружении блока АЭС. Этот факт свидетельствует о том, что компания – поставщик АЭС, а также государство, откуда данная компания происходит, зачастую играют ключевую роль в финансировании проекта [15, 16]. Усиление роли компании – поставщика технологии и строителя АЭС (компаний-вендора) в инвестиционном обеспечении проекта наряду с развитием проектного финансирования новых энергоблоков можно отнести еще одной тенденции развития схем финансирования новых АЭС. Сейчас среди вендоров основная конкуренция идет за рынок развивающихся стран, где важным критерием выбора того или иного поставщика является его способность обеспечить комплексное предложение и организовать финансирование проекта. Для российской атомной сферы в лице госкорпорации «Росатом» данный тренд создает весомое конкурентное преимущество на мировом рынке строительства новых АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грищенко, А.И. Государственное регулирование атомной энергетикой: правовые проблемы / А.И. Грищенко // Энергетическое право. – 2006. – №1. – С. 304-321.

2. Maria V. Golovko, Irina A. Ukhalina, Zhanna S. Rogacheva, Anna V. Antsibor, Nina A. Efimenko. The Role of the Culture of Economic Security in the Development of the Enterprise // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. No 200. P.1006-1016.
3. Долматов, И.А. Эволюция системы регулирования тарифов в электроэнергетике / И.А. Долматов, В.С. Минкова, Е.В. Яркин // Электрические станции. – 2015. – №1. – С.12-19.
4. Свиридова, С.В. Методы и принципы стратегического развития промышленных предприятий / С.В. Свиридова // Проблемы современных экономических, правовых и естественных наук в России: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2017.
5. Галковская, В.Е. Особенности реализации механизма государственно-частного партнёрства в ядерной энергетике России : монография / В.Е. Галковская, Ю.В. Вертакова // Кластеризация цифровой экономики: теория и практика. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХПРЕСС Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2020. – С. 462-483.
6. Barkatullah N. NPP Projects: Financing Structures and Introduction to Financial Risk Management. The IAEA Nuclear Energy Management School in UAE. January 9. 2019
7. Мороз, А.И. Проблемы совершенствования механизмов государственного и корпоративного управления в атомной энергетике России / А.И. Мороз // Транспортное дело России. – 2012. – №5. – С. 3-6.
8. Перевалов, С.С. Государственно-частное партнерство как наиболее эффективная форма реализации крупных инфраструктурных проектов / С.С. Перевалов // Устойчивое развитие российских регионов: экономическая политика в условиях внешних и внутренних шоков: сборник материалов XII Международной научно-практической конференции, 17-18 апреля 2015 г. – Екатеринбург : УрФУ, 2015. – С. 1384-1389.
9. Дубовцев, Д. Роль государственно-частного партнерства в развитии атомной энергетики России / Д. Дубовцев // Федерализм/ –2011. – №2(62). – С. 205-211.
10. Черняховская, Ю.В. Государственно-частное партнерство в атомной энергетике: опыт США / Ю.В. Черняховская, Д.Л. Корольков // Вестник Финансового Университета. – 2017.– №1. – С. 91-105.
11. Иванов, Т.В. Методология финансирования как составляющая успешной реализации проектов сооружения АЭС / Т.В. Иванов, Ю.В. Черняховская // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 2. – С. 1-6.
12. Taylor S. Can New Nuclear Power Plants be Project Financed? University of Cambridge. Electricity Policy Research Group. May 2011.
13. Карнеев, А.А. Финансовое обеспечение проектов по строительству АЭС как фактор конкурентоспособности российской атомной отрасли на мировом рынке / А.А. Карнеев // Финансы и кредит. – 2014. – №28(604). – С. 48-55.
14. Черняховская, Ю.В. Модель финансирования строительства АЭС на примере проекта манкалы в Финляндии / Ю.В. Черняховская, М.О. Дьяконов // Корпоративные финансы. – 2017. – №4. Том 14. – С.70-92.
15. Barkatullah N. NPP Projects: Financing Structures and Introduction to Financial Risk Management. The IAEA Nuclear Energy Management School in UAE. January 9. 2012.
16. Rudenko V., Golovko M., Tomilin S., Marchenko A. Project of Multi-Purpose Research Nuclear Installation on Fast Neutrons is to Ensure the National Economy Safety // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. №2. 2017.

REFERENCES

- [1] Grishchenko A.I. Gosudarstvennoe regulirovanie atomnoj energetikoј: pravovye problemy [State Regulation of Nuclear Energy: Legal Problems]. Energeticheskoe pravo [Energy Law]. 2006. №1. P. 304-321 (in Russian).
- [2] Maria V. Golovko, Irina A. Ukhalina, Zhanna S. Rogacheva, Anna V. Antsibor, Nina A. Efimenko. The Role of the Culture of Economic Security in the Development of the Enterprise // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. No 200. P.1006-1016 (in English).
- [3] Dolmatov I.A., Minkova V.S., YArkin E.V. Evolyuciya sistemy regulirovaniya tarifov v elektroenergetike [Evolution of the tariff regulation system in the electric power industry]. Elektricheskie stancii [Electric Plants]. 2015. №1. P.12-19 (in Russian).
- [4] Sviridova S.V. Metody i principy strategicheskogo razvitiya promyshlennyh predpriyatij [Methods and Principles of Strategic Development of Industrial Enterprises]. Problemy sovremennyh ekonomicheskikh, pravovyh i estestvennyh nauk v Rossii: sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Problems of Modern Economic, Legal and Natural Sciences in Russia: collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference]. Voronezh, 2017 (in Russian).

- [5] Galkovskaya V.E., Vertakova Yu.V. Osobennosti realizacii mekhanizma gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v yadernoj energetike Rossii: monografiya [Features of the Implementation of the Mechanism of Public-Private Partnership in the Nuclear Energy of Russia: monograph]. Klasterizaciya cifrovoj ekonomiki: teoriya i praktika [Clustering of the Digital Economy: Theory and Practice]. Sankt-Peterburg: POLITEKHPRESS Sankt-Peterburgskij politekhnicheskij universitet Petra Velikogo [St. Petersburg: POLYTECHPRESS Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University]. 2020. P. 462-483 (in Russian).
- [6] Barkatullah N. NPP Projects: Financing Structures and Introduction to Financial Risk Management. The IAEA Nuclear Energy Management School in UAE. January 9. 2019 (in English).
- [7] Moroz A.I. Problemy sovershenstvovaniya mekhanizmov gosudarstvennogo i korporativnogo upravleniya v atomnoj energetike Rossii [Problems of Improving the Mechanisms of State and Corporate Governance in the Nuclear Energy of Russia]. Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia]. 2012. №5. P. 3-6 (in Russian).
- [8] Perevalov S.S. Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo kak naibolee effektivnaya forma realizacii krupnyh infrastrukturyh proektov [Public-Private Partnership as the Most Effective Form of Implementation of Large Infrastructure Projects]. Ustojchivoe razvitie rossijskih regionov: ekonomicheskaya politika v usloviyah vneshnih i vnutrennih shokov: sbornik materialov XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, 17-18 aprelya 2015 g. [Sustainable Development of Russian Regions: Economic Policy in Conditions of External and Internal Shocks: a collection of materials of the XII International Scientific and Practical Conference, April 17-18, 2015] – Ekaterinburg : UrFU [Ekaterinburg: Ural Federal University]. 2015. P. 1384-1389 (in Russian).
- [9] Dubovcev D. Rol' gosudarstvenno-chastnogo partnerstva v razvitii atomnoj energetiki Rossii [The Role of Public-Private Partnership in the Development of Nuclear Energy in Russia]. Federalizm [Federalism]. 2011. №2(62). P. 205-211 (in Russian).
- [10] Chernyahovskaya Yu.V., Korol'kov D.L. Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo v atomnoj energetike: opyt SSHA [Public-Private Partnership in Nuclear Energy: US Experience]. Vestnik Finansovogo Universiteta [Bulletin of the Financial University]. 2017. №1. P. 91-105 (in Russian).
- [11] Ivanov T.V., Chernyahovskaya Yu.V. Metodologiya finansirovaniya kak sostavlyayushchaya uspešnoy realizacii proektov sooruzheniya AES [Funding Methodology as a Component of Successful Implementation of NPP Construction Projects]. Vestnik IGEU [Bulletin of ISEU]. 2019. Issue. 2. P.1-6 (in Russian).
- [12] Taylor S. Can New Nuclear Power Plants be Project Financed? University of Cambridge. Electricity Policy Research Group. May 2011 (in English).
- [13] Karneev A.A. Finansovoe obespechenie proektov po stroitel'stvu AES kak faktor konkurentosposobnosti rossijskoj atomnoj otrasli na mirovom rynke [Financial Support of NPP Construction Projects as a Factor in the Competitiveness of the Russian Nuclear Industry in the World Market]. Finansy i kredit [Finance and Credit]. 2014. №28(604). P. 48-55 (in Russian).
- [14] Chernyahovskaya Yu.V., D'yakonov M.O. Model' finansirovaniya stroitel'stva AES na primere proekta mankaly v Finlyandii [Model of Financing the Construction of A Nuclear Power Plant on the Example of the Mancala Project in Finland]. Korporativnye finansy [Corporate Finance]. 2017. №4. Tom 14. P.70-92 (in Russian).
- [15] Barkatullah N. NPP Projects: Financing Structures and Introduction to Financial Risk Management. The IAEA Nuclear Energy Management School in UAE. January 9. 2012 (in English).
- [16] Rudenko V., Golovko M., Tomilin S., Marchenko A. Project of Multi-Purpose Research Nuclear Installation on Fast Neutrons is to Ensure the National Economy Safety // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. №2. 2017 (in English).

Special Aspects of Nuclear Energy as Object to Control

M.V. Golovko^{*1}, Yu.V. Vertakova^{2}, V.Y. Galkovskaya^{***3}, A.N. Setrakov^{****4}**

**Non-state accredited non-profit private educational institution of higher education «Academy of Marketing and Social and Information Technologies – IMSIT», Zipovskaya St.5, Southern Federal District, Krasnodar Region, Krasnodar, Russia 350010*

***Kursk branch of the Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Education «Financial University under the Government of the Russian Federation», Lomonosov st., 3 Kursk, Russia 305016
 ***Southwest State University, 50th anniversary of October st., 94 Kursk, Russia 305040*

*****Volgodonsk Branch of The Federal State State Educational Institution of Higher Education «Rostov Law Institute of Internal Affairs Ministry of Russian Federation», Stepnaya St., 40, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

¹*ORCID iD: 0000-0002-4835-9800*

WoS Researcher ID: J-2461-2016

e-mail: golovko178@mail.ru

²*ORCID iD: 0000-0002-1685-2625*

e-mail: yvvertakova@fa.ru

³*ORCID iD: 0000-0003-4960-5281*

WoS Researcher ID: M-1948-2018

e-mail: galvika@mail.ru

⁴*ORCID iD: 0000-0001-5599-440X*

WoS Researcher ID: AAP-73782020

e-mail: aleksandr-maior@inbox.ru

Abstract – This article examines the special aspects of nuclear energy as an object to control. The article provides normative legal acts regulating this process, and conclusions on the directions of their improvement. Such a feature of nuclear power facilities as the cost of construction and operation projects, as well as the need to ensure safety in strict accordance with the current standards, distinguishing them from other business entities, is noted. The experience of the application of the mechanism of public-private partnership and its role in the formation of the competitive position of the State Atomic Energy Corporation «Rosatom» in the market of developing countries is considered.

Keywords: nuclear energy, radiation and nuclear safety, fuel business process, public-private partnership, regulatory framework, State Atomic Energy Corporation «Rosatom», nuclear power plants.

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

УДК 005.51

**СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ
МУНИЦИПАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ
УСЛОВИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ВОЛГОДОНСКА)**

© 2021 Д.Г. Хухлаев, В.Е. Довбыш

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

Статья посвящена вопросам построения эффективной сбалансированной стратегии развития муниципального образования в условиях факторов, характерных для территорий базирования объектов атомной энергетики. В качестве примера был выбран город Волгодонск, где представлены подразделения дивизионов Госкорпорации Росатом. В рамках исследования определен круг проблемных аспектов стратегического планирования муниципального образования: необходимость выделения проектов экономической направленности, составление иерархии проектов в рамках стратегического развития города, критичность вопроса финансирования данных проектов и др. Авторами сделаны выводы и предложения касательно принципов планирования стратегического развития муниципального образования на примере города Волгодонска. Определена роль и взаимное влияние стратегического развития города Волгодонска с устойчивым функционированием предприятий атомной отрасли.

Ключевые слова: стратегический менеджмент, стратегическое планирование, стратегия развития города, обеспечение функционирования предприятий атомной отрасли.

Поступила в редакцию 18.08.2021
После доработки 26.08.2021
Принята к печати 03.09.2021

Любое муниципальное образование, кроме всего прочего, выступает в качестве хозяйствующего субъекта, который по законам общественной жизни должен обязательно развиваться.

На современном этапе стратегическое планирование применяется в определении ориентиров развития российского государства. Основными задачами при этом выступают обеспечение экономического развития, создание предпосылок для роста ВВП, повышения уровня жизни населения Российской Федерации. Муниципальные образования, являющиеся также частью государственной системы, предельно жестко нуждаются в наличии стратегического планирования и его реализации. Цель определяется четко: обеспечение высокого уровня социально-экономического развития муниципального образования высокого уровня его инвестиционной привлекательности и достойного существования проживающих граждан. Необходима консолидация разрозненных целей и усилий субъектов, находящихся на конкретной муниципальной территории [1].

Проблематика стратегического развития муниципальных образований и планирования данных процессов рассматривалась не единожды, и связано это с рядом факторов, основные из них необходимо перечислить:

1. муниципальное образование является уникальным хозяйствующим субъектом, поскольку не ставит своей целью получение прибыли;

2. основные задачи, которые необходимо решать носят социальный характер (образование, здравоохранение, обеспечение общественной безопасности и др.) и они не формируют доходную часть бюджета города;

3. сложный и комбинированный характер финансирования муниципального образования;

4. наличия ряда детерминант, делающее функционирование муниципального образования как хозяйствующего субъекта уникальным.

О последнем факторе скажем отдельно. Планирование стратегического развития основывается на учете уникальных для каждого региона и муниципального образования характеристик [2], которые мы несколько расширим:

- географическое положение муниципального образования;
- наличие и качество транспортных артерий, их пропускная способность;
- климат;
- наличие природных, демографических и иных ресурсов;
- размерность экономического субъекта и его роль в функционировании региона;
- уровень экономического развития хозяйствующих субъектов, функционирующих на территории муниципального образования, их экономические связи;
- уровень жизни населения (экономический и социальный);
- эффективность управления экономикой конкретного муниципального образования.

Нередко, при рассмотрении факторов применяют комбинированный показатель «потенциал территории» [3], куда включают ряд детерминант: инвестиционный потенциал, социальная карта, инновационный потенциал, инфраструктура, природный капитал, человеческий ресурс и др. В рамках статьи авторы не видят смысла в дискуссию с подобной трактовкой факторов, поскольку разница видна только в классификационном делении.

Город Волгодонск своим развитием в значительной степени обязан системе планового хозяйствования советского периода, являясь одновременно элементом различных стратегических планов развития народного хозяйства СССР. Можно сделать вывод о том, что г. Волгодонск имеет свои хозяйственные контуры не в результате естественного развития, а в результате воздействия на территорию и экономическое пространство в ходе реализации стратегических планов. Это влияет на такой фактор, указанный нами выше как «наличие и качество транспортных артерий, их пропускная способность». С одной стороны, город Волгодонск находится на равном удалении от трех региональных центров: Ростова-на-Дону, Волгограда и Элисты, с другой стороны – располагает водными артериями, принципиально необходимыми для транспортировки крупногабаритных изделий, производимых для нужд энергетики (атомных реакторов и парогенераторов).

Собственники практически всех ключевых производств, территориально относящихся к Волгодонскому муниципальному образованию, находятся за его пределами, а зачастую и за пределами Ростовской области. Это имеет два негативных следствия:

- 1) собственники не являются налогоплательщиками нашего региона;
- 2) собственники в основном не имеют принципиальной заинтересованности в комплексном развитии муниципального субъекта и Ростовской области в целом;
- 3) в настоящее время в Российской Федерации реализуются программы развития городов, в которых главным источником финансирования является федеральный бюджет [4]. Город Волгодонск в данный список не входит.

Положительным моментом является наличие Ростовской атомной станции, что предопределяет поступление определенного финансирования бюджета области со стороны АО «Концерн Росэнергоатом». Опосредовано часть этих средств поступает в бюджет города Волгодонска.

Рассмотрим основные этапы построения стратегии развития города с учетом специфики г. Волгодонска.

Стратегическое видение представляет собой идеальное состояние объекта управления в представлении руководства города, и всего общества в целом.

Определение (постановка) цели как конечного результата имеет общие правила, выражаемые в экономической литературе как SMART.



Рисунок 1 – Элементы технологии SMART [SMART technology elements]

Технология SMART – современный подход к постановке работающих целей. Система постановки smart – целей позволяет на этапе целеполагания обобщить всю имеющуюся информацию, установить приемлемые сроки работы, определить достаточность ресурсов, предоставить всем участникам процесса ясные, точные, конкретные задачи. Попробуем дать расшифровку этой, широко известной системы применительно к реалиям стратегического планирования развития муниципального образования.

Specific (конкретность). Цели развития муниципального образования должны иметь конкретику, что определяет возможность реализации следующего условия. Нельзя указать цель «рост благосостояния горожан», необходимо определить конкретное понимание данного вопроса, например «средняя заработная плата». Недопустимо облекать целеполагание в художественные формы, например: «для корабля, пункт назначения которого не известен, никогда не бывает попутного ветра» [5].

Measurable (измеряемость результата). Как уже говорилось, конкретность цели определяет возможности измерения ее достижимости.

Attainable (достижимость целей). Данный принцип определяет реальные возможности по достижению поставленных целей. Здесь можно отметить такую проблему, как политизированность системы управления, когда руководство города и депутатский корпус дают горожанам (избирателям) обещания, выполнение которых нельзя спрогнозировать.

Relevant (уместность). Под «уместностью» следует понимать совпадение частных целей экономического и социального развития города с общей концепцией развития, которой они не должны противоречить. Частные цели также должны быть согласованы друг с другом, и что особенно важно – с источниками финансирования.

Time-bound (наличие ограничения во времени). Любой план развития города имеет четкие временные границы.

Академик, бизнесмен Н.Р. Базиян указывает и на дополнительные требования к цели конкретного проекта, а именно дать возможность реализовывать дополнительные проекты и соответствовать требованиям инвесторов [6].

В данной статье мы пропустим вопрос о миссии, поскольку она играет исключительную роль только для хозяйствующего субъекта.

Рассмотрим выбор стратегии и концепции (модели) развития города.

В процессе стратегического планирования необходимо решить ряд противоречий, обусловленных вышеперечисленными факторами:

1) Выбор концепции развития города.

Наиболее трудным при разработке концепций является даже не оценка различных концепций, не выбор из них лучшей, а само формирование нескольких различных концепций, логически вытекающих из проблем города и его возможностей. Решение этого вопроса является вводной для решения следующей задачи. Концепция определяет не только цели, но и механизмы их достижения. Практика указывает на возможность реализации ряда концепций. Примерами могут служить концепция «умный город» [7], [8].

2) Выбор драйвера развития города Волгодонска.

Уникальность города Волгодонска, заключается в наличие предприятий и учреждений дивизионов Госкорпорации Росатом.

3) Баланс между экономическими и социальными проектами.

Отмечая важность социальной сферы, считаем, что базисом устойчивого развития города является все-таки экономика.

4) Концентрация и диверсификация целей экономического развития.

С одной стороны, руководство города должно решать вопросы комплексного развития экономики муниципального образования. С другой, существуют предпосылки развития отдельных отраслей и предприятий. Необходимо отметить, что избыточная диверсификация целей неизбежно приведет к распылению финансовых и других ресурсов.

5) Финансирование стратегического развития города.

Ситуация является наиболее острой для городов, не являющимися региональными центрами, и по составу определяемые как малые города [9]. На достижение целей бюджетной политики могут оказать существенное влияние изменения в бюджетном и налоговом законодательстве Российской Федерации, перераспределение доходных источников между уровнями бюджетной системы Российской Федерации, уточнение расходных полномочий, применение новых механизмов в межбюджетных отношениях между субъектами Российской Федерации и федеральным центром.

6) Определение уровня текущей конкурентоспособности города и мер по его повышению.

Конкуренция является атрибутом любой экономической системы, которая не только определяет эффективное распределение ограниченных ресурсов между субъектами экономики, но и определяет в зависимости от условий внешней среды наиболее рациональное их использование.

В результате рассмотрения нашей научной проблемы мы можем резюмировать ряд сделанных выводов и подтвердить ранее известные выводы:

1) При формировании целей должны соблюдаться правила системы SMART с учетом выявленной специфики.

2) При составлении иерархии проектов, главные определяются исходя из показателей экономической эффективности (прибыльности). Аргументируется данная позиция тем, что любой проект (например, социальный или образовательный) не

являющийся самоокупаемым требует источник финансирования. Исключением являются социальные проекты, имеющие целевое бюджетное финансирование.

3) Если развитие города связано с функционированием корпоративных структур, в нашем случае – Госкорпорации Росатом, то логично было бы учитывать запросы и интересы данных предприятий. На практике это может реализоваться как в социальной, так и в экономической сфере. В первом случае, речь идет о подготовке специалистов для предприятий атомной отрасли, во втором – об экономических преференциях, предоставляемых муниципальным образованием и областью.

4) При составлении проектов необходимо их дифференцировать по источникам финансирования, используя дополнительный критерий – надежность источника (вероятность получения финансирования). Кроме этого, учитывается срок окупаемости проекта и использование доходов от его реализации для финансирования других направлений в рамках стратегического развития муниципального образования.

5) При разработке стратегии развития муниципального образования вопрос наличия ресурсов для его реализации является первоочередным. Чаше проблемой выступает недостаточное финансирование.

6) В рамках формирования стратегического плана развития города необходимо отделять реальные цели от популистских лозунгов. Другими словами, должно быть два плана развития: «политический (медийный)» и «рабочий (реальный)».

7) В ходе разработки стратегии развития муниципального существует потребность в разграничении социальных и экономических направлений и проектов.

8) При составлении стратегии развития города Волгодонска необходимо учитывать положительные факторы, проецируемые драйвером развития города, в нашем случае ими выступают Ростовская атомная станция и другие предприятия Госкорпорации Росатом.

9) Планирование стратегии развития города должно согласовываться с положениями и принципами государственного стратегического планирования [10]. Тем не менее, предложенный в ФЗ «О стратегическом планировании в Российской Федерации» [11] четырехуровневый алгоритм планирования является для муниципального образования труднореализуемым [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Татенко, Г.И. Европейская концепция стратегического планирования развития территории / Г.И. Татенко // Евразийский союз ученых. – 2017. – №11-2. – С78.
2. Селезнева, Ж.В. Стратегическое планирование развития городского хозяйства : учебное пособие / Ж.В. Селезнева. – Самара : Самарский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2013. – 118 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/20521.html> (дата обращения: 12.05.2021).
3. Насирдинова, А.М. Метод, разработанный для дополнения стратегий развития городов разделом «Стратегия пространственного развития» / А.М. Насирдинова // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2020. – Том 20. – № 11. – С. 46.
4. Shutova, O.A. Strategic development of educational policy in sebastopol // O.A. Shutova, I.N. Avdeeva, L.V. Adonina // Оригинальные исследования. – 2021. – Том 11. – №4. – С. 100.
5. Дулина, Н.В. Состояние современного российского города и необходимость разработки стратегии его развития / Н.В. Дулина // Региональная экономика: теория и практика. – 2005. – № 6. – С. 37-38.
6. Базиян, Н.Р. Стратегический менеджмент / Н.Р. Базиян. – Москва : Юриспруденция, 2018. – 510 с. // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/86541.html> (дата обращения: 12.05.2021).
7. Shkvarya, L.V. Smart cities: necessity and development strategies / L.V. Shkvarya, A.S. Semenov // Информация и инновации. – 2020. – Том 1. – № 2. – С. 52.
8. Курочкин, А.В. Социально-политические компоненты в проектировании стратегий развития умных городов как базис их устойчивого развития / А.В. Курочкин // Политическая экспертиза: Политэкс. – 2020. – Том 16. – № 4. – С. 448-461.

9. Бобракова, Т.А. Проблема малых городов: несоответствие реального потенциала развития и государственных стратегий грядущих десятилетий / Т.А. Бобракова // Малые и средние города России: социокультурная и экономическая роль в развитии страны (Златоуст, 04 мая 2012 года): сборник трудов конференции. – Челябинск : Южно-Уральский технологический университет, 2012. – С. 88-94.
10. Матрусов, Н.Д. О формировании системы государственного стратегического планирования в России (оценка проекта Федерального закона «О государственном стратегическом планировании») / Н.Д. Матрусов – Материалы четвертой международной конференции. управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2010 (Москва, 04–06 октября 2010 года). – Москва : Учреждение российской академии наук институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2010. – С. 309.
11. Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации» от 28.06.2014 N 172-ФЗ – Информационно-правовая система Консультант+. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841/ (дата обращения: 31.08.2021).
12. Белянова, А.М. Стратегическое планирование в условиях современной экономики России (материалы научного семинара по проблемам стратегического планирования) / А.М. Белянова, В.А. Бирюков, В.Н. Черковец // Вестник Московского университета. – Серия 6: Экономика. – 2016. – № 3. – С. 143.

REFERENCES

- [1] Tatenko G. I. Evropejskaya koncepciya strategicheskogo planirovaniya razvitiya territorii [European Concept of Strategic Planning of Territory Development] / G. I. Tatenko // Evrazijskij soyuz uchenykh [Eurasian Union of Scientists]. 2017. №. 11-2. P. 78 (in Russian).
- [2] Selezneva, Zh. V. Strategicheskoe planirovanie razvitiya gorodskogo hozyajstva: uchebnoe posobie [Strategic Planning of Urban Economy Development: a textbook]. Samara: Samarskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, EBS ASV [Samara: Samara State University of Architecture and Civil Engineering, EBS DIA], 2013. 118 p. // Electronic library system IPR BOOKS. URL: <https://www.iprbookshop.ru/20521.html> (reference date: 12.05.2021).
- [3] Nasirdinova A.M. Metod, razrabotannyj dlya dopolneniya strategij razvitiya gorodov razdelom «Strategiya prostranstvennogo razvitiya» [A Method Developed to Supplement Urban Development Strategies with the Section "Spatial Development Strategy"]. A.M. Nasirdinova // Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta [Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University]. 2020. Volume 20. No. 11. P. 46 (in Russian).
- [4] Shutova O.A. Strategic Development of Educational Policy in Sevastopol // O. A. Shutova, I. N. Avdeeva, L. V. Adonina //Original'nye issledovaniya [Original research]. 2021. Volume 11. No. 4. P. 100 (in English).
- [5] Dulina N.V. Sostoyanie sovremennogo rossiyskogo goroda i neobhodimost' razrabotki strategii ego razvitiya [State of Modern Russian City and the Need to Develop a Strategy for its Development]. / Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika [Regional Economy: Theory and Practice]. 2005. No. 6. P. 37-38 (in Russian).
- [6] Baziyan, N. R. Strategicheskij menedzhment [Strategic Management] - Moscow: Yurisprudentsia, 2018 – 510 p. // Electronic library system IPR BOOKS. - URL: <https://www.iprbookshop.ru/86541.html> (reference date: 12.05.2021).
- [7] Shkvarya L.V., Shkvarya L.V., Semenov A.S. Smart Cities: Necessity and Development Strategies / Informaciya i innovacii [Information and Innovation]. 2020. Volume 1. No. 2 P. 52 (in English).
- [8] Kurochkin A.V. Social'no-politicheskie komponenty v proektirovanii strategij razvitiya umnykh gorodov kak bazis ih ustojchivogo razvitiya [Socio-Political Components in the Design of Strategies for the Development of Smart Cities as a Basis for Their Sustainable Development] / A.V. Kurochkin // Politicheskaya ekspertiza: Politex [Political expertise: Politex]. 2020. Volume 16. No. 4. P. 448-461 (in Russian).
- [9] Bobrakova T.A. Problema malyh gorodov: nesootvetstvie real'nogo potentsiala razvitiya i gosudarstvennykh strategij gryadushchih desyatiletij [Problem of Small Cities: Discrepancy between the Real Potential of Development and State Strategies of the Coming Decades / Malye i srednie goroda Rossii: sociokul'turnaya i ekonomicheskaya rol' v razvitii strany (Zlatoust, 04 maya 2012 goda): sbornik trudov konferencii [Small and Medium-Sized Cities of Russia: Socio-Cultural and Economic Role in the Development of the Country (Zlatoust, May 04, 2012): Proceedings of the Conference]. Chelyabinsk: YUzhno-Ural'skij tekhnologicheskij universitet [Chelyabinsk: Publishing House: South Ural Technological University]. 2012. P. 88-94 (in Russian).
- [10] Matrusov N.D. O formirovanii sistemy gosudarstvennogo strategicheskogo planirovaniya v Rossii (ocenka proekta Federal'nogo zakona «O gosudarstvennom strategicheskom planirovanii») [Formation of the State Strategic Planning System in Russia (Evaluation of the Draft Federal Law"

- State Strategic Planning"]]. Materialy chetvertoj mezhdunarodnoj konferencii, upravlenie razvitiem krupnomasshtabnyh sistem MLSD'2010 (Moskva, 04–06 oktyabrya 2010 goda) [Materials of the Fourth International Conference. Management of Large-Scale Systems Development MLSD ' 2010 (Moscow, October 04-06, 2010)]. Moskva: Uchrezhdenie rossijskoj akademii nauk institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN [Moscow: Establishment of the Russian Academy of Sciences V. A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences]. 2010. P. 309 (in Russian).
- [11] Federal'nyj zakon «O strategicheskom planirovanii v Rossijskoj Federacii» ot 28.06.2014 N 172-FZ – Informacionno-pravovaya sistema Konsul'tant+. [Federal Law "Strategic Planning in the Russian Federation" dated 28.06.2014 No. 172 -FZ - Information and legal system "Consultant+"]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_164841/ (reference date: 31.08.2021).
- [12] Belyanova A.M., Biryukov V.A., Cherkovets V.N. Strategicheskoe planirovanie v usloviyah sovremennoj ekonomiki Rossii (materialy nauchnogo seminar po problemam strategicheskogo planirovaniya) [Strategic Planning in the Conditions of the Modern Economy of Russia (materials of the scientific seminar on the problems of strategic planning)] / A.M. Belyanova, /Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 6: Ekonomika [Bulletin of the Moscow University. Series 6: Economics]. 2016. No. 3. P. 143 (in Russian).

Strategic Planning of Municipal Education Development in Modern Conditions (on the Example of the City of Volgodonsk)

D.G. Khukhlaev¹, V.E. Dovbysh²

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

¹ORCID iD: 0000-0003-4035-3102

e-mail: omega356@yandex.ru

²ORCID iD: 0000-0002-8532-077X

e-mail: VEDovbysh@mephi.ru

Abstract – The article considers the issues of building an effective balanced strategy for the development of a municipal entity in the conditions of factors characteristic of the territories of nuclear power facilities. As an example, the city of Volgodonsk is chosen, where the parts of divisions of State Corporation Rosatom are represented. Within the framework of the study, a range of problematic aspects of the strategic planning of the municipality is determined: the need to allocate projects of an economic orientation, drawing up a hierarchy of projects within the framework of the strategic development of the city, the criticality of the issue of financing these projects, etc. The authors made conclusions and suggestions regarding the principles of planning the strategic development of the municipality on the example of the city of Volgodonsk. The role and mutual influence of the strategic development of the city of Volgodonsk with the stable functioning of nuclear industry enterprises is determined.

Keywords: strategic management, strategic planning, city development strategy, ensuring the functioning of nuclear industry enterprises.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Адаменков А.К.	68
Аксенова К.С.	7
Аль-Шамайлах А.И.	62
Беляков А.А.	52
Бубликова И.А.	7
Вертакова Ю.В.	75
Веселова И.Н.	68
Вольман М.А.	52
Галковская В.Е.	75
Герасимов С.И.	17
Герасимова Р.В.	17
Головко М.В.	75
Губеладзе А.Р.	25
Губеладзе О.А.	25
Джарум Б.	62
Довбыш В.Е.	85
Ерофеев В.И.	17
Зимин В.Г.	62
Иванова Н.Б.	52
Костин В.И.	17
Косяк Е.Г.	17
Кузнецов П.Г.	17
Плотников Д.А.	37
Семенов А.А.	62
Семенов В.К.	52
Сетраков А.Н.	75
Соловьёв Д.А.	62
Танаш Х.А.	62
Хухлаев Д.Г.	85
Цуверкалова О.Ф.	7
Щукин Н.В.	62

AUTHOR INDEX OF VOL. 3, 2021

Adamenkov A.K.	68
Aksenova K.S.	7
Al-Shamayleh A.I.	62
Belyakov A.A.	52
Bublikova I.A.	7
Djaroum B.	62
Dovbysh V.E.	85
Erofeev V.I.	17
Galkovskaya V.Y.	75
Gerasimov S.I.	17
Gerasimova R.V.	17
Golovko M.V.	75
Gubeladze A.R.	25
Gubeladze O.A.	25
Ivanova N.B.	52
Khukhlaev D.G.	85
Kostin V.I.	17
Kosyak V.I.	17
Kuznetsov P.G.	17
Plotnikov D.A.	37
Schukin N.V.	62
Semenov A.A.	62
Semenov V.K.	52
Setrakov A.N.	75
Solovyev D.A.	62
Tanash H.A.	62
Tsuverkalova O.F.	7
Vertakova Yu.V.	75
Veselova I.N.	68
Volman M.A.	52
Zimin V.G.	62

NOTES FOR AUTHORS

The full text of article intended for publication should be signed by authors, it has to be followed by a certificate of material verification through the anti-plagiarism program (permissible borrowing and self-citation - no more than 20%), an application from the institution in which the work was performed, and an expert resolution on publication possibility.

One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title in Russian and English;
- the structured abstract (200-250 words) in Russian and English;
- 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 and E-mail address, contact phone number);
- 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.

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 by e-mail **oni-viti@mephi.ru**:

- an article file in Word format;
- the same file in pdf format signed by the author;
- a certificate of material verification for anti-plagiarism
- an application from the institution where the work is made;
- an 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 konstruktov. [Explosive experiment techniques for research of mechanical firmness of designs]. Sarov. FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2007. 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 izlucheniym [Research of features of initiation are photosensitive explosive structures incoherent radiation] [Works of the International conference «16 Haritonov's scientific readings»]. Sarov. FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2014. P. 90-93 (in Russian).

For materials of conferences (foreign references):

- [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

Полный текст статьи, предназначенной для опубликования, должен быть подписан авторами, сопровождаться справкой о проверке материала через программу антиплагиата (допустимые заимствования и самоцитирование – не более 20%), представлением от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертным заключением о возможности опубликования.

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

- индекс УДК;
- название на русском и английском языках;
- структурированная аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках;
- ключевые слова (не менее 10-и речевых единиц) на русском и английском языках;
- список литературы на русском и английском языках;
- сведения об авторах (ФИО, место работы, должность, ученая степень, звание, электронный адрес, телефон) на русском и английском языках;
- 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. Желательный 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.

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 2017 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 по электронной почте **oni-viti@mephi.ru**:

- файл со статьей в формате Word;
- этот же файл в формате pdf с подписью авторов;
- справка о проверке материала на антиплагиат;
- представление от учреждения, в котором выполнена работа;
- 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 в статье 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 в статье с более четырех 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. Приемопередающее 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:

347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94. Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность», e-mail: **oni-viti@mephi.ru**, тел.: +79281883628, Лобковская Надежда Ивановна

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2021, 3(40)

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

Сдано в набор 08.09.2021 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 16.09.2021 г.

Бумага «Снегурочка» 80 г/м². Объем 6,33 печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ

В 2021 году отмечается 75-летний юбилей

профессора, доктора технических наук

Шпицера Владимира Яковлевича



Владимир Яковлевич в 1969 году окончил Воронежский государственный университет по специальности – физика и около десяти лет работал в институте Ядерной физики при Томском политехническом институте. Огромный практический опыт в проведении научных и опытно-конструкторских работ был приобретен Владимиром Яковлевичем в Волгодонском филиале научно-исследовательского и проектно-конструкторского института атомного машиностроения, где он проработал более

восемнадцать лет. На основе результатов его исследований были созданы инженерные методики обоснования радиационной безопасности проведения демонтажных работ на АЭС. В 2004 году Шпицер В.Я. защитил докторскую диссертацию на тему «Динамические модели деградации оборудования атомных станций на этапах эксплуатации и вывода из эксплуатации».

Научные интересы Владимира Яковлевича отразились и на его преподавательской деятельности в ВИТИ НИЯУ МИФИ. Он разработал и читает на высоком профессиональном уровне цикл лекций по профильным дисциплинам студентам атомных и энергетических специальностей.

Коллектив ВИТИ НИЯУ МИФИ поздравляет Владимира Яковлевича с юбилеем и желает ему крепкого здоровья, творческих удач и семейного благополучия!



Ресурсный центр Госкорпорации «Росатом» - НИЯУ МИФИ

**проводит практико-ориентированную подготовку
иностранных студентов, обучающихся в российских
университетах, в условиях наукоемкого и
высокотехнологичного производства атомной отрасли.**

**Занятия проводятся на ведущих предприятиях
Госкорпорации «Росатом» в городе Волгодонске**

Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск



Изучение конструкции
оборудования АЭС на
полномасштабных
образцах



**Учебно-тренировочное
подразделение Ростовской**



Проведение
неразрушающих
видов контроля на
корпусе реактора



**Виртуальные 3-D комплексы
энергблока АЭС**



Приглашаем на следующие программы в Ресурсном центре:

- **Обучение персонала зарубежных АЭС**, подготовка иностранного персонала по надзору, контролю изготовления и приемке продукции для строящихся АЭС с проведением сертификации;
- **Адаптация процедуры подготовки на должность**, в соответствии с утвержденным штатным расписанием АЭС для иностранных студентов.
- **Технические туры** иностранных студентов.

Занятия проводятся на русском/английском языках

КОНТАКТЫ: ул. Ленина, д. 73/94, г. Волгодонск, Ростовская область,
Россия 347360 8(8639) 22-57-64 • www.viti-mephi.ru • viti@mephi.ru