

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2020, 1(34)

Founded in November, 2011

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

Quarterly

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial Staff:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address:

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia

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

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

Press address:

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

Moscow

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2020, 1(34)

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

Журнал включен в перечень ВАК РФ (№ 759)

Группы научных специальностей:

05.14.00 – Энергетика;

05.26.00 – Безопасность деятельности человека;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление.

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

Главный редактор:

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

Редакционная коллегия:

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

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

Денис Флори, заместитель генерального директора МАГАТЭ (Австрия)

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

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

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

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

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

С.Э. Гоок, к-т техн. наук (Германия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

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

Москва

CONTENTS

2020, 1(34)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

The Determination of Shock Accelerations on a Small Nuclear Power Plant Structural Elements When Falling to the Surface <i>O.A. Gubeladze, A.R. Gubeladze</i>	7
Characteristics of Photon Radiation Fields in Iron for Photon Sources with Energies from 10 to 50 MeV <i>I.K. Alhagaish, V.V. Smirnov, V.K. Sakharov</i>	17
Determination of Transport Packaging Kit Speed before Impact with a Rigid Barrier During Emergency Impact Tests on the Missile Track <i>S.I. Gerasimov, V.I. Erofeev, V.A. Kikeev, O.V. Krivosheev, V.I. Kostin, I.A. Odzeriho, R.V. Gerasimova, A.A. Glukhov, V.V. Pisetskiy</i>	26

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

Effective Increasing of NPP Reliability Introducing the Active Monitoring System of Block Construction Stress-Strain State <i>A.A. Zemlyanskij, V.P. Grigorenko, K.A. Zemlyanskij, S.A. Dubnov</i>	38
Technology Optimization for Producing 110G13P Powder Steel by System Analysis Methods <i>N.S. Zubenko, E.A. Tselik, R.V. Pirozhkov</i>	48
Full-Bridge Converter with Soft Commutation in All Load Range <i>S.A. Baran, G.P. Smetankin</i>	56

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Uncertainty in Calculation Due to «Instantaneous» Emergency Situations in WWER-1000 <i>D.A. Amer, S.P. Nikonov</i>	62
Regulatory Works of MP-1000 Fuel Overloading Machine Adjustment at the Preventive Maintenance Stage <i>Yu.I. Pimshin, V.A. Naugolnov, I.Yu. Pimshin</i>	73
The Conception of NPP Equipment Monitoring Based on Nonparametric Statistics and Trained Neural Network <i>V.V. Krivin, V.Ya. Shpicer, V.G. Beketov, I.O. Ishigov, V.A. Tolstov</i>	81
Usage of Natural Uranium in Nuclear Reactors <i>A.V. Goncharuk</i>	90

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

Synchronization of Industrial Higher Education Institution Objectives with Strategy of «Rosatom» State Corporation Development as Nuclear Energy Safety Factor <i>V.A. Rudenko, M.V. Golovko, S.A. Tomilin, O.F. Tsuverkalova</i>	98
Evaluation of the Deployment Results of the Rosatom Production System and the Opportunity to Extrapolate Lean Technologies to the Social Sphere <i>I.A. Ukhulina, S.P. Agapova, N.A. Efimenko</i>	107
Issue of Innovative Potential of Students of Industrial Universities – «Rosatom» State Corporation Partners <i>N.I. Lobkovskaya, A.V. Zheleznyakova, A.N. Nedorubov</i>	116
Electronic Training Technology on Mathematics of Students Oriented to Work in Nuclear Industry <i>N.P. Vasilenko, N.I. Chabanova</i>	125
Author Index of vol. 1, 2020	137

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 1(34), 2020

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Определение ударных ускорений на элементах конструкции малогабаритной ядерной энергетической установки при ее падении на поверхность

О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе7

Характеристики полей фотонного излучения в железе для источников фотонов с энергиями от 10 до 50 МэВ

И.Х. Альхагаиш, В.В. Смирнов, В.К. Сахаров17

Определение скорости транспортного упаковочного комплекта перед соударением с жёсткой преградой при аварийных испытаниях на ракетном треке

С.И. Герасимов, В.И. Ерофеев, В.А. Кикеев, О.В. Кривошеев, В.И. Костин, И.А. Одзерихо, Р.В. Герасимова, А.А. Глухов, В.В. Писецкий26

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

Эффективное повышение уровня надежности АЭС за счет введения системы активного мониторинга напряженно-деформированного состояния строительных конструкций энергоблока

А.А. Землянский, В.П. Григоренко, К.А. Землянский, С.А. Дубнов38

Оптимизация технологии получения порошковой стали 110Г13П методами системного анализа

Н.С. Зубенко, Е.А. Цвелик, Р.В. Пирожков48

Полномостовой преобразователь с мягкой коммутацией во всем диапазоне нагрузки

С.А. Баран, Г.П. Сметанкин56

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Неопределенность в расчетах из-за «мгновенных» аварийных ситуаций на ВВЭР-1000

Д.А. Амер, С.П. Никонов62

Регламентные работы по наладке машины перегрузки топлива МП-1000 на этапе планово-предупредительного ремонта

Ю.И. Пимишин, В.А. Наугольников, И.Ю. Пимишин73

Концепция мониторинга оборудования АЭС на основе непараметрической статистики и обученной нейросети

В.В. Кривин, В.Я. Шпицер, В.Г. Бекетов, И.О. Ишигов, В.А. Толстов81

Возможности по использованию природного урана в качестве топлива для ядерных реакторов <i>А.В. Гончарук</i>	90
--	----

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

Синхронизация задач отраслевых вузов со стратегией развития ГК «Росатом» как фактор обеспечения безопасности атомной энергетики <i>В.А. Руденко, М.В. Головкин, С.А. Томилин, О.Ф. Цуверкалова</i>	98
---	----

Оценка результатов развертывания ПСР и возможности экстраполяции бережливых технологий на социальную сферу <i>И.А. Ухалина, С.П. Агапова, Н.А. Ефименко</i>	107
--	-----

К вопросу об инновационном потенциале студентов отраслевых вузов – партнеров ГК «Росатом» <i>Н.И. Лобковская, А.В. Железнякова, А.Н. Недорубов</i>	116
---	-----

Технология электронного обучения в математической подготовке студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли <i>Н.П. Василенко, Н.И. Чабанова</i>	125
---	-----

Авторский указатель номера 1(34), 2020	136
--	-----

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 539.2/6:623.45:662.22

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНЫХ УСКОРЕНИЙ НА ЭЛЕМЕНТАХ
КОНСТРУКЦИИ МАЛОГАБАРИТНОЙ ЯДЕРНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ЕЕ ПАДЕНИИ НА
ПОВЕРХНОСТЬ**

© 2020 О.А. Губеладзе, А.Р. Губеладзе

Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия

В статье проводится исследование одного из этапов развития аварийной ситуации с межконтинентальной баллистической ракетой, сопровождающейся взрывом носителя, выбросом головной части из шахты и последующим ее падением. Выполнено моделирование соударения головной части со слабodeформируемой преградой при падении, проведен анализ результатов расчета и эксперимента.

Ключевые слова: межконтинентальная баллистическая ракета, шахтная пусковая установка, головная часть, слабodeформируемая преграда, ударное ускорение.

Поступила в редакцию 29.11.2019

После доработки 03.02.2020

Принята к публикации 10.02.2020

Основной целью обеспечения безопасности на этапе эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО) является принятие эффективных мер, направленных на предотвращение тяжелых аварийных ситуаций (АС). Определение слабых мест этого объекта и формулировка основных принципиальных решений по повышению безопасности осуществляется на основе результатов вероятностного анализа для ЯРОО. Перечень АС, составленный с учетом видов опасностей ядерного оружия (ЯО) [1], значения характеристик внешних воздействующих факторов в моделях аварийных ситуаций определяются с учетом опыта эксплуатации ЯРОО, а также выполненных исследований (экспериментальных и теоретических работ) их безопасности [2]. К настоящему времени широко известно о многочисленных авариях и катастрофах, связанных с ядерным оружием, среди которых особый интерес представляет связанная с взрывом компонентов топлива ракеты с ядерной головной частью (ГЧ). Рост температуры и давления в стволе шахты [3, 4] могут привести к выбросу ГЧ с последующим ее падением.

В 1980 году в шахте взорвалась межконтинентальная баллистическая ракета (МБР) «Титан-2» (США) [5]. Утром 19 сентября 1980 года произошёл взрыв компонентов топлива ускорителя первой ступени МБР, ударная волна вырвала закрытую крышу массой 740 тонн железобетонного защитного устройства шахты (рис. 1). Ускоритель второй ступени вместе со штатной ГЧ Mk.6 с ядерным боеприпасом (ЯБП) W53 были выброшены из шахты. В результате взрыва второй ступени ГЧ (масса – 3690 кг) была подброшена в воздух на 200 метров и упала в 30 метрах от строительного сооружения [6]. Следует отметить, что в СССР также происходили взрывы жидкостных ракет в шахтных пусковых установках, но во всех случаях носители были без ГЧ, которые на время проведения регламентных работ (технического обслуживания) отстыковывались [7, 8]. В подавляющем большинстве

АС, связанных с взрывом носителей ЯО в шахтных пусковых установках, инициирующим событием являлись ошибочные действия персонала.

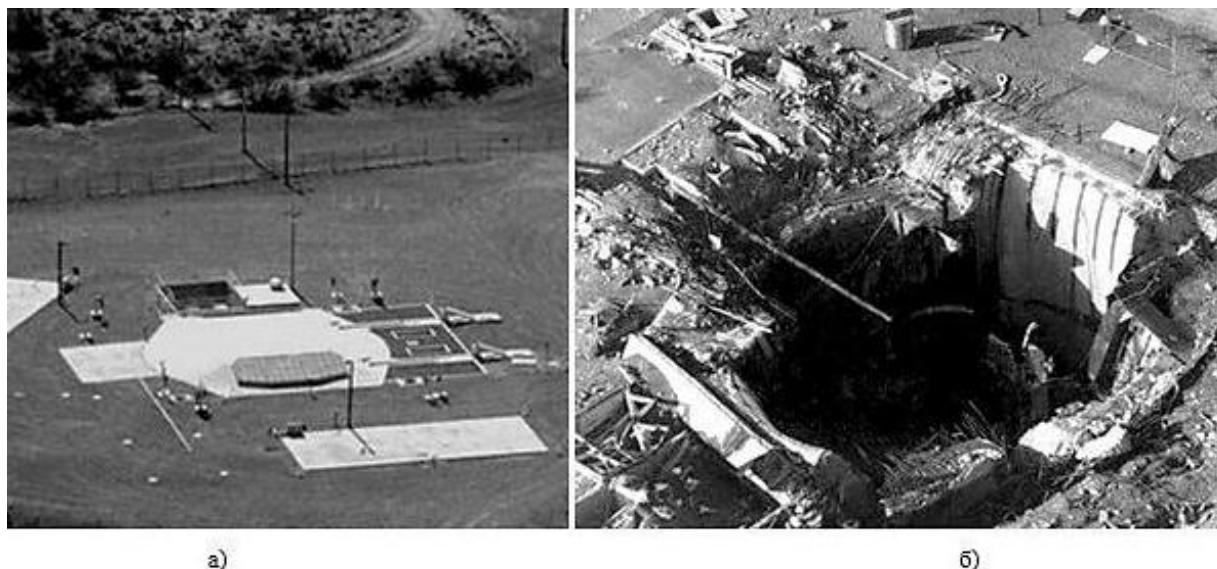


Рисунок 1 – Стартовая позиция межконтинентальной ракеты «Титан-2» (США): а) – до аварии; б) – после взрыва МБР [The starting position of the Intercontinental missile «Titan-2» (USA) a) – before the accident; b) – after the explosion of ICBM]

Для исследования соударения ЯРОО со слабodeформируемой преградой при падении из перечня возможных этапов развития АС [9] выбраны представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Этапы развития аварийной ситуации [The stages of emergency situation development]

№ этапа	Этап	Перечень параметров вторичных воздействий
Э-6	Взрыв ракетного топлива	температура, давление; продолжительность воздействия; скорость выброса ГЧ из шахты ПУ
Э-2	Удар ГЧ о поверхность (преграду)	скорость удара; характеристики преград
Э-13	Взрыв, сгорание	

Проведем моделирование взаимодействия (соударения) объекта со слабodeформируемой преградой (поверхностью) при его падении. Используем математическую модель, приведенную в монографии [10], проведя ее уточнение. Рассмотрим свободное падение объекта по нормали к поверхности. При решении контактной динамической задачи по определению сил, действующих в зоне контакта объекта и преграды, исходим из допущения, что кинетическая энергия падающего объекта в основном перейдет в тепловую энергию удара и потенциальную энергию деформации преграды (условие не разрушения конструкции при падении). Потенциальной энергией упругой деформации конструкции пренебрегаем. В этом случае перегрузка в центре масс (координата X) изделия получится несколько завышенной. На рисунке 2б также представлены: l – общая длина объекта и R – радиус притупления носка. Также примем допущения: форма той части поверхности объекта, которая встречается с преградой, близка к сферической; ось симметрии объекта при соударении нормальна к поверхности преграды; радиус притупления равен X ; движение в области преграды происходит в вертикальной плоскости; скорость встречи объекта с преградой существенно меньше скорости распространения упругих волн в

области преграды. Расчетная схема, выбранная с учетом принятых допущений, представлена на рисунке 2в.

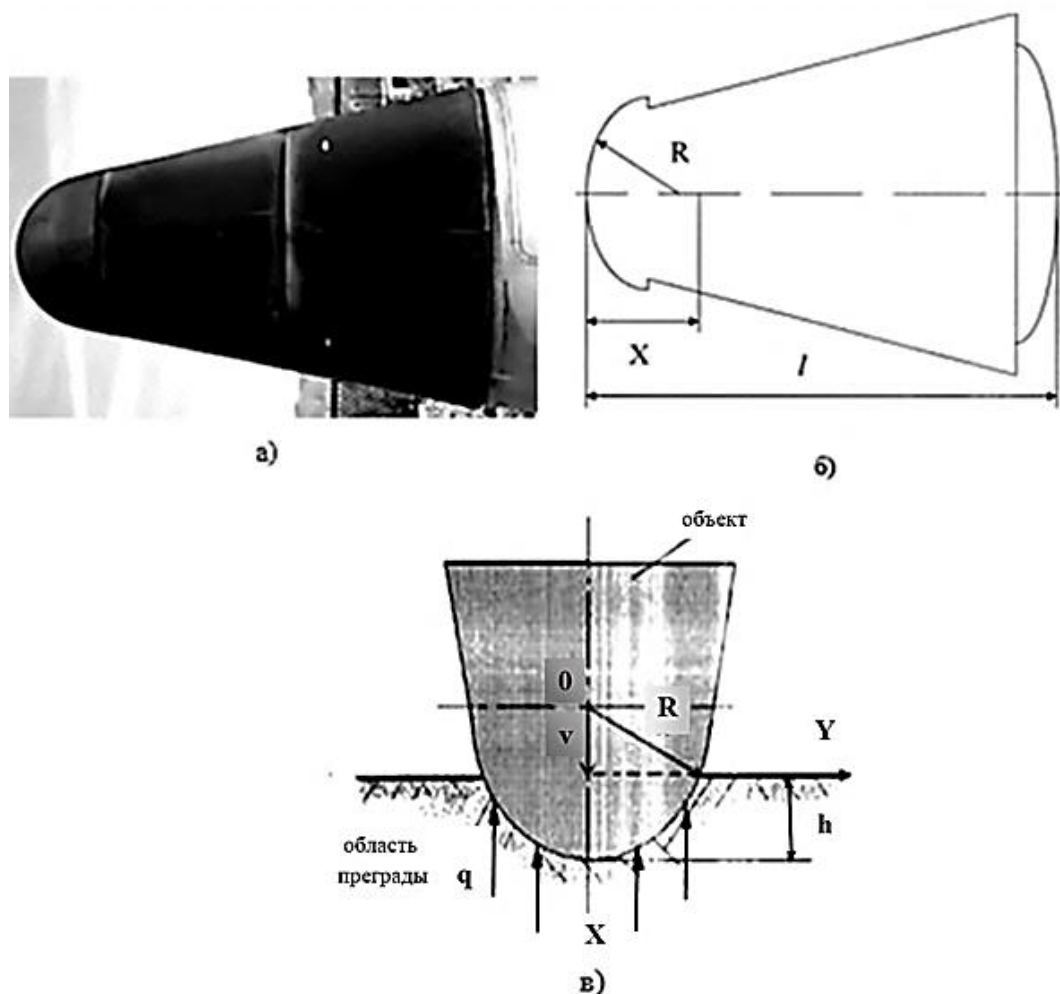


Рисунок 2 – Объект исследования: а) – общий вид; б) – основные геометрические параметры; в) – расчетная схема [Object of research a) – general view; b) – basic geometric parameters; c) – calculation scheme]

При составлении уравнения движения объекта в области преграды для случая, когда вектор скорости направлен перпендикулярно к плоскости поверхности падения, предположим, что вертикальная составляющая реактивного давления со стороны преграды на поверхность контакта постоянна и равна q , причем интенсивность этого давления зависит от скорости движения изделия в области преграды. Уравнение равновесия сил в направлении вертикальной оси изделия будет иметь вид:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} + N(v) - G = 0, \quad (1)$$

где m , G – масса и сила тяжести объекта;

v – скорость движения в области преграды;

$N(v) = \pi r^2 q$, – равнодействующая сила реакции преграды;

r – радиус лунки.

Если глубина лунки h по сравнению с радиусом поверхности контакта объекта небольшая, то:

$$r^2 = 2Rh. \quad (2)$$

Удельное давление q будет пропорционально второй степени скорости движения v :

$$q(v) = q_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2. \quad (3)$$

Здесь q_0 – наибольшее удельное давление со стороны преграды при вдавливании в него круглого штампа; v_0 – начальная скорость входа изделия в преграду. Тогда

$$m \frac{dv}{dt} + 2\pi R q_0 \left(\frac{v}{v_0} \right) h - G = 0. \quad (4)$$

Из соотношения $\frac{dh}{dt} = v$

$$h = \int_0^t v dt + C. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (4) (с учетом, что в начальный момент времени $h = 0$, то и $C = 0$), получим формулу движения объекта в области преграды:

$$m \frac{dv}{dt} + 2\pi R q_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \int_0^t v dt - G = 0. \quad (6)$$

Уравнение (3) решается приближенно [11,12] с учетом

$$v = v_0 \cos^2 \frac{\pi t}{2t_0}, \quad (7)$$

где t_0 – время движения объекта в области преграды до остановки.

Тогда ускорение:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{\pi v_0}{2t_0} \sin \frac{\pi t}{2t_0}. \quad (8)$$

Интеграл в выражении (6):

$$\int v dt = v_0 \int \cos^2 \frac{\pi t}{2t_0} dt = \frac{1}{2} v_0 \left(t + \frac{t_0}{\pi} \sin \frac{\pi t}{t_0} \right). \quad (9)$$

Выражения (7), (8) и (9) подставим в (6) и решим, используя способ ортогонализации:

$$\int_0^{t_0} \left[-\frac{\pi m v_0}{2t_0} \sin \frac{\pi t}{t_0} + \pi R q_0 v_0 \left(t + \frac{t_0}{\pi} \sin \frac{\pi t}{t_0} \right) \cos^4 \frac{\pi t}{2t_0} - G \right] \cos^2 \frac{\pi t}{2t_0} dt = 0. \quad (10)$$

Выражение для определения времени t_0 будет иметь вид:

$$t_0 = \frac{0,713G}{Rq_0 v_0} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4Rq_0 v_0^2}{1,43Gg}} \right), \quad (11)$$

где g – ускорение свободного падения.

Максимальное значение перегрузки в центре масс объекта

$$n_{\max} = \frac{a_{\max}}{g} = - \frac{\pi Rq_0 v_0^2}{1,43Gg \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4Rq_0 v_0^2}{1,43Gg}} \right)}. \quad (12)$$

Если пренебречь в уравнении (6) влиянием силы тяжести и принять $G = 0$, то оно примет вид:

$$m \frac{dv}{dt} + \frac{2\pi Rq_0}{v_0^2} v^2 h = 0. \quad (13)$$

Проведем замену переменных, тогда $v \frac{dv}{dh} + \frac{2\pi Rq_0}{mv_0^2} v^2 h = 0$ или $\frac{d}{dh} \left(\frac{v^2}{2} \right) + av^2 h = 0$,
где $a = \frac{2\pi Rq_0}{mv_0^2}$.

Обозначив $z = \frac{v^2}{2}$, запишем

$$\frac{d}{dh} \left(\frac{v^2}{2} \right) + av^2 h = \frac{dz}{dh} + 2azh = 0. \quad (14)$$

Разделим переменные и, интегрируя, получим:

$$z = C \cdot \exp(-ah^2), \quad (15)$$

где C – постоянная интегрирования. Если $h=0$, то $z = v_0^2$, тогда $z = v_0^2 \cdot \exp(-ah^2)$.

Значение перегрузки в центре масс объекта будет $n = \frac{a}{g} = \frac{\frac{dv}{dt}}{g}$, но
 $\frac{dv}{dt} = v \cdot \frac{dv}{dh} = \frac{dz}{dh}$, тогда:

$$n = \frac{a}{g} = \frac{\frac{dv}{dt}}{g} = - \frac{av_0^2}{g} h \exp(-ah^2). \quad (16)$$

Наибольшее значение перегрузки находим из условия $\frac{dn}{dh} = 0$. Глубина лунки, соответствующая максимальному значению перегрузки
 $\frac{dn}{dh} = \frac{av_0^2}{g} \exp(-ah^2) (2ah^2 - 1) = 0$,

$$h = \frac{1}{\sqrt{2a}}. \quad (17)$$

Тогда:

$$n_{\max} = -1,075 \frac{v_0}{g} \sqrt{\frac{Rq_0}{m}}. \quad (18)$$

Из формулы (18) видно, что величина перегрузки зависит от радиуса оболочки изделия, его массы и механических свойств преграды. Интенсивность удельного давления со стороны преграды на проникающую лобовую часть изделия и величина радиуса лунки при наибольшей перегрузке, будут равны:

$$q = q_0 \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 = q_0 \exp(-ah^2) = \frac{q_0}{\exp(0,5)}, \quad (19)$$

$$r = \sqrt{2Rh} = \sqrt{v_0 \sqrt{\frac{mR}{\pi q_0}}}. \quad (20)$$

Для приближенных прочностных расчетов характеристики различных преград можно получить следующим образом, так как поверхность контакта объекта имеет форму, близкую к сферической, то осадка поверхности преграды при проникновении в нее круглого штампа определяется по формулам:

$$\text{– в центре лунки} \quad h_1 = 1,13(1 - \mu^2) \sqrt{F} \frac{q_0}{E}, \quad (21)$$

$$\text{– на границе} \quad h_2 = 0,72(1 - \mu^2) \sqrt{F} \frac{q_0}{E}. \quad (22)$$

Здесь F – площадь поперечного сечения штампа;
 μ – коэффициент Пуассона материала преграды;
 E – модуль упругости преграды.

Из формул (21) и (22) можно получить усредненное значение осадки преграды:

$$h_{cp} = \frac{1}{2}(h_1 + h_2) = 0,925(1 - \mu^2) \sqrt{F} \frac{q_0}{E}. \quad (23)$$

Формула (23) определяет взаимосвязь между физико-механическими характеристиками грунта и глубиной лунки. С учетом (17) получим выражение для определения q_0 :

$$q_0 = \frac{0,643E^4 \sqrt{a}}{(1 - \mu^2) \sqrt{\pi R a}}. \quad (24)$$

Подставляя (24) в (18) и используя $v_0 = gt$, для определения максимального значения перегрузки получим следующее выражение:

$$n_{\max} = -0,904 \frac{H^{0,6} E^{0,4} R^{0,2}}{(1 - \mu^2)^{0,4} m^{0,4} g^{0,5}}, \quad (25)$$

где H – высота падения объекта.

С целью проверки адекватности расчетной модели была проведена серия экспериментов с использованием стенда [13]. На рисунке 3 представлен массово-габаритный макет (МГМ), масса которого могла изменяться ($m = 247 \div 980$ кг), со сменным носком ($R = 0,1; 0,3; 0,6$ м). На рисунке 4 показан фрагмент экспериментального стенда (вертикальный копр с тросом подвески и замком сброса макета), позволяющий обеспечить высоту сброса МГМ в диапазоне $0,28 \div 4,30$ м на поверхность преграды (бетон, мелкий песок и твердая глина). В испытаниях применялся измерительный комплекс, в который входили: система измерения и регистрации ударных ускорений, состоящая из датчиков ускорения, устанавливаемых на элементах конструкции МГМ, и регистратора; скоростная киносъемка сброса, приземления и отскока МГМ.

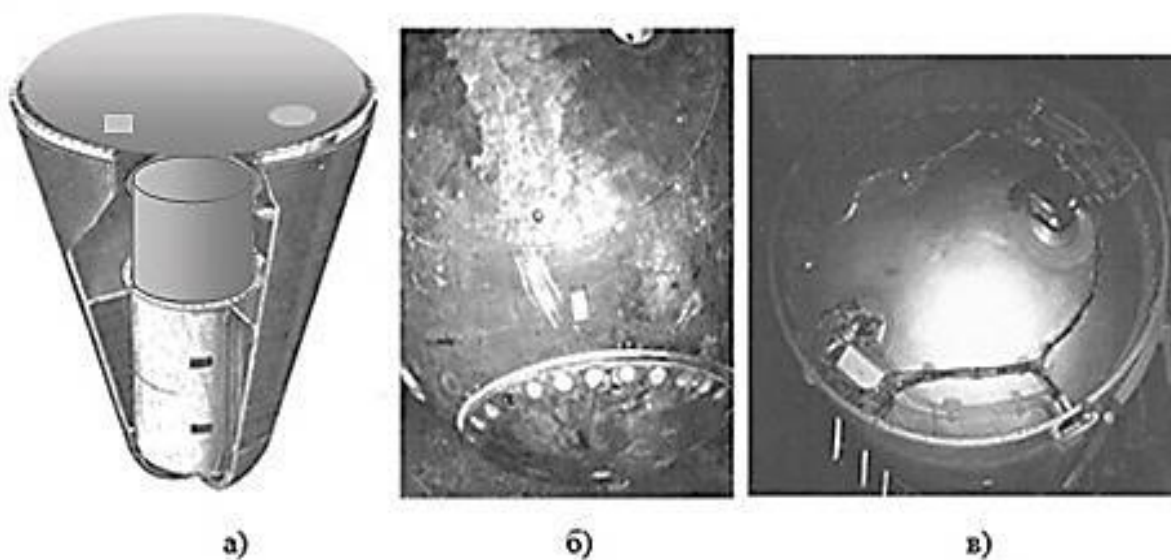


Рисунок 3 – Массово-габаритный макет: а) – компоновочная схема; б) – сменный носок; в) – днище [Mass-dimensional layout a) – Layout diagram; b) – replaceable toe; c) – bottom]



Рисунок 4 – Фрагмент экспериментального стенда [Fragment of the experimental stand]

Результаты экспериментальных исследований и расчетов по формуле (25) для объекта $m = 400$ кг и $R = 0,1; 0,3$ м представлены на рисунке 5.

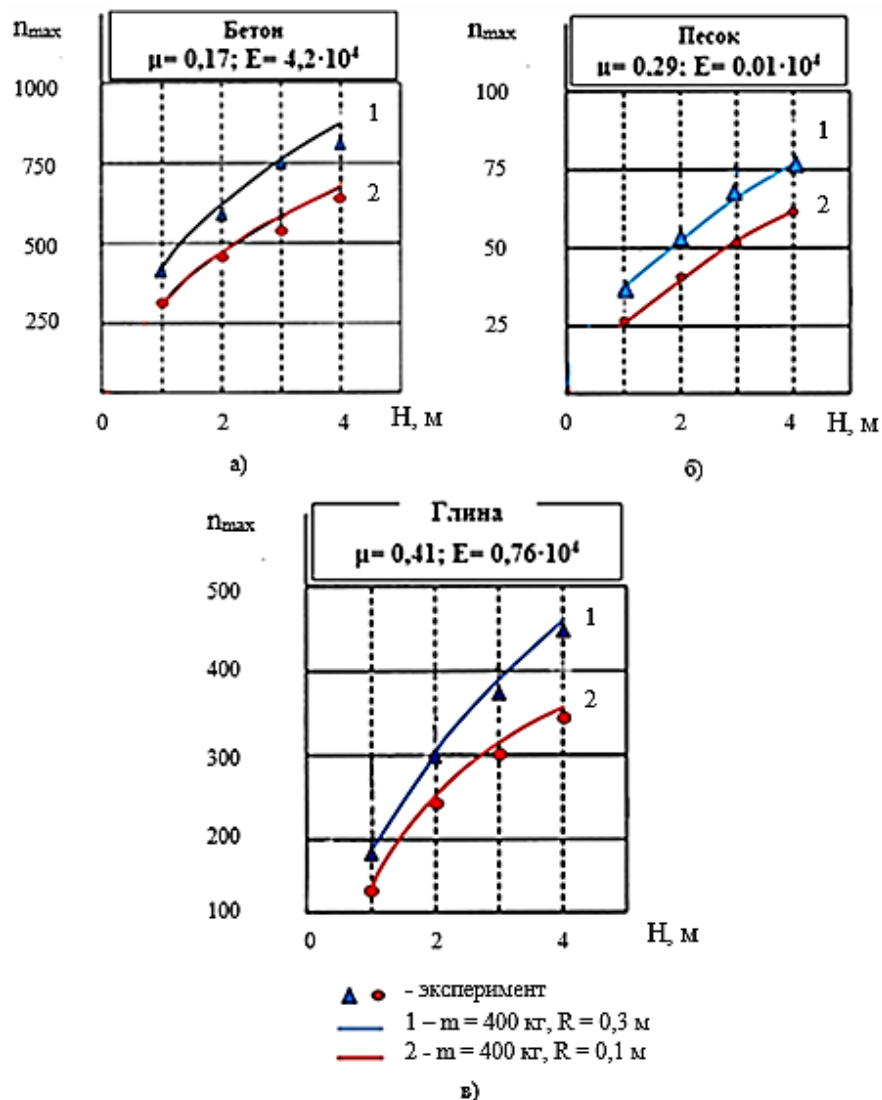


Рисунок 5 – Результаты моделирования падения объекта: а) – на бетон; б) – на мелкий песок; в) – на твердую глину [The results of falling object simulation: a) – concrete; b) – sand; c) – clay solid]

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Расхождение расчетных значений с результатами эксперимента составило: для бетона – до 17%; для песчаной преграды – не более 10%. Бóльшее расхождение для бетонной поверхности обусловлено принятым допущением об условии не разрушения конструкции при падении.

2. Для одной и той же преграды при наименьшей глубине проникновения отмечается наибольшее значение перегрузки в центре масс объекта.

3. Увеличение радиуса носка притупления (при $m = \text{const}$) приводит к росту значений перегрузки.

4. При достижении ударных ускорений на элементах МГМ 160 ед. в зонах крепления грузов отмечались значительные механические повреждения.

5. Результаты расчетов для высот падения 120÷200 метров позволяют прогнозировать полное разрушение конструкции объекта с возможным радиоактивным заражением местности осколками заряда. Однако аварийный взрыв ЯБП маловероятен [5, 10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Губеладзе, О. А. Оценка последствий воздействия кинетических ударников на взрывоопасный объект с малогабаритной ядерной энергетической установкой / О. А. Губеладзе, А. Р. Губеладзе // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3. – С. 33-40.
3. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под редакцией Б. П. Жукова. – Москва : Янус К, 2000. – 483 с.
4. Орленко, Л. П. Физика взрыва и удара / Л. П. Орленко. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 304 с.
5. Кириллов, В. М. Физические основы радиационной и ядерной безопасности / В. М. Кириллов. – Москва : РВСН, 1992. – 212 с.
6. Cochran, Thomas B.; Arkin, William M.; Hoenig, Milton M. Nuclear Weapons Databook, Vol. II: U.S. Nuclear Warhead Production. Cambridge, Mass.: Ballinger Publishing Company, 1987. 240 p.
7. Гуляев, А. А. Герои и жертвы «холодной войны» / А. А. Гуляев // Военно-исторический журнал. – 2014. – № 12. – С.47-54.
8. Малиновский, Г. Н. Записки ракетчика / Г. Н. Малиновский. – Москва : ЦИПК РВСН, 1999. – 207 с.
9. Михайлов, В. Н. Безопасность ядерного оружия России / Под редакцией В. Н. Михайлова. – Москва : Министерство по атомной энергии, 1998. – 148 с.
10. 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.
11. Вайнберг, М. М. Интегро-дифференциальные уравнения / М. М. Вайнберг // Итоги науки. Сер. Мат. анализ. Теор. вероятн. Регулир. – 1962, ВИНТИ, Москва, 1964. – С. 5-37.
12. Buša J., Hnati M., Honkonen J., Lucivjanský T. Numerical Solution of a Nonlinear Integro-Differential Equation. Mathematical Modeling and Computational Physics. Published at: EPJ Web of Conferences 108, 02017 (2016).
13. 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.). – URL : <https://internet-law.ru/gosts/gost/50555/> (дата обращения: 17.07.2019).

REFERENCES

- [1] Gubeladze O.A. Express-otsenka rezul'tatov nereglamentirovannykh destruktivnykh vozdeystviy 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).
- [2] Gubeladze O.A. Otsenka posledstviy vozdeystviya kineticheskikh udarnikov na vzryvoopasnyy ob'ekt s malogabaritnoj yadernoj energeticheskoy ustanovkoj [Assessment of the Influence Consequence of Kinetic Impactors at Explosive Object with Small-Scale Nuclear Power Facility] Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №3 (32). P. 33-40 (in Russian).
- [3] Energeticheskie kondensirovannye sistemy. Kratkiy entsiklopedicheskiy slovar' [The Power Condensed Systems. Short Encyclopedic Dictionary]. Moskva [Moscow]. Yanus K. 2000. 483 p. (in Russian).
- [4] Orlenko L.P. Fizika vzryva i udara [Physics of Explosion and Blow]. Moskva. FIZMATLIT [Moscow. PHIZMATLIT]. 2008. 304 p. (in Russian).
- [5] Kirillov V.M. Fizicheskie osnovy radiatsionnoy i yadernoy bezopasnosti [Physical Bases of Radiation and Nuclear Safety]. Moskva [Moscow]. RVSН. 1992. 212 p. (in Russian).
- [6] Cochran, Thomas B.; Arkin, William M.; Hoenig, Milton M. Nuclear Weapons Databook, Vol. II: U.S. Nuclear Warhead Production. Cambridge, Mass.: Ballinger Publishing Company, 1987. 240 p.
- [7] Gulyaev A.A. Geroi i gertvy «holodnoy vojny» [Heroes and Victims of «the Cold War»] Voenno-istoricheskyy zhurnal [Military Historical Journal]. 2014. № 12. P.47-54 (in Russian).
- [8] Malinovskiy G.N. Zapiski raketchika [Notes of a Rocketeer]. Moskva [Moscow]. CIPK RVSН. 1999. 207 p. (in Russian).

- [9] Mikhaylov V.N. Bezopasnost' yadernogo oruzhiya Rossii [Safety of Nuclear Weapon of Russia]. Moskva. Ministerstvo po atomnoy energii [Moscow. Ministry of Nuclear Energy]. 1998. 148 p. (in Russian).
- [10] Denisov O.V., Gubeladze O.A., Meskhi B.Ch., Bulygin Yu.I. Kompleksnaya bezopasnost' naseleniya i territorij v chrezvy`chajny`x situatsiyax. Problemy` i resheniya: monografiya [Complex Safety of the Population and Territories in Emergency Situations. Problems and Solutions]. Rostov-na-Donu. Izdatel'skij centr DGTU [Rostov-on-Don. Publishing center Don State Technical University]. 2016. 278 p. (in Russian).
- [11] Vainberg M.M. Integro-differentsial'ny`e uravneniya [Integro-Differential Equations]. Itogi Nauki. Ser. Mat. Anal. Teor. Ver. Regulir [The Results of Science. Series Mathematical Analysis Probability Theory Regulation]. 1962. Moskva [Moscow]. VINITI, 1964, pp. 5-37 (in Russian).
- [12] Buša J., Hnati M., Honkonen J., Lucivjanský T. Numerical Solution of a Nonlinear Integro-Differential Equation. Mathematical Modeling and Computational Physics. Published at: EPJ Web of Conferences 108, 02017 (2016).
- [13] 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).

The Determination of Shock Accelerations on a Small Nuclear Power Plant Structural Elements When Falling to the Surface

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 conducts research one of the expansion phase of emergency with an Intercontinental Ballistic Missile, accompanied by an carrier explosion, an ejection of the reentry vehicle from a silo and its subsequent fall. The simulation of the collision of the reentry vehicle with a weakly deformable barrier in the event of fall is performed, the result calculation valuation and experiment are carried out.

Keywords: intercontinental ballistic missile, silo launcher, head part, weakly deformable barrier, shock acceleration.

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 621.039

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕЙ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЖЕЛЕЗЕ
ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ФОТОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ ОТ 10 ДО 50 МэВ**

© 2020 И.Х. Альхагаиш, В.В. Смирнов, **В.К. Сахаров**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

На основе результатов расчетов методом Монте-Карло пространственно-энергетических распределений фотонов в железе от точечных изотропных и плоских мононаправленных моноэнергетических источников с энергиями 10-50 МэВ определены кратности ослабления воздушной кермы и дозовые факторы накопления рассматриваемого материала. В расчетах учтен вклад флюоресцентного, аннигиляционного и тормозного излучений. Показана независимость факторов накопления и кратностей ослабления от углового распределения излучения источника и слабая зависимость кратностей ослабления от его энергии в диапазоне энергий 30-50 МэВ. Определены поправки на барьерность защиты и отмечена их независимость от толщины защиты и энергии фотонов источника. Полученная информация позволяет снизить погрешности результатов расчетов толщины противорадиационной защиты электронных ускорителей на большие энергии, используя развитые инженерные методы расчета. Полученная информация также может быть использована в расчетах защиты от тормозного излучения электронных ускорителей инженерными методами.

Ключевые слова: электронные ускорители, тормозное излучение, защита, дозы, фактор накопления, кратности ослабления, Монте-Карло.

Поступила в редакцию 03.12.2019

После доработки 25.12.2019

Принята к публикации 09.01.2020

Введение

Применение для целей дистанционной лучевой терапии и дефектоскопии линейных электронных ускорителей с энергией первичного электронного пучка в диапазоне до 50 МэВ и повышение требований обеспечения радиационной безопасности персонала и населения вызывают необходимость совершенствования методической базы проектирования защиты таких установок [11]. Важным здесь является получение характеристик ослабления фотонов тормозного излучения используемыми в их защите материалами для этого диапазона энергий с учетом рассеянного излучения. Учет рассеянного излучения в развитых инженерных методах расчета защиты от фотонов обычно проводится использованием факторов накопления и кратность ослабления.

Имеющаяся в литературе информация по прохождению фотонного излучения в различных защитных материалах [1, 2, 5] ограничивается энергиями фотонов источника ниже 15 МэВ. Использование электронных ускорителей в промышленности и медицине с энергией первичного электронного пучка в диапазоне до 50 МэВ приводит к необходимости получить данные по характеристикам ослабления фотонов тормозного излучения для этого диапазона энергий. В качестве защитных материалов от тормозного излучения электронных ускорителей используются бетон, железо и свинец, поэтому целью настоящих исследований было получение характеристик полей фотонного излучения в одном из этих материалов – железе.

Геометрия расчетов и исходные данные

Геометрии рассматриваемых композиций, отличаясь для разных материалов лишь размерами, были одинаковы и приведены на рисунке 1.

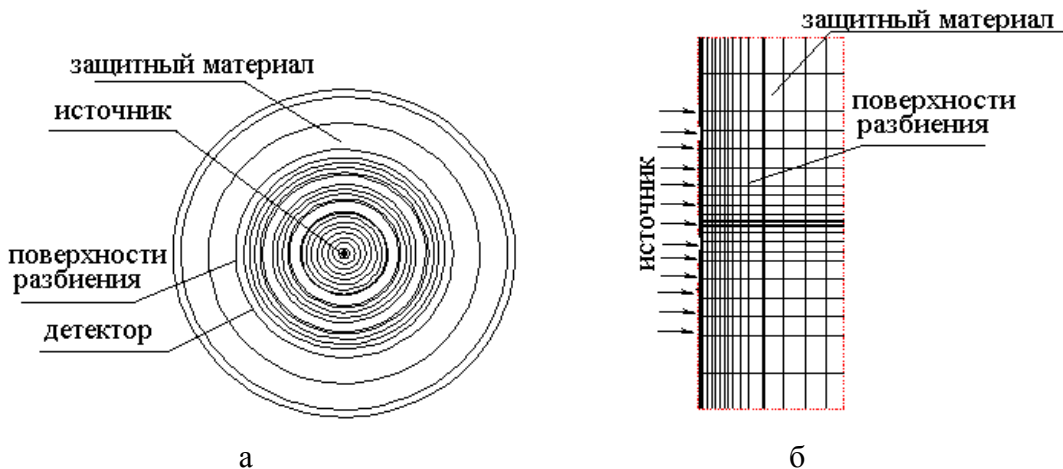


Рисунок 1 – Геометрии рассматриваемых композиций (а – точечный источник, б – мононаправленный источник) [Geometries of the considered compositions (a - point source, b - unidirectional source)]

Для оценки влияния геометрии композиции на характеристики полей фотонов были рассмотрены два случая: сферическая геометрия с точечным изотропным источником в центре сферы и цилиндрическая геометрия с плоским мононаправленным источником, излучение которого падает нормально на торцевую поверхность цилиндра. Размеры защит и расположение точек детектирования выбирались такими, чтобы геометрию можно было рассматривать как бесконечную. Для оценки влияния барьерности защиты на характеристики поля выборочно выполнялись расчеты в барьерной геометрии. Толщина материала составляла 30 длин свободного пробега для энергии фотонов источника. Радиус цилиндрической защиты составлял 300 см для железной. Радиус мононаправленного источника принимался равным 200 см при железной защите.

Исследуемым защитным материалом являлись железо плотностью $7,86 \text{ г/см}^3$. Энергии фотонов источника были выбраны равными 10, 20, 30, 40 и 50 МэВ.

Расчеты характеристик полей фотонов выполнялись методом Монте-Карло по программе FLUKA [3]. Использовались оценка по пересечениям поверхностей, указанных на рисунке 1, располагаемых на различных расстояниях от источника излучения, и локальная оценка потока при точечном изотропном источнике.

В качестве характеристик полей фотонного излучения были приняты мощности поглощенной дозы в воздухе, дозовые факторы накопления и энергетические распределения плотности потока фотонов на различных расстояниях от источника. При этом для мононаправленного источника оценивались средние значения этих характеристик на оси цилиндра. Программа FLUKA вычисляет энергетические распределения плотности потока фотонов в рассматриваемом материале. Эти распределения вычислялись на расстояниях от источника от 0,25 до 30 длин свободного пробега (дсп). При этом для перехода от дсп к истинному расстоянию в линейных размерах использовались массовые коэффициенты ослабления фотонов [1,4]. Переход от энергетических распределений плотности потока фотонов к мощности поглощенной в воздухе дозе проводился на основе удельных дозовых коэффициентов, рассчитываемых по формуле (1):

$$\delta = 10^5 E_\gamma 1,6 \cdot 10^{-13} \mu_{\text{eni}}^m(E_\gamma), \quad \text{сГр см}^2 / \text{фотон}, \quad (1)$$

где E_γ – энергия фотонов, МэВ;

$\mu_{en}^m(E_\gamma)$ – массовый коэффициент поглощения энергии для воздуха для фотонов с энергией E_γ , см²/г;

$1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж/МэВ – коэффициент перехода от Дж к МэВ.

Значения δ для энергии фотонов менее 10 МэВ взяты из работы [3], для больших энергий фотонов рассчитаны по формуле (1) с использованием $\mu_{en}^m(E_\gamma)$, взятых из работы [4].

Полная мощность поглощенной дозы затем вычислялась по формуле (2) с использованием линейной интерполяции:

$$\dot{D} = \int \varphi(E) \delta(E) dE. \quad (2)$$

Получение характеристик полей фотонов при энергии источника 10 МэВ позволяло сравнить полученные в работе результаты с имеющимися литературными данными в литературе [1, 5, 6] и тем самым использовалось для тестирования используемой в работе методики расчета и программного обеспечения как показано в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнения дозовых факторов накопления фотонов в железе для точечного изотропного источника фотонов с энергией 10 МэВ, полученных в настоящей работе и других различных работах [1, 5, 6] [Comparison of dose factors of photon accumulation in iron for a point isotropic source of photons with an energy of 10 MeV obtained in this work and other various works [1, 5, 6]]

μd	Энергия фотонов источника, 10 МэВ				
	Т.и.	[1]	[5]	[6]	П.м.
0,25	1,14				1,16
0,5	1,26	1,19	1,28	1,28	1,27
1	1,49	1,33	1,50	1,51	1,46
2	1,89	1,59	1,87	1,92	1,85
3	2,31	1,86	2,26	2,33	2,25
4	2,76	2,16	2,65	2,76	2,67
5	3,26	2,50	3,09	3,23	3,11
6	3,80	2,87	3,54	3,74	3,59
7	4,38	3,27	4,03	4,28	4,09
8	5,01	3,71	4,57	4,87	4,64
10	6,43	4,69	5,73	6,17	5,83
15	11,0	7,88	9,41	10,3	9,64
20	17,5	12,3	14,5	16	15,2
25	26,3	18,1	20,8	23,5	25,4
30	38,2	25,7	29,2	33,2	

Результаты расчетов для железной защиты

На рисунке 2 для примера представлены рассчитанные пространственные распределения мощности поглощенной дозы в воздухе для железной защиты для двух типов источников при энергии фотонов источников 30 МэВ. Сравнение результатов, умноженных для точечного изотропного источника на $4\pi R^2$, где R – расстояние между источником и детектором, с данными для плоского мононаправленного показало, что пространственные распределения для железа при толщинах до 15 дсп с погрешностью, не превышающей 4% совпадают. Разница на больших толщинах защит, достигающая до 25%, обусловлена статистическими погрешностями результатов для мононаправленного источника.

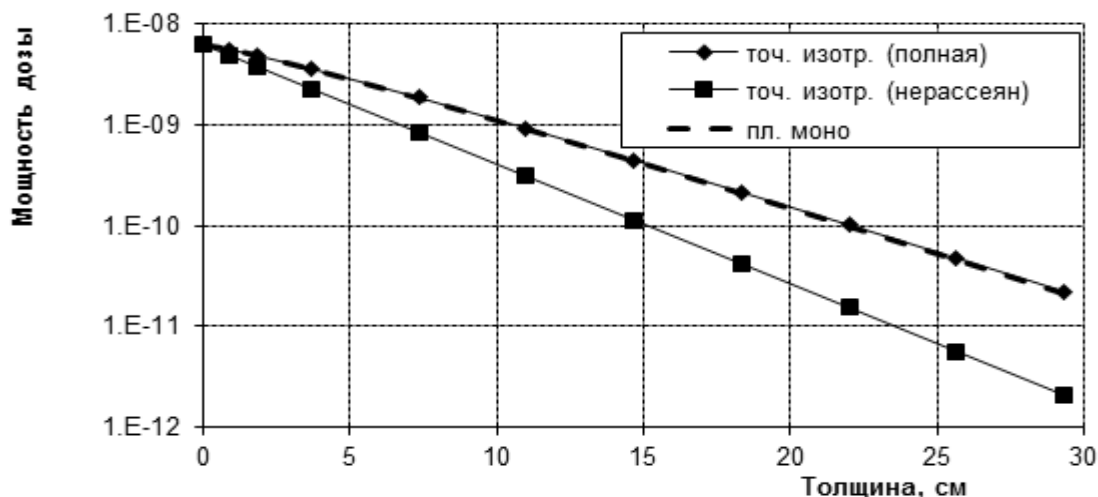


Рисунок 2 – Пространственные распределения мощности поглощенной дозы фотонов в железе на толщинах (0-30) от точечного изотропного мощностью 1 с-1 и плоского мононаправленного мощностью 1 см-2с-1 источников с энергией фотонов 30 МэВ [Spatial power distribution of the absorbed dose of photons in iron at thicknesses (0-30) from a point isotropic power of 1 s-1 and a flat unidirectional power of 1 cm-2s-1 sources with a photon energy of 30 MeV]

При практическом использовании данных по ослаблению фотонов в железе представляется целесообразным использовать дозовые факторы накопления фотонов, которые учитывают отличие характера ослабления от экспоненциального или использовать кратности ослабления мощности поглощенной дозы, приведенные на рисунке 3.

Приведенные данные показывают, что практически во всем диапазоне рассматриваемых толщин железной защиты независимо от энергии фотонов источника кратности ослабления поглощенной дозы не зависят от углового распределения фотонов источника с погрешностью менее 8-12%. Лишь при толщине защиты в 30 дсп разница увеличивается, что объясняется погрешностями расчетов доз для мононаправленного источника. Эти результаты согласуются с результатами, приведенными в литературе [10].

Кратность ослабления

По аналогии с универсальными таблицами Н.Г. Гусева [1] в таблице 2 приведены толщины железа, обеспечивающие заданную кратность ослабления для высокоэнергетичных источников фотонов, позволяющие инженерными методами проводить расчеты защиты электронных ускорителей от тормозного излучения.

Таблица 2 – Толщина железа, обеспечивающая заданную кратность ослабления воздушной кермы фотонов от источников фотонов с различной энергией, см [The thickness of the iron, providing a given ratio of attenuation of the air kerma of photons from sources of photons with different energies, cm]

Кратность ослабления	Энергия, МэВ		
	10	15	20-50
2	4,6	4,4	4,2
5	9,8	9,3	9,2
10	13,7	11,7	13,1
20	16,6	16,3	16,4
50	21,4	21,2	21,1
10^2	24,9	24,2	24,1
$2 \cdot 10^2$	28,2	27,8	27,5
$5 \cdot 10^2$	32,9	32,4	32,1
10^3	36,9	35,4	35,2
$2 \cdot 10^3$	40,1	39,1	38,5
$5 \cdot 10^3$	45,8	43,3	43,1

Продолжение таблицы 2

Кратность ослабления	Энергия, МэВ		
	10	15	20-50
10^4	47,9	46,7	46,5
$2 \cdot 10^4$	51,4	49,9	49,3
$5 \cdot 10^4$	55,1	54,3	53,6
10^5	58,4	57,9	57,7
$2 \cdot 10^5$	61,9	61,2	60,1
$5 \cdot 10^5$	66,5	65,1	64,3
10^6	69,7	68,3	67,2
$2 \cdot 10^6$	72,5	71,6	71,2
$5 \cdot 10^6$	77,3	76,2	75,1
10^7	80,4	79,6	78,6
$2 \cdot 10^7$	83,2	82,3	81,7
$5 \cdot 10^7$	87,7	86,7	85,9
10^8	91,2	89,7	89,1
$2 \cdot 10^8$	94,1	93,2	92,2
$5 \cdot 10^8$	98,2	97,1	96,5
10^9	101,7	100,6	99,5

Зависимость кратности ослабления мощности поглощенной дозы от толщины железа для точечных изотропных источников фотонов разных энергий показана на рисунке 3.

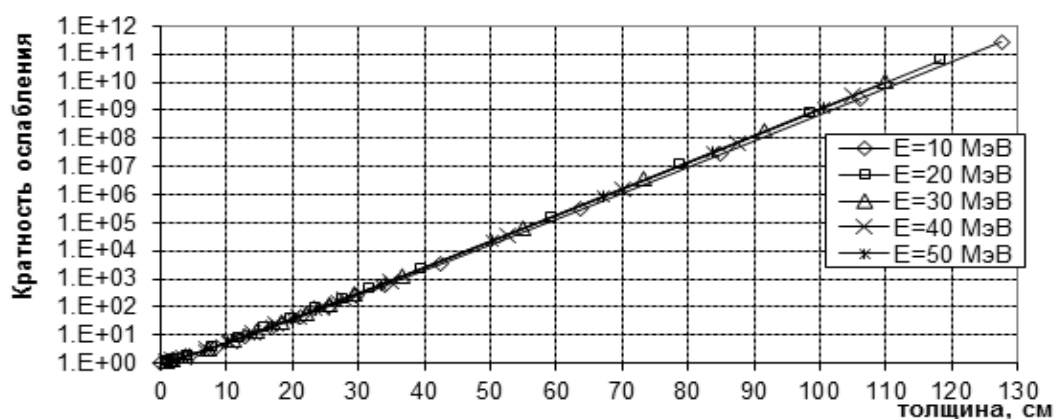


Рисунок 3 – Зависимость кратности ослабления поглощенной дозы в железе от толщины защиты для точечных изотропных источников фотонов с разной начальной энергией [Dependence of the attenuation rate of the absorbed dose in iron on the thickness of protection for point isotropic photon sources with different initial energies]

Можно отметить, что кратность ослабления поглощенной дозы фотонов при энергиях источников от 20 до 50 МэВ практически не зависит от этой энергии, если толщину железа измерять в линейных размерах, а не в длинах свободного пробега фотонов источника. В железе кратность ослабления мощности дозы фотона от источника с энергией 10 МэВ ниже, чем для более высоких энергий источника.

Слои десятикратного ослабления

Часто для расчетов толщины защиты, обеспечивающей заданную кратность ослабления используются значения слоев десятикратного ослабления, при этом часто пренебрегают их зависимостью от толщины защиты. Недопустимость такого подхода демонстрируют приведенные в таблице 3 рассчитанные слои десятикратного ослабления мощности дозы на различных толщинах железной защиты для точечного изотропного источника с разными энергиями фотонов. Анализ приведенных данных показывает, что на первых трех слоях десятикратного ослабления характер ослабления

слабее, чем на последующих, причем наиболее ярко это заметно на отличии первого слоя от остальных. Начиная с толщины слоя в 36 см величина слоя десятикратного ослабления практически не зависит от толщины железной защиты и от энергии фотонов источника. В этом диапазоне она может быть принята равной $10,4 \pm 0,2$ см. В итоге таблица 1 может быть сведена к таблице 4.

Таблица 3 – Слои десятикратного ослабления мощности поглощенной дозы железной защитой, см [Layers of tenfold attenuation of absorbed dose rate by iron shield, cm]

№ слоя	Толщина, см	Энергия источника, МэВ				
		10	20	30	40	50
1	0-14	13,22	12,75	12,8	13,32	13,42
2	14-25	11,64	11,5	11,22	11,45	11,42
3	25-36	11,53	11	11,15	11	11
4	36-48	11	11	10,63	10,4	10,64
5	48-60	11	10,35	10,76	10,81	10,72
6	60-72	10,55	10,64	10,72	10,72	10,75
7-11	72-120	10,45	10,73	10,71	10,62	10,74

Таблица 4 – Усредненные слои десятикратного ослабления мощности поглощенной дозы железной защитой, см [Averaged layers of tenfold attenuation of absorbed dose rate by iron shield, cm]

№ слоя	Толщина, см	Энергия фотонов источника, МэВ 10 - 50
1	0-14	13,3±0,2
2	14-25	11,5±0,2
3	25-36	11,1±0,1
4-11	36-120	10,4±0,2

Дозовые факторы накопления

На основе данных по полной мощности дозы и дозе нерассеянного излучения были рассчитаны дозовые факторы накопления фотонов в железе, приведенные для двух типов источников в таблице 5.

Таблица 5 – Дозовые факторы накопления фотонов для железа для точечного изотропного и плоского мононаправленного источников фотонов с разными энергиями [Dose factors of photon accumulation for iron for point isotropic and planar unidirectional photon sources with different energies]

μd	Энергия фотонов источника, МэВ												
	10					20		30		40		50	
	Т.и.	[1]	[5]	[6]	П.м.	Т.и.	П.м.	Т.и.	П.м.	Т.и.	П.м.	Т.и.	П.м.
0,25	1,14				1,16	1,13	1,15	1,14	1,16	1,15	1,16	1,15	1,16
0,5	1,26	1,19	1,28	1,28	1,27	1,26	1,26	1,28	1,29	1,30	1,31	1,31	1,32
1	1,49	1,33	1,50	1,51	1,46	1,50	1,48	1,57	1,56	1,63	1,62	1,66	1,65
2	1,89	1,59	1,87	1,92	1,85	1,98	1,95	2,21	2,18	2,41	2,38	2,53	2,50
3	2,31	1,86	2,26	2,33	2,25	2,52	2,47	2,99	2,94	3,40	3,35	3,68	3,64
4	2,76	2,16	2,65	2,76	2,67	3,13	3,05	3,94	3,86	4,68	4,59	5,25	5,15
5	3,26	2,50	3,09	3,23	3,11	3,84	3,72	5,13	4,99	6,34	6,18	7,34	7,18
6	3,80	2,87	3,54	3,74	3,59	4,66	4,48	6,59	6,37	8,48	8,22	10,2	9,88
7	4,38	3,27	4,03	4,28	4,09	5,61	5,34	8,41	8,07	11,2	10,8	13,9	13,5
8	5,01	3,71	4,57	4,87	4,64	6,71	6,34	10,6	10,1	14,8	14,2	19,0	18,2
10	6,43	4,69	5,73	6,17	5,83	9,44	8,76	16,8	15,8	25,3	23,8	34,5	32,8
15	11,0	7,88	9,41	10,3	9,64	20,9	18,4	49,8	44,9	90,4	82,3	146	134
20	17,5	12,3	14,5	16	15,2	43,6	33,4	140	122	307	275	588	519
25	26,3	18,1	20,8	23,5	25,4	87,8	89,7	381	349	1009	866	2285	2052
30	38,2	25,7	29,2	33,2		173		1016	549	3242	1979	8685	8937

С ростом энергии фотонов источника факторы накопления возрастают и при длинах свободного пробега 20 дсп увеличиваются с 17 при энергии источника 10 МэВ до 590 для энергии 50 МэВ.

На рисунке 4 сравниваются результаты настоящей работы с данными других авторов.

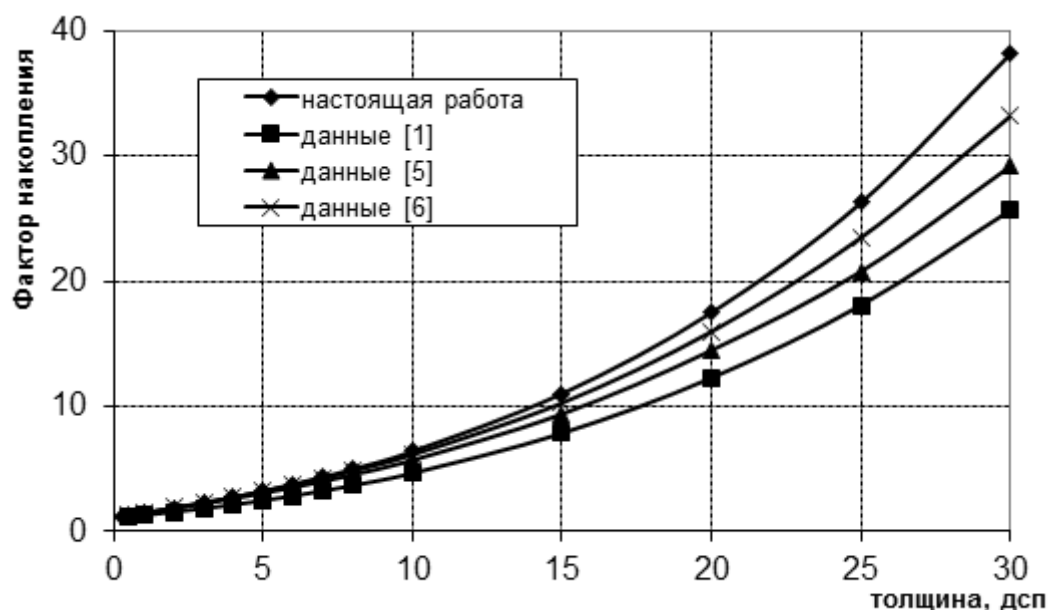


Рисунок 4 – Сравнения дозовых факторов накопления фотонов в железе для точечного изотропного источника фотонов с энергией 10 МэВ, полученных в разных работах [Comparison of dose factors for photon accumulation in iron for a point isotropic source of photons with an energy of 10 MeV obtained in different works]

Сравнение полученных в настоящей работе факторов накопления с аналогичными данными, приведенными в работах [1, 5, 6] для фотонов точечного изотропного источника с энергией 10 МэВ (рис. 4), показало, что результаты, приведенные в работе [5], существенно ниже данных других авторов, и это занижение достигает 40-50% при больших длинах свободного пробега. Разница результатов, полученных в настоящей работе, и данными работы [6] не превышает 15% во всем диапазоне толщин железной защиты. Следует лишь отметить, что полученные в настоящих расчетах результаты дают наибольшие значения по сравнению с данными других авторов.

Выводы

На основе результатов расчетов дозовых характеристик полей фотонов в рассматриваемых материалах в барьерной геометрии при толщинах защиты выше 3 дсп были определены поправки на барьерность защиты в виде отношения факторов накопления в барьерной геометрии к аналогичным в бесконечной среде. В рассматриваемом диапазоне толщин материалов эти поправки не зависят от энергии. Асимптотические слои десятикратного ослабления для железа получены в работах [7, 8] в зависимости от энергии электронов ускорителя. В диапазоне энергий электронов 20-100 МэВ, что соответствует эффективной энергии фотонов тормозного излучения примерно 6-33 МэВ [9], они практически не зависят от энергии электронов. Полученные характеристики ослабления дозы фотонов в различных защитных материалах для источников фотонов с энергиями в диапазоне от 10 до 50 МэВ дополняют отсутствующие, в литературе данные для энергий фотонов источников выше 30 МэВ и обеспечивают более точные оценки требуемой толщины защиты от тормозного излучения электронных ускорителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Машикович, В. П.* Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. Справочник. – Москва : Энергоатомиздат, 1999. – 494 с.
2. Kazuaki Kosako, Koji Oishi, Takashi Nakamura, Kouichi Sato, Takashi Kamiyama, Yoshiaki Kiyonagi. Shielding study on iron and concrete assemblies of bremsstrahlung photons and photoneutrons from copper target bombarded by 18, 28 and 38 MeV electrons. Journal of Nuclear Science and Technology, ISSN: 0022-3131 (Print) 1881-1248.
3. Fasso A., Ferrari A., Sala P. R. Electron-Photon Transport in FLUKA: Status // Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation, and Applications: Proc. of the Monte Carlo 2000 Conf., Lisbon, 2000. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. P. 159-164.
4. *Сторм, Э.* Сечения взаимодействия гамма-излучения / Э. Сторм, Х. Исраэль; пер. с англ.: В. А. Климанова, Е. Д. Чистова. – Москва : Атомиздат, 1973. – 252 с.
5. American National Standard. Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. ANSI/ANS-6.4.3-1991.
6. Ashimizu, T. Onda, Y. Sakamoto. Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, III Generation of Improved Data Set. J. Nucl. Sci. and Technology. Vol. 41. № 4 2004. P. 413-424.
7. *Беспалов, В. И.* Лекции по радиационной защите / В. И. Беспалов. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 348 с.
8. NCRP. Radiation Protection Design Guidelines 1-100 MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP Report № 51. 1977.
9. *СанПиН 2.6.1.2573-10.* Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ. Санитарные правила и нормативы. Москва : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 50 с.
10. *Сахаров, В. К.* Кратности ослабления дозы фотонов в бетоне, железе и свинце для моноэнергетических источников с энергиями от 10 до 90 МэВ / В. К. Сахаров // Ядерная физика и инжиниринг – Т. 7, Вып. 3. – 2016. – С. 268-272.
11. *Сахаров, В. К.* Дозовые факторы накопления в бетоне, железе и свинце для источников моноэнергетических фотонов с энергиями от 10 до 50 МэВ / В. К. Сахаров, А. В. Борисенко // Атомная энергия. – Т. 114, Вып. 6. – 2014. – С. 177-179
12. Yukio Fujita, Hidetoshi SAITOH and Atsushi MYOJOYAMA, J. Bremsstrahlung and Photoneutron Leakage from Steel Shielding Board Impinged by 12-24 MeV Electrons Beams. Radiat. Res. 50. 363-369 (2009).

REFERENCES

- [1] Mashkovich V.P., Kudryavtseva A.V. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniya [Protection against ionizing radiation]. Moskva [Moscow]. Energoatomizdat. 1999. P. 494. (in Russian)
- [2] Kazuaki Kosako, Koji Oishi, Takashi Nakamura, Kouichi Sato, Takashi Kamiyama, Yoshiaki Kiyonagi. Shielding Study on Iron and Concrete Assemblies of Bremsstrahlung Photons and Photoneutrons from Copper Target Bombarded by 18, 28 and 38 MeV Electrons. Journal of Nuclear Science and Technology. ISSN: 0022-3131 (Print) 1881-1248.
- [3] Fasso A., Ferrari A., Sala P. R. Electron-Photon Transport in FLUKA: Status // Advanced Monte Carlo for Radiation Physics, Particle Transport Simulation, and Applications: Proc. of the Monte Carlo 2000 Conf., Lisbon, 2000. Berlin; Heidelberg: Springer, 2001. P. 159-164.
- [4] Storm E., Israel' Kh.. Secheniya vzaimodeystviya gamma-izlucheniya [Cross Sections for the Interaction of Gamma Radiation]. Perevod s anglijskogo [Translated from English] V.A. Klimanova, Ye.D. Chistova Moskva [Moscow]. Atomizdat. P. 1973. 252 (in Russian).
- [5] American National Standard. Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials. ANSI/ANS-6.4.3-1991.
- [6] Ashimizu A., Onda T., Sakamoto Y.. Calculation of Gamma-Ray Buildup Factors up to Depths of 100 mfp by the Method of Invariant Embedding, III Generation of Improved Data Set. J. Nucl. Sci. and Technology. Vol. 41. № 4 2004. P. 413-424.
- [7] Bespalov V.I. Lektsii po radiatsionnoy zashchite [Lectures on radiation protection]. Tomsk. Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Tomsk: Publishing House of the Tomsk Polytechnic University]. 2011. P. 348 (in Russian).
- [8] NCRP. Radiation Protection Design Guidelines 1-100 MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP Report № 51. 1977.
- [9] Gigiyeicheskiye trebovaniya o razmeshchenii i ekspluatatsii uskoriteley elektronov s energiyey do 100 MeV [Hygienic Requirements for the Placement and Operation of Electron Accelerators with Energies up to 100 MeV]. SanPin 2.6.1.2573-10, 2010 (in Russian).

- [10] Sakharov V.K. Kratnosti oslableniya dozy fotonov v betone, zheleze isvintse dlya monoenergeticheskikh istochnikov s energiyami ot 10 do 90MeV [Multiples of Attenuation of the Dose of Photons in Concrete, Iron and Lead for Monoenergetic Sources with Energies from 10 to 90 MeV]. *ZH. Yadernaya fizika i inzhiniring* [Nuclear Physics and Engineering]. 2016. Vol. 7, №. 3 (in Russian).
- [11] Sakharov V.K., Borisenko A.V., Dozovyye faktory nakopleniya v betone, zheleze i svintse dlya istochnikov monoenergeticheskikh fotonov s energiyami ot 10 do 50 MeV [Dose Factors of Accumulation in Concrete, Iron and Lead for Monoenergetic Photon Sources with Energies from 10 to 50 MeV]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy] Vol. 114. No. 6. 2014 (in Russian).
- [12] Yukio FUJITA, Hidetoshi SAITOH and Atsushi MYOJOYAMA, J. Bremsstrahlung and Photoneutron Leakage from Steel Shielding Board Impinged by 12-24 MeV Electrons Beams // *Radiat. Res.* 50. 363-369 (2009).

Characteristics of Photon Radiation Fields in Iron for Photon Sources with Energies from 10 to 50 MeV

I.K. Alhagaish¹, V.V. Smirnov, V.K. Sakharov

*Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

¹*ORCID iD: 0000-0003-0099-153X*

Wos Researcher ID: AAE-8983-2019

e-mail: alhigesh@gmail.com

Abstract – Based on the results of Monte Carlo calculations of the spatial energy distributions of photons in iron from point isotropic and planar monodirectional monoenergy sources with energies of 10-50 MeV, the air Kerma attenuation multiplicities and dose accumulation factors of the material under consideration are determined. The calculations take into account the contribution of the fluorescence, annihilation radiation and bremsstrahlung. The independence of the accumulation factors from the angular distribution of the source radiation is shown, and the independence of the attenuation multiplicities from the angular distribution of the source radiation and the weak dependence on its energy in the energy range 30-50 MeV is also shown. The corrections for the barrier protection are determined and their independence from the thickness of the protection and the photon energy of the source is noted. The obtained information allows to reduce the errors of the results of calculations of the thickness of anti-radiation protection of electronic accelerators at high energies, using developed engineering methods of calculation. The obtained information can also be used in calculations of protection against brake radiation of electronic accelerators by engineering methods.

Keywords: electronic accelerators, bremsstrahlung radiation, protection, dose, accumulation factor, attenuation multiplicity, Monte Carlo.

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621.869.888:621.039.54

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТРАНСПОРТНОГО
УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА ПЕРЕД СОУДАРЕНИЕМ С
ЖЁСТКОЙ ПРЕГРАДОЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА
РАКЕТНОМ ТРЕКЕ**

© 2020 С.И. Герасимов^{***}, В.И. Ерофеев^{*}, В.А. Кикеев^{*}, О.В.Кривошеев^{**},
В.И. Костин^{*}, И.А. Одзериho^{***}, Р.В. Герасимова^{**}, А.А. Глухов^{**},
В.В. Писецкий^{**}

^{*}Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

^{**}Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

Проверка соответствия конструкции транспортного упаковочного комплекта требованиям, предъявляемым к упаковкам, предназначенным для перевозки радиоактивных материалов воздушным транспортом, предусматривает столкновение с мишенью со скоростью не менее 90м/с. Подтверждение этого базового параметра испытаний должно дублироваться несколькими методиками измерений, в том числе и с применением аналоговых средств кинорегистрации. В работе описан алгоритм определения скорости транспортного упаковочного комплекта перед соударением по информации на пленочном носителе. Рассматриваются вопросы, связанные с выбором геометрической схемы регистрации и реализацией различных вариантов заполнения кадров. Описано определение линейного перемещения транспортного упаковочного комплекта в плоскости съемки, расчет масштаба и частоты съемки. Приведен пример применения методики к определению скорости транспортного упаковочного комплекта перед соударением в одном из опытов на ракетном треке.

Ключевые слова: скорость движения, соударение, упаковка, радиоактивные материалы, отработанное ядерное топливо, воздушная перевозка, авария, оборудование ракетного трека.

Поступила в редакцию 25.10.2019

После доработки 16.02.2020

Принята к публикации 20.02.2020

Кинофотограмметрические измерения скорости движения транспортного упаковочного комплекта (ТУК) перед соударением с жёсткой преградой проводятся в соответствии с требованиями [1] в опытах на ракетном треке [2-9].

Измерения основаны на получении дискретных фотоизображений ТУК посредством покадровой скоростной кино- или видеосъемки, с последующей аналитической обработкой получаемых фотоизображений. Фоторегистрация осуществляется в соответствии с геометрической схемой на рисунке 1 и производится минимум одной кино- или видеокамерой из точки S_n (центра проектирования), которая является передней узловой точкой съёмочного объектива камеры. Установка съёмочной камеры производится так, чтобы плоскость изображения и плоскость, в которой перемещается ТУК, были параллельны, а оптическая ось S_nO камеры занимала положение, перпендикулярное к плоскости движения ТУК. Тогда с учетом линейного увеличения оптической системы съёмочного аппарата, получаемые в результате линейных измерений, величины будут полностью соответствовать. Перпендикулярность оптической оси кинокамеры достигается с помощью геодезических средств измерений, путем использования двух створных точек, которые

закрепляются на местности перпендикулярно направлению движения ТУК. Съёмочная камера устанавливается над одной из точек створа и визируется на противоположную точку створа. Допустимая неперпендикулярность – не более $\pm 1-3$ угловых градуса.

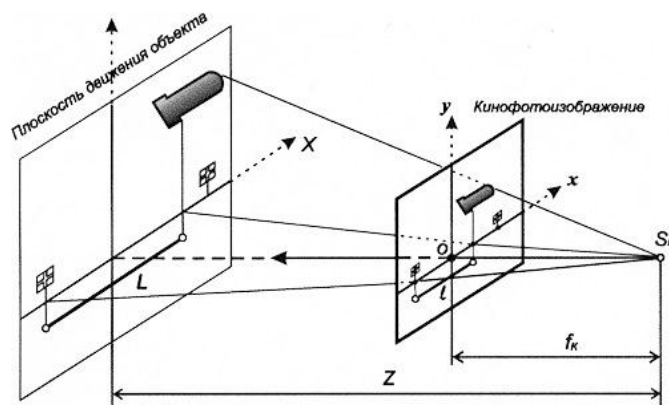


Рисунок 1 – Геометрическая схема метода кинофотограмметрических измерений [Geometric scheme of photophotogrammetric measurement method]

К параметрам движения, определяемым по данной методике, относятся:

- L – линейные перемещения ТУК в плоскости съемки;
- t_{np} – временные интервалы развития фаз движения ТУК (промежутки времени между единичными кадрами);
- $V_{об}$ – средняя линейная скорость движения ТУК.

Первые два параметра определяются на основе материалов скоростной кино или видеосъемки, а средняя скорость движения ТУК путем расчета по формуле (1):

$$V_{об} = \frac{L}{t_{np}} = \frac{l \cdot n_c}{M_c \cdot k_{np}}, \quad (1)$$

где $V_{об}$ – средняя скорость движения ТУК;

n_c – частота съемки;

k_{np} – число кадров на процесс;

l – величина перемещения изображения ТУК за число кадров k_{np} ;

M_c – масштаб съемки.

Данная формула справедлива при движении ТУК в пространстве перпендикулярно оптической оси S_nO объектива съёмочной камеры и допущении о равноускоренности (равнозамедленности) движения на участке измерений. При испытаниях в качестве измеряемого параметра принимается средняя скорость движения ТУК на участке длиной 0.5-1.0 м, за 50-200 мм перед соударением с преградой.

Расчет масштаба и частоты скоростной кинофотосъемки производится на основе аналитических связей между параметрами съёмочного аппарата и параметрами движения изучаемого ТУК, с учетом погрешностей непосредственных измерений. Выбираемые параметры должны обеспечивать получение заданной измерительной информации эксперимента с допустимой относительной погрешностью результата измерений.

Определение линейных перемещений ТУК с помощью скоростной кино- или видеосъемки производится по формуле (2):

$$L = \frac{l}{M_c}, \quad (2)$$

Считая, что во время съемки изображение ТУК или его характерных точек заполняет весь кадр, масштаб съемки можно выразить в общем виде (3):

$$M_c = \frac{r_k}{D_{max}} = \frac{f_k}{z}, \quad (3)$$

где r_k – размер кадра;

D_{max} – максимальный размер (поперечный или продольный) объекта съёмки;

f_k – фокусное расстояние объектива камеры;

z – дистанция (отстояние) до объекта съемки.

В общем случае возможны два основных варианта определения масштаба съемки:

1. Движущийся ТУК во всех последовательных положениях полностью (или частично, но одинаково для ряда положений) фиксируется на пленке без искажения контуров или других характерных форм. Если размеры объекта (или его отдельных частей) до съемки известны, то точное вычисление масштаба съемки может быть произведено после измерения с помощью компаратора величины изображения известного размера.

2. Размеры и контуры снимаемого ТУК не помещаются в кадре целиком, либо не остаются постоянными в процессе съемки и не могут быть использованы для непосредственного определения масштаба съемки.

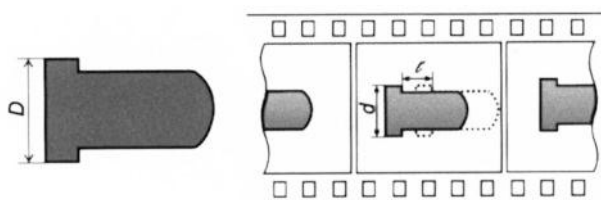


Рисунок 2 – Рабочий кадр [Work frame]

По 1 варианту определение линейных перемещений по формуле (2) сводится:

- 1) к измерению детали или ее части до съемки (размер D , рис. 2);
- 2) к измерению на кадре съёмки величины изображения ТУК или его части (размер d);
- 3) к измерению на кадре съёмки величины перемещения изображения ТУК (l).

Во втором варианте масштаб съемки не может быть определен непосредственно из обмера изображения ТУК на снимке. Тогда для определения перемещений при съемке между камерой и объектом съёмки устанавливается специальная масштабная рейка (неподвижные базисные реперы), которая располагается параллельно оси движения объекта съемки (рис. 3).

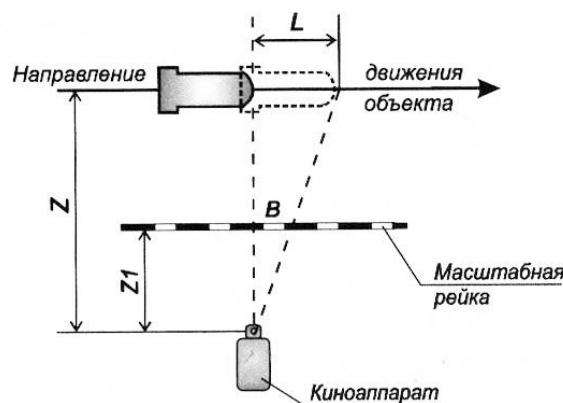


Рисунок 3 – Положение базисных реперов [Basic benchmark position]

Для вычисления перемещений используется формула (4):

$$L = \frac{l}{b_{max}} \cdot \frac{z}{z_1} \cdot B_{max}, \quad (4)$$

где B – длина рейки (или её части), мм;

l – величина перемещения изображения (по снимку), мм;

b – длина изображение рейки, мм;

z – расстояние от узловой точки объектива кинокамеры до оси объекта, м;

z_1 – расстояние до рейки, м.

Величины l и b измеряются на снимке с помощью компьютерной программы цифровой фотограмметрии; Z и Z_1 измеряются на месте съемки перед проведением эксперимента; длина рейки B (база) известна до съемки из чертежа или измеряется на месте.

Перед проведением скоростной кино- или видео съемки выбирается необходимая частота n_c съемки, обеспечивающая получение качественной фотоинформации в виде серии кадров, содержащих наиболее достоверные данные об изучаемом ТУК. Выбор частоты съемки производится с учетом характера и параметров изучаемого ТУК и возможностей применяемого съемочного аппарата.

В зависимости от скорости движения ТУК частота съемки задается исходя из допустимого смещения оптического изображения на снимке, вызванного перемещением ТУК за время экспонирования одного кадра и находящегося в пределах разрешающей способности съёмочной камеры, т.е. исходя из допустимой нерезкости $\Delta_{доп}$. Значение $\Delta_{доп} = 1/R_{\phi}$. R_{ϕ} – фотографическая разрешающая способность объектива съёмочной камеры в *лин/мм*.

При движении объекта съемки (рис. 4) с некоторой линейной скоростью $V_{об}$ перпендикулярно к оптической оси съёмочной камеры, смещение объекта в плоскости изображения неподвижного кадра будет равно $\Delta v_{из} \cdot t_b$, где $v_{из}$ – линейная скорость оптического изображения объекта съемки; t_b – время экспонирования одного кадра (выдержка).



Рисунок 4 – Оптическая схема съемки [Optical design]

Скорость $v_{из}$ определяется по формуле:

$$v_{из} = V_{об} \cdot M_c,$$

где M_c – линейное увеличение при съемке (масштаб съёмки). С некоторым приближением M_c можно определить при помощи выражения (3). Продолжительность выдержки:

$$t_b = \frac{1}{n_c \cdot \mu} \quad \left(\text{или } t_b = \frac{\eta_{обт}}{n_c} \right),$$

где μ – коэффициент скважности для киноаппарата;

$\eta_{обт}$ – коэффициент обтюрации;

n_c – частота киносъемки.

$$\text{Для вычисления } \Delta \text{ имеем } \Delta = \frac{V_{об} \cdot M_c}{n_c \cdot \mu} \quad \left(\text{или } \Delta = V_{об} \cdot M_c \cdot \frac{\eta_{обт}}{n_c} \right).$$

Приравняв $\Delta = \Delta_{\text{дон}} = 1/R_{\text{ср}}$, для определения частоты киносъемки n_c получим следующее выражение:

$$n_c = \frac{V_{\text{об}} \cdot M_c \cdot R_{\text{ср}}}{\mu} \quad (\text{или } n_c = V_{\text{об}} \cdot M_c \cdot R_{\text{ср}} \cdot \eta_{\text{об}t}).$$

Соответственно, для определения частоты кадров при видеоосъемке:

$$n_c = V_{\text{об}} \cdot M_c \cdot R_{\text{ср}}.$$

На каждом кинокадре регистрируется линейное перемещение ТУК, которое отражает развитие процесса движения ТУК во времени. На кинограмме (в случае аналоговой съемки) отображается ряд временных меток, служащих для определения частоты киносъемки и расчета временных интервалов между двумя любыми кадрами. Метки времени записываются в виде полосок разной ширины, впечатанных вдоль краёв кинограммы вне зоны кадров с частотой 1, 10, 100, 1000 и 10000 Гц (рис. 5).

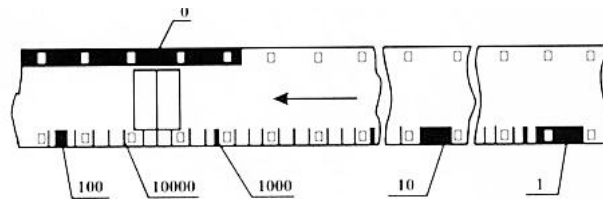


Рисунок 5 – Впечатанные метки времени [Imprinted timestamps]

Со стороны противоположной отметкам времени впечатывается сплошная полоса 0-метка (нуль-метка), соответствующая началу снимаемого процесса. Обработку последовательных положений фотоизображений изучаемого ТУК, получаемых с последовательных кадров, начинают с нумерации этих кадров. Первый кадр (k_1) соответствует началу, а последний ($k_{\text{пр}}$) – окончанию измерений на киноплёнке линейных перемещений снимаемого ТУК

При осуществлении измерений в качестве нулевой базы отсчета используется изображение в кадре неподвижного репера или перекрестия. Для определения линейного увеличения при съемке (масштаба съемки) измеряются линейные координаты x_a , x_b начала и конца изображения масштабной рейки (базисных реперов) в кадре. Тогда максимальная длина изображения масштабной рейки (расстояние между реперами) вычисляется как:

$$b = x_a - x_b.$$

При измерении линейных перемещений изображения выполняются измерения координат x_a , x_k между изображением внешнего неподвижного репера и изображением ТУК в кадре, фиксирующем определенную фазу процесса.

Величина линейных перемещений изображения определяется как:

$$\begin{aligned} l_1 &= x_{k_1} - x_{a_1}; \\ l_k &= x \cdot k_{\text{пр}} - x \cdot a_{\text{пр}}; \\ l &= l_k \cdot l_1. \end{aligned}$$

Для определения частоты киносъемки производится подсчет интервала времени (длительности процесса). В пределах измеряемого отрезка на киноплёнке подсчитывается число меток N_1 , имеющих наибольшую ширину из всех впечатанных на данном отрезке. Затем в пределах измеряемого отрезка, но вне расположения подсчитанных ранее меток наибольшей ширины, подсчитывается число меток шириной, меньшей, чем ширина ранее подсчитанных меток. Аналогично последовательно подсчитывается количество остальных меток N_i .

Длительность процесса

$$t_{\text{пр}} = (N_1 - 1) \cdot \frac{1}{t_1} + N_2 \cdot \frac{1}{t_2} + N_3 \cdot \frac{1}{t_3} + N_4 \cdot \frac{1}{t_4},$$

где $N_1 \dots N_4$ – количество меток различной ширины (по убыванию ширины);

$t_1 \dots t_4$ – период следования меток времени.

Погрешность измерения при этом будет соответствовать частоте подсчитанных меток, имеющих меньшую ширину. Частота киносъемки вычисляется как $n_c = \frac{k_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}}}$, где $k_{\text{пр}}$ – число кадров на процесс.

По завершению фотограмметрической (измерительной) обработки кинограмм осуществляется вычислительная обработка измерений:

– вычисляется истинный масштаб киносъемки с использованием формулы (3), либо по формуле:

$$M_c = \frac{b}{B} \cdot \frac{z_1}{z},$$

– вычисляется истинное линейное перемещение ТУК S по формуле (2);

– вычисляется средняя линейная скорость движения ТУК.

Погрешности кинофотограмметрических измерений скорости движения ТУК призменными камерами с непрерывным транспортированием киноплёнки зависят от выбранных в эксперименте параметров съемки, параметров киноизмерительной аппаратуры и погрешностей непосредственных измерений по кинофотоизображениям. Систематические погрешности изучаются и устраняются введением поправок, а случайные погрешности, источником которых может являться одно из звеньев измерительной системы, должны правильно оцениваться.

Определение скорости ТУК по формуле (1) является косвенным измерением, которое представляет собой определение физического параметра при его функциональной зависимости от нескольких измеряемых параметров. Согласно теории вероятностей, среднеквадратическое относительное отклонение случайной величины $V_{\text{об}} = \left(\frac{1}{k_{\text{пр}}}\right) \cdot l \cdot n_c \cdot M_c^{-1}$, являющейся некоторой функцией произведения независимых случайных величин l, n_c, M_c , можно записать в виде:

$$\frac{\sigma V_{\text{об}}}{V_{\text{об}}} = \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma l}{l}\right]^2 + \left[\frac{\sigma n_c}{n_c}\right]^2 + \left[\frac{\sigma M_c}{M_c}\right]^2}. \quad (5)$$

Число кадров $k_{\text{пр}}$, является коэффициентом и на погрешность измерений не влияет.

Среднеквадратическое отклонение σl получается из результатов прямых измерений по кинофотоизображению и принимается равным минимальному элементу изображения ТУК, зафиксированному отдельно.

$\sigma l = \Delta_{\text{дон}} = 1/R_{\text{ф}}$, а среднее относительное значение этого параметра

$$\frac{\sigma l}{l} = \frac{1}{R_{\text{сп}} \cdot r_k}, \quad (6)$$

где r_k – размер (ширина) кадра,

$l = r_k$ при максимальном заполнении кадра.

Путь, пройденный изображением ТУК на кинофотоизображении, может быть выражен через параметры киносъемки в эксперименте из соотношения:

$$l = M_c \cdot V_{об} \cdot \frac{k_{пр}}{n_c},$$

а выражение аналитической связи между относительным средним квадратическим отклонением перемещения изображения ТУК, параметрами эксперимента и съемки будет иметь следующий вид:

$$\frac{\sigma l}{l} = \frac{n_c}{R_{\phi}} \cdot V_{об} \cdot k_{пр} \cdot M_c.$$

Следует учитывать, что разрешающая способность кинокамеры R_{ϕ} – статистическая величина, полученная экспериментально, поэтому для ее применения надо использовать тест-объект, по контрасту близкий к объекту анализа киносъемкой.

Второе слагаемое (5) – относительная погрешность определения частоты съемки, которая вычисляется по временным меткам на кинофотоизображении и представляет величину, аналитически не зависящую от других параметров съемки, $n_c = f_u \cdot k_m$, где f_u – частота следования временных меток, k_m – число кадров на одну метку. По этой формуле определяется частота съемки при записи меток от промышленной сети переменного тока.

Если же запись меток осуществляется от импульсного генератора, то частоту съемки определяют из выражения:

$$n_c = f_n \cdot \frac{k_{пр}}{m_{пр}},$$

где $m_{пр}$ – число меток на процесс.

Учитывая, что k_m , $k_{пр}$, $m_{пр}$ не вносят погрешности, имеем:

$$\frac{\sigma n_c}{n_c} = \frac{\sigma f_n}{f_n}, \quad (7)$$

т.е. случайная относительная погрешность определения частоты съемки зависит от нестабильности частоты генератора временных меток.

Относительная случайная погрешность измерения третьей величины – масштаба съемки – зависит от способа определения увеличения оптической системы кинокамеры. А так как значение M_c находится по шкалам или реперам, устанавливаемым в плоскости движения объекта съемки, то принимая $M_c = b/B$, где B , b – размеры репера и его изображения соответственно, получим максимальную относительную погрешность масштаба съемки:

$$\frac{\sigma M_c}{M_c} = \pm \sqrt{\left[\frac{\sigma b}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sigma B}{B}\right]^2}. \quad (8)$$

Заменив правую часть (5) соотношениями (6), (7) и (8), получим:

$$\frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm \sqrt{\left[\frac{n_c}{R_{\phi} \cdot V_{об} \cdot k_{пр} \cdot M_c}\right]^2 + \left[\frac{\sigma f_n}{f_n}\right]^2 + \left[\frac{\sigma b}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sigma B}{B}\right]^2}. \quad (9)$$

С учетом выражения $n_c = \frac{V_{об} \cdot M_c \cdot R_{\phi}}{\mu}$ имеем:

$$\frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm \sqrt{\left[\frac{1}{k_{пр} \cdot \mu}\right]^2 + \left[\frac{\sigma f_n}{f_n}\right]^2 + \left[\frac{\sigma b}{b}\right]^2 + \left[\frac{\sigma B}{B}\right]^2}, \quad (10)$$

где μ – коэффициент скважности кинокамеры. Получение результата с малой погрешностью зависит от первого слагаемого формул (9), (10). Определение масштаба съемки практически осуществляется с погрешностью того же порядка, что и перемещение изображения ТУК. Как видно, случайная погрешность результата тем ниже, чем крупнее масштаб изображения, выше оптическое разрешение, выше скорость ТУК и больше коэффициент скважности.

Руководствуясь полученным алгоритмом, оценим погрешность определения скорости движения ТУК при измерениях стандартной аналоговой камерой с максимальным заполнением кадра и записью временных меток от кварцевого генератора частотой 1000 Гц, и нестабильностью частоты 10^{-3} . Разрешающая способность камеры составляет 15 мм^{-1} , ширина кадра 10 мм. Подставляя эти значения в (6), получим значение относительной погрешности определения пути $(\sigma l)/l = \pm 0,007$.

Вторая составляющая погрешности определения скорости за счет нестабильности кварцевого генератора 10^{-4} :

$$\frac{\sigma n_c}{n_c} = \pm 0,0001.$$

Составляющие погрешности определения масштаба съемки находим следующим образом. Считаем, что изображение масштабной рейки/базы между специальными реперами заполняет кадр полностью, тогда

$$\frac{\sigma b_{max}}{b_{max}} = \pm 0,007.$$

Что касается получения натуральных размеров базы, то они определяются с малой погрешностью. Киносъемка ведется с расстояния 5 м объективом, имеющим фокусное расстояние 50 мм, при этом наибольший размер изображаемой части плоскости предмета составит 1000 мм, а погрешность $\sigma B_{max} = \pm 1,0 \text{ мм}$, тогда:

$$\frac{\sigma B_{max}}{B_{max}} = \pm 0,007.$$

Подставляя численные значения погрешностей в (5), получим результирующую погрешность:

$$\frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm 0,01$$

для доверительной вероятности 0,683 и нормального закона распределения. При переходе к оценке с доверительной вероятностью 0.95 погрешность определения скорости составит:

$$\frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm 1,96 \cdot \frac{\sigma V_{об}}{V_{об}} = \pm 1,96 \cdot 0,01 \cdot 100\% = \pm 1,96\%,$$

где 1,96 – нормированная квантиль нормального распределения для доверительной вероятности 0,95. Точность методики подтверждалась в опыте, в котором испытываемый ТУК (рис. 6а) должен был подвергнут столкновению с мишенью (рис. 6б) со скоростью не менее 90 м/с.

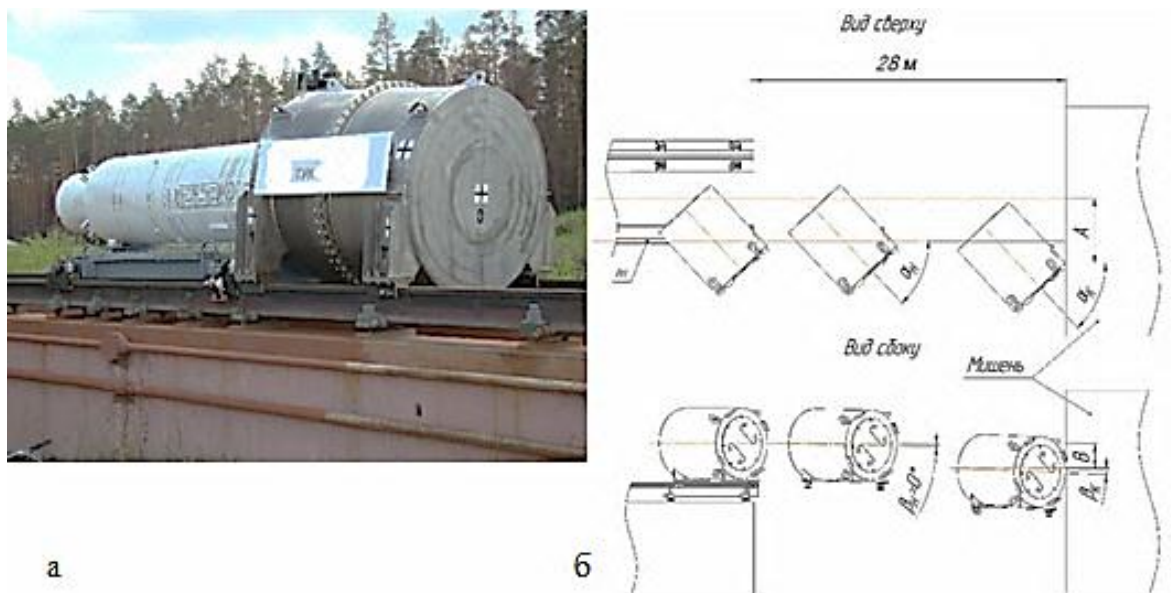


Рисунок 6 – Объект испытания (а) и схема проведения испытания (б) [Test object (a) and test design (b)]

Зависимости скорости движения и продольной перегрузки от времени приведены на рисунке 7.

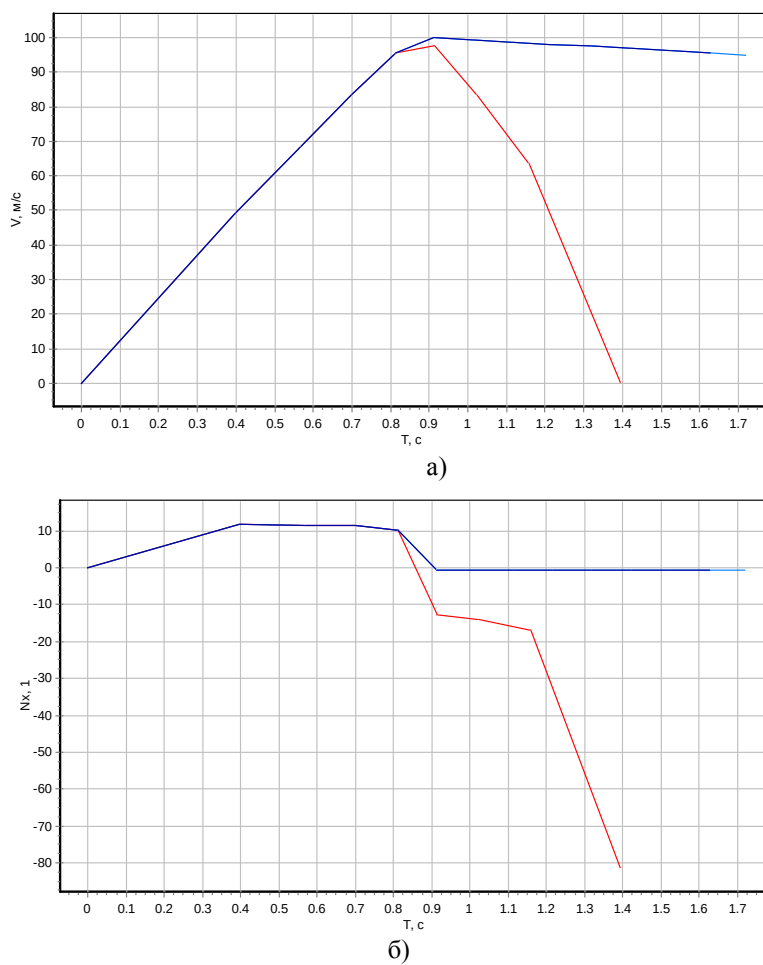


Рисунок 7 – Параметры движения ракетного поезда с ТУК, скорость движения (а), продольная перегрузка (б) [Parameters of rocket train movement from a transport packaging kit, speed (a), longitudinal overload (b)]

На рисунке 8 представлены кадры отделения ТУК от тормозящейся ракетного поезда (а) и кадры подлета ТУК к преграде, полученные камерой сверху.



а)



б)

Рисунок 8 – Регистрация движения ТУК в опыте: а) кадры разгона и отделения ТУК от ракетного поезда; б) подлет ТУК к преграде [The registration of the transport packaging movement in the experiment:

a) shots of dispersal and separation of transport packaging from the rocket train;

b) the transport packaging approach]

Видео- и фотограмметрические измерения проводились по представленной методике с использованием широкоформатных фотограмметрических камер АФА и скоростной видеокамеры, расположенных сверху на платформе при вертикальном направлении оптических осей, перпендикулярно к направлению движения испытываемого макета.

Цифровая фотограмметрическая обработка снимков АФА и видеок кадров включала метрическое дешифрирование. Угол подхода объекта испытаний к преграде определялся по фотоснимку АФА, а скорость подхода – по кадрам скоростной видеокамеры.

Значения горизонтального угла φ и средней скорости подхода упаковки к мишени за $\sim 2,0$ м перед мишенью, полученные по результатам обработки в опыте, и значение средней скорости за $\sim 0,5$ м до касания с мишенью составили $\varphi = -55,1 \pm 0,4$ (град); $v = 92,6$ м/с $\pm 2\%$.

Полученные точности удовлетворяют требованиям МАГАТЭ при проведении испытаний макета упаковки ТУК в условиях, имитирующих авиационную аварию [9-12].

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2078.2019.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Правила безопасной перевозки радиоактивных материалов. Конкретные требования безопасности. № SSR-6. IAEA. 2012.
2. 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. Одзерихо, Б. А. Яненко // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 3(24). – С. 68-76.
3. Gerasimov S. I., Erofeev V. I., Kamchatnyi V. G., Odzerikho I. A. The Sliding Contact Condition in Stability Analysis of Stage Motion for a Rocket Sled Track Facility. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. N 3. P. 221-226.
4. Герасимов, С. И. Устойчивость движения высокоскоростных объектов по направляющим ракетного трека / С. И. Герасимов, С. В. Бутова, В. И. Ерофеев, В. Г. Камчатный // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. – № 1. – С. 3-8.
5. Rigali, D.J., Feltz L.V. High-Speed Monorail Rocket Sleds for Aerodynamic Testing at High Reynolds Numbers. «Journal of Spacecraft and Rockets». 1968. Vol. 5. № 11. P. 1341-1346.
6. James L. Lamb, Critical Velocities for Rocket Sled Excitation of Rail Resonance. JOHNS HOPKINS APL TECHNIKAL DIGEST. Vol. 21. N 3 (2000).
7. Metrikine A.V., Verichev S.N. Instability of Vibrations of a Moving Two Mass Oscillator on a Flexibly Supported Timoshenko Beam. Archive of Applied Mechanics. 2001. Vol. 71. No 9. P. 613-624.
8. Question on Rail transport of radioactive materials – Hinkley Point. 2017. URL: www.onr.org.uk.
9. Spent Fuel Transportation Package Response to the Baltimore Tunnel Fire Scenario (NUREG/CR-6886). November 2006. U.S. Nuclear Regulatory Commission. URL: <http://www.sandia.gov/media/firetest.htm>
10. Spent Nuclear Fuel Assay Data for Isotopic Validation State-of-the-art Report Nuclear Science Committee Working Party on Nuclear Criticality Safety (WPNCSS) Expert Group on Assay Data of Spent Nuclear Fuel (EGADS NF) OECD 2011. 97 p.
11. Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors Experience and Lessons from Around the World. Edited by Harold Feiveson, Zia Mian, M.V. Ramana and Frank von Hippel. 2011. International Panel on Fissile Materials. URL: www.fissilematerials.org.
12. Transportation and Storage Subcommittee; Report to the Full Commission; Updated Report, Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, January 2012. URL: http://www.brc.gov/sites/default/files/documents/final_updated_ts_report_012612.pdf http://www.brc.gov/sites/default/files/documents/draft_ts_report_6-1-11.pdf.

REFERENCES

- [1] Normy` MAGATE` po bezopasnosti dlya zashhity` lyudej i oxrany` okruzhayushhej sredy`. Pravila bezopasnoj perevozki radioaktivny`x materialov. Konkretny`e trebovaniya bezopasnosti [IAEA Safety Standards for the Protection of People and Environment. Rules for the Safe Transport of Radioactive Materials. Specific Safety Requirements]. No. SSR-6. IAEA. 2012 (in Russian).
- [2] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Lyakhov K.I., Melnik A.V., Odzerikho I.A., Yanenko B.A. Postanovka ispy`tanij toplivny`x upakovochny`x komplektov na raketnom treke [Statement of Tests on the Missile Track of Fuel Packaging Kits]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. No 3(24). 2017. P. 68-76 (in Russian).
- [3] Gerasimov S.I., Erofeev V.I., Kamchatnyi V.G., Odzerikho I.A. The Sliding Contact Condition in Stability Analysis of Stage Motion for a Rocket Sled Track Facility. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. Vol. 47. No. 3. P. 221-226.
- [4] Gerasimov S.I., Butova S.V., Erofeev V.I., Kamchatka V.G. Ustojchivost` dvizheniya vy`sokoskorostny`x ob`ektov po napravlyayushhim raketnogo treka [Stability of Movement of High-Speed Objects along the Guides of the Missile track]. Problemy` mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines]. No.1. 2015. P. 3-8 (in Russian).
- [5] Rigali D.J. and Feltz L.V. High-Speed Monorail Rocket Sleds for Aerodynamic Testing at High Reynolds Numbers. «Journal of Spacecraft and Rockets». 1968. Vol. 5. No. 11. P. 1341-1346.
- [6] James L. Lamb, Critical Velocities for Rocket Sled Excitation of Rail Resonance. JOHNS HOPKINS APL TECHNIKAL DIGEST. Vol. 21. No. 3 (2000).
- [7] Metrikine A.V., Verichev S.N. Instability of Vibrations of Moving Two Mass Oscillator on a Flexibly Supported Timoshenko Beam. Archive of Applied Mechanics. 2001. Vol. 71. No 9. P. 613-624.

- [8] Question on Rail transport of radioactive materials – Hinkley Point. 2017. URL: www.onr.org.uk.
- [9] Spent Fuel Transportation Package Response to the Baltimore Tunnel Fire Scenario (NUREG/CR-6886). November 2006. U.S. Nuclear Regulatory Commission. URL: <http://www.sandia.gov/media/firetest.htm>.
- [10] Spent Nuclear Fuel Assay Data for Isotopic Validation State-of-the-art Report Nuclear Science Committee Working Party on Nuclear Criticality Safety (WPNCSS) Expert Group on Assay Data of Spent Nuclear Fuel (EGADSNF) OECD 2011. 97 p.
- [11] Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors Experience and Lessons from Around the World. Edited by Harold Feiveson, Zia Mian, M.V. Ramana and Frank von Hippel. 2011 International Panel on Fissile Materials. URL: www.fissilematerials.org.
- [12] Transportation and Storage Subcommittee; Report to the Full Commission; Updated Report, Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, January 2012. URL: http://www.brc.gov/sites/default/files/documents/final_updated_ts_report_012612.pdf http://brc.gov/sites/default/files/documents/draft_ts_report_6-1-11.pdf.

Determination of Transport Packaging Kit Speed before Impact with a Rigid Barrier during Emergency Impact Tests on the Missile Track

S.I. Gerasimov^{*,1}, V.I. Erofeev^{*2}, V.A. Kikeev^{*3}, O.V. Krivosheev^{**4}, V.I. Kostin^{*5}, I.A. Odzeriho^{*,**6}, R.V. Gerasimova^{**7}, A.A. Glukhov^{**8}, V.V. Pisetskiy^{**9}**

**Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 85 Belinskogo str., Russia 603024*

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

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

³ORCID iD: 0000-0002-2040-2045

e-mail: vkikeev@mail.ru

⁴ORCID iD: 0000-0003-4597-4215

e-mail: staff@vniief.ru

⁵ORCID iD: 0000-0002-2711-3975

e-mail: costin.vasi1@yandex.ru

⁶ORCID iD: 0000-0002-2672-7318

e-mail: odzeriho.irina@yandex.ru

⁷ORCID: 0000-0002-2711-3975

e-mail: grv@sarfti.ru

⁸ORCID: 0000-0003-4470-6518

e-mail: glukh0w.a@yandex.ru

⁹ORCID: 0000-0003-2878-6191

e-mail: pvv@sarfti.ru

Abstract – Verification of compliance of the transport packaging kit design with the requirements for packages intended for the transport of radioactive materials by air, provides for a collision with a target at a speed of not less than 90 M/s. Confirmation of this basic parameter of the tests should be duplicated by several measurement methods including the use of analog means of film registration. The paper describes an algorithm for determining the speed of the transport packaging kit before impact on the information on the film carrier. The questions connected with the choice of the geometrical scheme of registration and realization of various variants of frame filling are considered. The determination of the linear movement of the transport packaging kit in the shooting plane, the calculation of the scale and frequency of shooting is described. An example of the application of the technique to determine the speed of the transport packaging kit before impact in one of the experiments on the missile track is given.

Keywords: speed, impact, packaging, radioactive materials, spent nuclear fuel, air transportation, accident, missile track equipment.

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

УДК 620.179.1

**ЭФФЕКТИВНОЕ ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ АЭС
ЗА СЧЕТ ВВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО МОНИТОРИНГА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭНЕРГОБЛОКА**

© 2020 А.А. Землянский*, В.П. Григоренко**, К.А. Землянский**, С.А. Дубнов*

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

** Балаковская АЭС, Балаково, Саратовская обл., Россия

Все объекты атомной энергетики относятся к уникальным сооружениям и одновременно идентифицируются согласно СТО 1.1.1.02.009.0873-2017 «Обеспечение безопасности при эксплуатации зданий и сооружений атомных станций», как опасные производственные объекты с повышенным уровнем ответственности. В связи с этим, по мнению авторов, а также международных и отечественных экспертов в систему безопасности АЭС следует ввести дополнительный элемент в виде системы активного мониторинга напряженно-деформированного состояния незаменимых несущих и ограждающих конструкций реакторного и турбинного отделения. В работе обосновывается факт того, что существующие на сегодняшний день системы мониторинга не позволяют надежно и эффективно оценивать уровень НДС конструкций, а также не позволяют оценивать уровень «остаточных» напряжений, наличие которых на практике может также приводит к предаварийным и аварийным ситуациям. Для решения указанной проблемы авторами настоящей статьи разработана инновационная система мониторинга НДС как металлических, так и железобетонных несущих строительных конструкций, которая полностью лишена недостатков традиционных систем мониторинга, и характеризуется рядом неоспоримых преимуществ. Предлагаемая система мониторинга разработана на основе использования эффекта Форстера, в основу которого положена зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнитных сред от уровня действующих в материале напряжений. На разработанную систему мониторинга авторами получен патент № 2295118, который свидетельствует об уровне эффективности инновационного решения данной проблемы. В целом, использование предлагаемой системы в качестве дополнительного барьера защиты позволит на практике предупредить и не допустить любую внештатную, предаварийную, либо аварийную ситуацию на АЭС с одновременным повышением уровня безопасности и надежности эксплуатации АЭС после продления срока ее эксплуатации.

Ключевые слова: защитные барьеры, надежность, магнитометрические датчики, мониторинг строительных конструкций, остаточные напряжения.

Поступила в редакцию 05.11.2019

После доработки 18.12.2019

Принята к публикации 27.12.2019

Во всем мире безопасность атомных станций независимо от технологических особенностей АЭС базируется на концепции глубоко эшелонированной защиты. Такая концепция предусматривает создание ряда последовательных физических защитных барьеров [1]; на пути распространения радиоактивных веществ в окружающую среду в результате возникновения на АЭС какой-либо внештатной аварийной ситуации на первом или втором контуре действующей АЭС.

При этом в настоящее время на всех АЭС Российской Федерации имеется **пять** классических защитных барьеров. В частности, в **первый защитный барьер** входит топливная матрица в виде топливных таблеток из диоксида урана, которая удерживает более 98% радиоактивности даже при некотором нарушении температурного режима технологического процесса в реакторе.

Вторым защитным барьером в современных АЭС является оболочка ТВЭла, так как в качестве материала для изготовления защитных трубок ТВЭлов в настоящее время используется рекристаллизованный и самый современный сплав циркония марки Э-635, который обладает более высокими механическими характеристиками и меньшей радиационной ползучестью и коррозией при высоких рабочих температурах.

Третьим защитным барьером на действующих АЭС является граница рабочего контура теплоносителя реактора. В целом полный объем первого контура реактора ВВЭР-1000 с РУ В-320 составляет 370 м³.

Четвертым защитным барьером в типовых отечественных АЭС является герметичное ограждение оборудования первого контура реакторной установки, в виде защитной железобетонной оболочки, обеспечивающей необходимую дополнительную безопасность для окружающей среды и которая может выдержать даже несанкционированный удар самолета.

Пятым защитным барьером в современных АЭС является биологическая защита в виде различных экранов биологической защиты.

Однако учитывая тот факт, что все объекты атомной энергетики относятся к уникальным сооружениям и одновременно идентифицируются согласно СТО 1.1.1.02.009.0873-2012 «Обеспечение безопасности при эксплуатации зданий и сооружений атомных станций» [2] как – опасные производственные объекты с повышенным уровнем ответственности, соответственно по следующим признакам:

- использование на АЭС рабочих сред с высокими технологическими параметрами ($T = 320/274^{\circ}\text{C}$, $P = 160/60 \text{ кгс/см}^2$);
- наличие в рабочей зоне первого и второго контура главных циркуляционных насосов, мощных турбоагрегатов высокого и низкого давления, насосного оборудования, мощных мостовых и полярных кранов, высокой гидродинамической нагрузки в бассейне выдержки и перегрузки, формирующие дополнительные статические и динамические нагрузки на несущие и ограждающие конструкции, относящиеся по существующей нормативной литературе к незаменимым элементам и интенсивно снижающие уровень их остаточного ресурса.

В связи с этим, по мнению авторов данной работы и мнению многих международных и отечественных экспертов, в существующую систему безопасности АЭС следует ввести дополнительную систему активного мониторинга напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) незаменимых несущих и ограждающих конструкций РО и МО, которая будет контролировать НДС наиболее ответственных элементов АЭС, активно влияющих на общий уровень безопасности рассматриваемого объекта.

В частности к таким важным и критически опасным элементам относятся, прежде всего:

- бассейн выдержки и перегрузки, уровень эксплуатационной надежности и изменение НДС которого необходимо контролировать в режиме онлайн;
- железобетонная фундаментная плита реакторного отделения, уровень напряженно-деформированного состояния, которой необходимо контролировать в течение всего срока эксплуатации АЭС;
- железобетонная защитная оболочка реакторного отделения, уровень преднапряжения и НДС которой необходимо контролировать в текущем режиме;

- хранилище твердых и радиоактивных отходов, в котором необходимо контролировать НДС железобетонных боксов для хранения отходов;
- фундамент турбоагрегата с обязательной оценкой статических и динамических напряжений в его несущих конструкциях во время пуска остановки и текущей работы турбоагрегата с определением в режиме онлайн – частоты собственных и вынужденных колебаний объекта, а также логарифмических декрементов колебаний основного тона объекта, как в продольном, так и в поперечном направлениях;
- каркас машинного отделения, электроэтажерки и деаэрационного отделения АЭС с регистрацией НДС каркаса во всех режимах эксплуатации;
- подкрановые балки и рабочий мост полярного крана в РО, а также тяжелых мостовых кранов машинного зала АЭС с оценкой уровня их НДС при ремонтных работах и внештатных ситуациях;
- фундаменты, под силовое теплотехническое оборудование, включая парогенераторы и главные циркуляционные насосы АЭС с включением в систему мониторинга и оценку напряженно-деформированного состояния анкерных болтов крепления трубопроводов первого и второго контуров и специализированного оборудования, а также специальных демпферных систем.

Наличие на АЭС работающей системы мониторинга НДС позволит на практике предотвратить и не допустить возникновения на действующей АЭС, какой либо предаварийной, либо аварийной ситуации, связанной с переходом в критическую зону работы любого из вышеперечисленных силовых и конструктивных незаменимых элементов. Особенно этот факт важен в связи с продлением срока службы действующих энергоблоков согласно требованиям Федеральной программы «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» [3], в которой заложены главные принципы повышения энергоэффективности и безопасности атомной энергетики России в новом веке, за счет:

- повышения установленной мощности действующих энергоблоков;
- повышения уровня безопасности и надежности эксплуатации модернизированных блоков;
- и продления срока безопасной эксплуатации действующих энергоблоков.

Введение дополнительной инновационной системы активного мониторинга НДС несущих и специальных строительных конструкций энергоблоков АЭС косвенно диктуется, по нашему мнению, еще и тем, что с целью стабилизации уровня эксплуатационной надежности действующих АЭС на проектном уровне в ходе повышения мощности действующих энергоблоков и продления срока их эксплуатации Правительством Российской Федерации и ОАО «Концерн Росэнергоатом» были разработаны и введены в действие ряд новых нормативных документов, регламентирующих необходимость организации активного мониторинга НДС для особо ответственных и критически важных несущих и ограждающих конструкций, и незаменимых элементов АЭС в частности:

- Федеральный закон №384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [4];
- ГОСТ 31997-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» [5];
- РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011 «Мониторинг строительных конструкций атомных станций» [6].

Все отмеченное свидетельствует о высокой актуальности и необходимости создания инновационной системы активного мониторинга НДС нового поколения, способной работать в жестких условиях действующих энергоблоков АЭС как на несущих элементах из металла, так и из тяжелого бетона и железобетона. Так

предотвращение любой потенциально возможной аварийной ситуации на вышеуказанных незаменимых несущих и ограждающих конструкциях АЭС с помощью предлагаемой авторами инновационной системы мониторинга позволит на практике эффективно решить задачу повышения безопасности действующих АЭС в ходе продления их срока службы.

В настоящее время известно 5 классических методов организации мониторинга НДС технологического оборудования и несущих конструкций уникальных, высотных, экологически опасных и энергогенерирующих объектов, основанных на использовании:

- 1) тензометрических датчиков;
- 2) струнных датчиков;
- 3) волоконно-оптические датчики;
- 4) акустоэмиссионных систем;
- 5) динамических методов испытания объектов с применением специального очень дорогостоящего вибродиагностического оборудования.

Все вышеперечисленные системы мониторинга имеют ряд очень серьезных недостатков, обусловленных:

- высокой стоимостью вышеуказанных измерительных систем при длительном и многолетнем использовании в жестких условиях эксплуатации на действующих АЭС;
- относительно низкой чувствительности и разрешающей способности используемого оборудования;
- низкой надежностью отдельных элементов системы;
- наличие «дрейфа нуля» (самопроизвольное изменение показаний);
- релаксацией и ползучестью рабочего слоя клея в тензометрических датчиках и в материале струны струнных датчиков во времени;
- невозможностью использования струнных и акустоэмиссионных методов при динамических режимах испытания и эксплуатации исследуемых объектов;
- невозможностью оценки так называемых «остаточных» напряжений и накопленных усталостных явлений в материале эксплуатируемой конструкции в результате воздействия жесткой радиации или других технологических воздействий.

Следует также отметить, что в отличие от предлагаемой системы, ни одна из вышеперечисленных систем не позволяет измерить или хотя бы оценить уровень так называемых «остаточных» напряжений в конструкционном материале, которые в ряде случаев могут достигнуть критических пределов, что зачастую приводит на практике к необратимым и лавинообразным разрушениям объекта. При этом теоретически возможен случай, когда сложное и высокоответственное инженерное сооружение может стать просто непригодным к дальнейшей эксплуатации даже при самых минимальных внешних нагрузках либо из-за наличия в материале высоких «остаточных» напряжений, либо из-за выгорания в облицовке, несущих металлических конструкциях и в рабочей арматуре ЖБК, легирующих элементов с одновременным накоплением повреждений в указанном материале на атомарном уровне из-за жесткого облучения последнего.

Кроме того следует отметить, что в настоящее время не существует каких-либо надежных измерительных систем и датчиков способных измерять НДС арматуры в ЖБК, (так в СП 63.13330.2018 [7], РД ЭО 1.1.2.99.0867-2012 [8] рекомендовано определять уровень напряжения в продольной арматуре ЖБК только расчетным путем с использованием ширины раскрытия трещин и расстояния между трещинами).

С целью решения указанной проблемы авторы настоящей статьи разработали инновационную систему мониторинга НДС как для ферромагнитных материалов

используемых в облицовке или в несущих металлических конструкциях АЭС (рис. 1), так и для оценки НДС рабочей арматуры в железобетонных конструкциях, что сделано впервые.



Рисунок 1 – Общий вид системы мониторинга ферромагнитных материалов [General view of the monitoring system of ferromagnetic materials]

Структурная схема системы активного мониторинга представлена на рисунке 2.

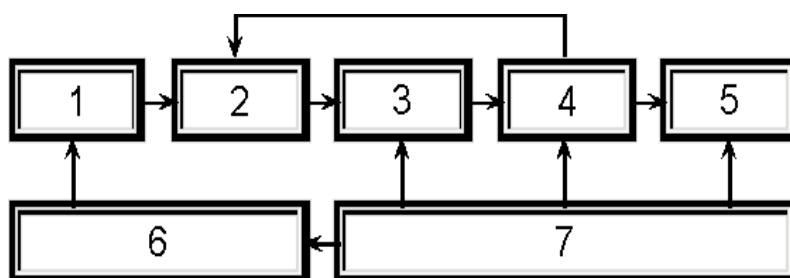


Рисунок 2 – Структурная схема системы активного мониторинга НДС:

- 1 – дифференциальный ферромагнитный датчик; 2 – преобразователь сигнала на базе мостов Уитстона; 3 – усилитель постоянного тока; 4 – процессор целевого назначения с аналого-цифровым преобразователем; 5 – цифровой регистратор выходного сигнала; 6 – низкочастотный стабилизированный блок питания; 7 – рабочий блок питания
- [Structural scheme of active monitoring system of stress-strain states
 1 – differential ferromagnetic sensor; 2 – signal converter based on Whitston bridges; 3 – DC amplifier;
 4 – target function processor with analog-to-digital converter; 5 – digital output signal recorder;
 6 – low-frequency stabilized power supply; 7 – operating power supply unit]

Предлагаемая система мониторинга разработана на основе использования эффекта Форстера [9], в основу которого положена зависимость относительной магнитной проницаемости ферромагнитных сред от уровня действующих в материале напряжений.

При этом на магнитоупругий датчик и систему активного мониторинга НДС ферромагнитных материалов авторами получен патент № 2295118 [10] и подготовлена заявка на изобретение на метод измерения НДС в рабочей арматуре ответственных железобетонных конструкций АЭС с использованием того же эффекта Форстера. Сравнительные характеристики существующих систем мониторинга и разработанной системы приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики существующих и разработанной системы мониторинга НДС незаменимых несущих конструкций [Technical specifications of the existing and developed system of VAT monitoring of irreplaceable load-bearing structures]

№ п/п	Наименование технических характеристик	Система мониторинга НДС на основе использования			
		Тензометрических датчиков	Струнных датчиков	Оптоволоконных датчиков	Магнитоупругих датчиков
1	Диапазон измерения (МПа)	+/-300	+/-350	+/-380	+/-450
2	Чувствительность (МПа)	0.2	0.1	0.2	0.05
3	Погрешность (%)	5	2	1	0.5
4	Частотный диапазон (Гц)	0-1000	-	0-4000	0-8000
5	Ползучесть, дрейф нуля (%)	0,1	0,05	0,05	отсутствует
6	Температурный диапазон работы (°C)	-20 +40	-30 +60	-30 +50	-40 +70
7	Возможность измерения «остаточных» напряжений	отсутствует	отсутствует	отсутствует	имеется

Детальное сравнение технических характеристик традиционных систем и предложенной автором системы активного мониторинга НДС ферро-магнитных материалов и арматуры в ЖБК на основе использования новых магнитометрических датчиков позволило установить, что:

- все традиционные системы мониторинга измеряют уровень напряженного состояния материала конструкций косвенным путем измерения фибровых деформаций материала, которые на практике могут возникать не в результате изменения напряженного состояния конструкции, а в результате совсем других причин, например в результате ползучести клея между датчиком и материалом конструкции, либо в результате изменения температурного или влажностного режима объекта и т.д.;
- в предлагаемой системе мониторинга на основе магнитометрических датчиков измерение напряженного состояния материала конструкций выполняется на атомарном уровне за счет косвенной оценки изменений в атомарной решетки материала возникших только в результате фактического изменения напряженного состояния материала, что очень важно;
- ни одна из традиционных систем мониторинга не позволяет оценить уровень «остаточных» напряжений в материале несущих конструкций АЭС, а предлагаемая система мониторинга на основе магнитоупругих датчиков позволяет оценить уровень «остаточных» и действующих напряжений в материале обследуемой конструкции, что повышает степень достоверности получаемых результатов;
- кроме того тензометрические, струнные и оптоволоконные датчики не позволяют организовать длительные измерения НДС конструкций в связи с ползучестью клеевых соединений и материала преднапряженных струнных и оптоволоконных датчиков, а предлагаемые магнитоупругие датчики не имеют указанных недостатков и могут использоваться на рабочих объектах АЭС неограниченно длительное время, что позволяет использовать предлагаемые системы в течение всего срока эксплуатации атомной станции;
- уровень чувствительности и надежности, предлагаемых магнитоупругих датчиков, значительно выше, чем у традиционных систем мониторинга при меньшей стоимости;

- кроме отмеченного разработанная система мониторинга позволяет измерять уровень напряженно-деформированного состояния материала несущих конструкций АЭС не только в статическом режиме, но и в динамическом режиме, без использования дополнительного электронного оборудования и в полном соответствии с требованиями ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения [5]. «Правила обследования и мониторинга технического состояния»;
- в частности, разработанная система мониторинга позволяет также измерять, например, у фундамента турбоагрегата и других высокоответственных элементов АЭС – частоту собственных колебаний, логарифмический декремент основного тона собственных колебаний в различных направлениях, скорость и ускорение колебаний отдельных несущих конструкций обследуемого объекта, что позволяет на практике по динамике изменения частоты свободных колебаний и логарифмического декремента колебаний объекта объективно оценивать направление изменения уровня его эксплуатационной надежности и на практике эффективно предупредить любую внештатную предаварийную, либо аварийную ситуацию контролируемого объекта с одновременным повышением уровня его безопасности и надежности в ходе эксплуатации.

Созданный авторами, действующий пилотный вариант системы активного мониторинга НДС строительного объекта был успешно использован на практике при оценке напряженно-деформированного состояния стальных вертикальных резервуаров для хранения бензина на Балаковской нефтебазе в 2005 г., а также при оценке НДС несущих металлических двутавров одного из главных пролетов шлюзового моста в г. Балаково [11]. Полученные результаты показали очень высокую чувствительность и разрешающую способность предложенной системы мониторинга, а также способность системы надежно работать в режиме онлайн с использованием выделенного радиоканала связи [12].

Кроме отмеченного разработанная система активного мониторинга НДС ферромагнитных материалов успешно используется в Балаковском институте техники и технологии (филиал) НИЯУ МИФИ г. Москва на кафедре «Промышленное и гражданское строительство» при проведении лабораторных работ по курсу «Мониторинг технического состояния зданий и сооружений». При этом ошибка при оценке сходимости расчетных и экспериментальных результатов не превышает на практике 1% [13].

Детальный анализ всего выше представленного материала позволило авторам сформулировать следующие выводы:

1. Предложенная система активного мониторинга НДС является практически чистым патентным направлением не имеющем базовых недостатков присущих тензометрическим, струнным, оптоволоконным и акустоэмиссионным системам измерения НДС строительных конструкций;
2. Практическое использование рассматриваемой системы активного мониторинга НДС возможно на ядерных, экологически опасных и уникальных объектах, разрушение которых может принести огромный и несопоставимый даже с первоначальной стоимостью указанных объектов ущерб;
3. Использование на практике предложенной системы активного мониторинга НДС позволило установить очень высокую чувствительность, разрешающую способность и надежность по сравнению с существующими аналогами;
4. Практическое использование разработанной системы активного мониторинга НДС на объектах ядерной энергетики позволит повысить общий уровень эксплуатационной надежности энергоблоков и предотвратить возможность возникновения любой внештатной, предаварийной, либо аварийной ситуации при эксплуатации указанных ядерных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НП-001-15 «Общие положения обеспечивающие безопасность атомных станций» Приказ № 522 от 17 декабря 2015 г. Об утверждении Федеральных норм и правил в области использования атомной энергии. – 57 с. – URL : <https://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciy.html>.
2. СТО 1.1.1.02.009.0873-2017 «Обеспечение безопасности при эксплуатации зданий и сооружений атомных станций». – Москва : ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2017. – 30 с.
3. Федеральная программа «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» Постановление Правительства РФ №1715 от 13.11.2009 г. – 144 с. – URL : <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.
4. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений ФЗ №384-ФЗ от 30.12.2009 г. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/.
5. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Москва : МИТКС, 2012. – 68 с.
6. РД ЭО 1.1.2.99.0624-2011 Мониторинг строительных конструкций атомных станций. – Москва : ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012. – 68 с.
7. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2018. 152 с., URL : <https://ulgoexp.ru/files/documents/Prikaz-Ministerstva-stroitelstva-i-zhilishhno-kommunalnogo-hozyajstva-RF-ot-19.12.2018-goda-832-pr-1.pdf>
8. РД ЭО 1.1.2.99.0867-2012 Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных конструкций атомных станций. – Москва : ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012. – 30 с.
9. Forster, F.Z. fur Metallkunde. № 43. 1952, 89 p. URL : <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A12947424X/Zeitschrift-f%C3%BCr-Metallkunde-international-journal/>
10. Патент 2295118 Российская федерация, МПК G01B 7/24. Магнитоупругий датчик С1 БИ №1: заявитель и патентообладатель Саратовский государственный технический университет Москва, 2007, Землянский К. А., Землянский А. А.
11. Землянский, А. А. Мониторинг и управление надежностью зданий и сооружений различного назначения / А. А. Землянский // Промышленное и гражданское строительство. – Москва, 2004. – № 9. – С. 39.
12. Землянский, К. А. Инновационная система активного мониторинга НДС несущих и ограждающих конструкций энергогенерирующих объектов / К. А. Землянский, А. А. Землянский // Труды X Международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики», ВИТИ НИЯУ МИФИ. – Волгоград, 2014. – С. 41-45.
13. Землянский, К. А. Инновационная система НДС несущих конструкций и силового оборудования гидротехнических сооружений / К. А. Землянский, А. А. Землянский // Сборник статей II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий», БИТИ НИЯУ МИФИ. – Балаково, 2016. – С. 81-90.

REFERENCES

- [1] NP-001-15 1 Obshhie polozhenie obespechivayushhie bezopasnost' atomny'x stancij. Prikaz № 522 ot 17 dekabrya 2015 g. Ob utverzhdenii Federal'ny'x norm i pravil v oblasti ispol'zovaniya atomnoj e`nergii [General Provisions of Nuclear Power Plants Ensuring Safety. Order No. 522 dated December 17, 2015. Approval of Federal Norms and Rules in the Field of Nuclear Energy Use]. URL: <https://www.seogan.ru/np-001-15-obshie-polozheniya-obespecheniya-bezopasnosti-atomnix-stanciy.html>
- [2] STO 1.1.1.02.009.0873-2017. Obespechenie bezopasnosti pri ekspluatatsii zdaniy i sooruzhenij atomnyh stancij [Safety during Operation of Buildings and Structures of Nuclear Power Plants]. Moscow: Rosenergoatom Concern OJSC 2017. 30 p. (in Russian).
- [3] Federal'naya programma «Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda» Postanovlenie Pravitel'stva RF №1715 ot 13.11.2009 g. [Federal Program «Energy Strategy of Russia until 2030» Resolution of the Government of the Russian Federation dated 13.11.2009]. Oficial'nyj sayt ministerstva energetiki RF [Official website of the Ministry of Energy of the Russian Federation]. 2009. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1026> (in Russian).
- [4] Tekhnicheskij reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij FZ №384-FZ ot 30.12.2009 g. [Technical Regulations on Safety of Buildings and Structures of Federal Law No. 384-FZ of 30.12.2009]. Oficial'nyj sayt kompanii «Konsul'tantPlyus» [«ConsultantPlus» Official Site]. 2009. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (in Russian).

- [5] GOST 31937-2011. Zdaniya i sooruzheniya. Pravila obsledovaniya i monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya [Buildings and Constructions. Rules for Inspection and Monitoring of Technical Condition] Moscow: MITKS, 2012. P. 68. (in Russian).
- [6] RD EO 1.1.2.99.0624-2011 Monitoring stroitel'nyh konstrukcij atomnyh stancij [Monitoring of Construction Structures of Nuclear Power Plants]. Moscow: Rosenergoatom Concern OJSC 2012. 68 p. (in Russian).
- [7] SP 63.13330.2018 Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovnye polozheniya. SNiP 52-01-2003 [Concrete and Reinforced Concrete Construction. Main Provisions. SNiP 52-01-2003]. Ministerstvo stroitel'stva i zhilishhno-kommunal'nogo khozyajstva Rossijskoj Federacii [Ministry of Construction Industry, Housing and Utilities Sector]. 2018 (in Russian).
- [8] RD EO 1.1.2.99.0867-2012 Metodika ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa stroitel'nyh konstrukcij atomnyh stancij [Methodology of Assessment of Technical Condition and Residual Life of Building Structures of Nuclear Power Plants]. Moscow. Rosenergoatom Concern OJSC 2012. 30 p. (in Russian).
- [9] Forster F.Z. fur Metallkunde. #43. 1952 89 p., URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/TIBKAT%3A12947424X/Zeitschrift-f%C3%BCr-Metallkunde-international-journal/> (in German).
- [10] Patent № 2295118 Rossijskaya federaciya, MPK G01B 7/24 Magnitoupugij datchik S1 BI №1, Moskva, 2007 [Patent No. 2295118 Russian Federation, MPK G01B 7/24 Magnetoelastic Sensor C1 BI No.1, Moscow, 2007]. Zemlyanskij A.A., Zemlyanskij K.A. (in Russian).
- [11] Zemlyanskij A.A. Monitoring i upravlenie nadezhnost'yu zdaniy i sooruzhenij razlichnogo naznacheniya [Monitoring and Management of the Reliability of Buildings and Structures for Various Purposes]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]. Moscow. 2004. №9. P. 39 (in Russian).
- [12] Zemlyanskij K.A., Zemlyanskij A.A. Innovacionnaya sistema aktivnogo monitoringa NDS nesushchih i ogradhdayushchih konstrukcij energogeneriruyushchih ob'ektov [Innovative system of Active VAT Monitoring of Load-Bearing and Enclosing Structures of Power Generating Facilities]. Trudy X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bezopasnost' yadernoj e'nergetiki», VITI NIYaU MIFI [Works of the X International Conference «Safety in the Nuclear Power Industry». Volgograd, VITI (branch) NRNU MEPhI]. 2014. P. 41-45 (in Russian).
- [13] Zemlyanskij K.A., Zemlyanskij A.A. Innovacionnaya sistema NDS nesushchih konstrukcij i silovogo oborudovaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [Innovative VAT System of Supporting Structures and Power Equipment of Hydraulic Structures]. Sbornik statej II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'ny'e problemy i puti razvitiya e'nergetiki, tekhniki i texnologij». BITI NIYaU MIFI. Balakovo [Works of the II International Conference «Actual Problems and Ways of Development of Energy, Machinery and Technologies. Balakovo. BITI (branch) NRNU MEPhI]. 2016. P. 81-90 (in Russian).

Effective Increasing of NPP Reliability Introducing the Active Monitoring System of Block Construction Stress-Strain State

A.A. Zemlyanskij^{*1}, V.P. Grigorenko^{2}, K.A. Zemlyanskij^{**3}, S.A. Dubnov^{*4}**

^{}Balakovo Institute of Engineering and Technology, the branch of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Chapajeva street, 140, Balakovo, Saratovskaja oblast', Russia 413853*

*^{**}Balakovo Nuclear Power Plant, Balakovo, Saratovskaja oblast', Russia 413801*

¹ORCID iD: 0000-0002-6379-0770

WOS Researcher ID: AAC-1036-2019

e-mail: zeml_aa@mail.ru

²ORCID iD: 0000-0002-9581-1193

WOS Researcher ID: AAC-5036-2019

³ORCID iD: 0000-0001-6299-7879

WOS Researcher ID: AAC-1039-2019

e-mail: zeko.macos@gmail.com

⁴ORCID iD: 0000-0002-2871-1029

WOS Researcher ID: AAC-1034-2019

e-mail: dubnov_semyon@mail.ru

Abstract – All nuclear power facilities are unique facilities and are simultaneously identified according to STO 1.1.1.02.009.0873-2017 "Ensuring Safety in the Operation of Buildings and Structures of Nuclear Power Plants" as hazardous production facilities with an increased level of

responsibility. In this connection, according to the authors, as well as international and domestic experts, the sixth protective barrier should be promptly introduced into the NPP safety system in the form of a system of active monitoring of irreplaceable load-bearing and enclosing structures of the reactor and turbine compartment. The paper substantiates the fact that the current monitoring systems do not allow reliable and effective assessment of the level of VAT of structures, as well as do not allow to assess the level of "residual" stresses, the presence of which in practice may also lead to pre-emergency and emergency situations. To solve this problem the article develops an innovative system of VAT monitoring of both metal and reinforced concrete bearing structures, which is completely devoid of shortcomings of traditional monitoring systems, and which also has a number of undeniable advantages. The proposed monitoring system is developed on the basis of the Forster effect, which is based on the dependence of the relative magnetic permeability of ferromagnetic media on the level of operating stresses in the material. The authors obtained patent No. 2295118 for the developed monitoring system, which testifies to the level of efficiency of innovative solution of this problem. In general, the use of the proposed system as the sixth barrier of protection will in practice prevent any external, pre-accident or emergency situation at the NPP with simultaneous increase of safety and reliability of operation of the NPP after the extension of its operation life.

Keywords: protective barriers, reliability, magnetometric sensors, monitoring of building structures, residual stresses.

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

УДК 621.384.64

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВОЙ
СТАЛИ 110Г13П МЕТОДАМИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

© 2020 Н.С. Зубенко, Е.А. Цвелик, Р.В. Пирожков

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

Рассмотрены теоретические аспекты оптимизации структуры и свойств аустенитной порошковой стали 110Г13п с помощью метода системного анализа (метод Парето). Подобрана оптимальная температура спекания холоднопрессованных заготовок по критерию максимальной износостойкости стали. Приведены микроструктуры стали 110Г13п в выбранном диапазоне температур спекания. Показана зависимость полученных микроструктур от температуры спекания образцов.

Ключевые слова: порошковая металлургия, динамическое горячее прессование, спекание, системный анализ, оптимизация, метод Парето, микроструктура.

Поступила в редакцию 02.10.2019

После доработки 21.12.2019

Принята к публикации 10.01.2020

Создание современных высокотехнологичных материалов является важнейшей задачей машиностроительной отрасли. В то же время весьма актуальным является вопрос о снижении затрат на производстве. Один из способов снижения затрат – это выбор наиболее оптимального метода производства изделия.

Одним из перспективных методов получения изделий, не требующих дополнительных доработок, или они сводятся к минимуму, является метод горячего прессования (далее – ДГП) порошковых металлических заготовок, который относится к импульсным методам формования с применением высоких скоростей и энергий.

Целью данной работы является оптимизация процесса получения высокоплотной аустенитной порошковой стали 110Г13п, полученной методом ДГП, путем определения оптимального значения параметра, непосредственно влияющего на структуру стали и ее свойства – температуру спекания пористых заготовок, полученных после холодного формования исходной шихты до пористости 15-29%, с применением метода Парето. Метод ДГП включает в себя несколько этапов:

1. Приготовление шихты оптимального химического и гранулометрического состава – этап, который включает в себя смешивание исходных компонентов шихты [1].

2. Механическое активирование шихты – на данном этапе происходит тщательное перемешивание исходных компонентов шихты. Кроме того, вследствие высоких локальных температур уже на данном этапе происходит химическое взаимодействие элементов, что обуславливает получение более гомогенной структуры при спекании холоднопрессованных образцов [2].

3. Холодное прессование – этап, обеспечивающий получение прессованных заготовок с заданной пористостью (обычно в пределах 20%).

4. Спекание холоднопрессованных заготовок – высокотемпературная операция, при которой происходит диффузионное взаимодействие компонентов исходной шихты

до гомогенного состояния. Для исключения окисления порошка спекание проводится, как правило, в защитной атмосфере (диссоциированный аммиак, аргон, углекислый газ и т.п.).

5. Горящее прессование в пресс-форме – этап, на котором заготовка вследствие воздействия высокой энергии удара получает структуру с остаточной пористостью 1-3%, приобретает свойства готового изделия.

Оптимальный химический и гранулометрический состав шихты данной стали был установлен в работе В.И. Власова [3].

Область применения изделий из стали 110Г13 обусловлена свойствами этого материала – высокая износостойкость, способность выдерживать высокие статические и динамические нагрузки. Данные свойства материала обусловлены самоупрочнением поверхности материала, свойственное высокоаустенитным сталям [4, 5]. В качестве выходного параметра, определяющего свойства полученного материала, примем механическую характеристику стали – износостойкость [6].

Температура спекания оказывает решающее влияние на структуру и свойства стали, кроме того, спекание холоднопрессованных заготовок – это наиболее энергозатратный этап формирования материала [7]. Выбор оптимальной температуры спекания заготовок, при которой произойдет формирование аустенитной структуры стали, является важной задачей при изготовлении деталей методом ДГП [8].

При оптимальных параметрах в процессе ДГП получается практически беспористая сталь, которая имеет следующие показатели механических свойств: $\sigma_s = 600-650$ МПа, $\delta \leq 10\%$, $KCU = 0,3-0,4$ МДж/м² [3].

Задача исследования: определить такую температуру спекания T , которая обеспечит оптимальные значения трех характеристик стали (табл. 1):

- K_1 – предел прочности,
- K_2 – износ,
- K_3 – коэффициент трения.

Таблица 1 – Опытные значения механических характеристик [The experimental values of the mechanical characteristics]

Температура спекания, °С	Предел прочности, МПа	Износ, г/час	Коэффициент трения, f
1100	487,14	0,046	0,0072
1125	384,1	0,034	0,0074
1150	381,1	0,029	0,0069
1175	331,32	0,02	0,0061
1200	318,9	0,018	0,0058

Такая задача относится к задаче многокритериальной оптимизации, при которой оптимизировать одновременно все параметры сложно или невозможно. Тогда имеет смысл ввести понятие эффективного (оптимального по Парето) решения. Смысл его заключается в том, что нельзя улучшить один параметр объекта оптимизации без ухудшения его другого параметра [9, 10]. Данный критерий был выбран по причине небольшого числа разных значений температуры спекания заготовки, при проведении эксперимента. Более подробно критерий оптимальности Парето будет разобран в исследовательской части данной статьи [11].

Для решения задачи поиска Парето-оптимального решения введем следующие обозначения:

$x \in [1100^\circ\text{C}, 1200^\circ\text{C}]$ – температура спекания исходя из условий проведения эксперимента, составляет от 1100°С до 1200°С.,

$F_1(x)$ – предел прочности,

$F_2(x)$ – износ,

$F_3(x)$ – коэффициент трения.

Введём условия оптимизации:

$F_1(x) \rightarrow \max$ (т.е. предел прочности должен быть максимально возможным);

$F_2(x) \rightarrow \min$ (износ должен стремиться к минимуму);

$F_3(x) \rightarrow \min$ (коэффициент трения, как же как и износ, тоже должен стремиться к минимуму).

Согласно методу поиска Парето-оптимального решения для каждого варианта решения (имеющиеся данные температур 1100, 1125, 1150, 1175, 1200) на основании экспериментальных данных (табл. 1) были построены векторные оценки двух критериев: износа (г/час) и величины предела прочности, МПа (рис. 1).

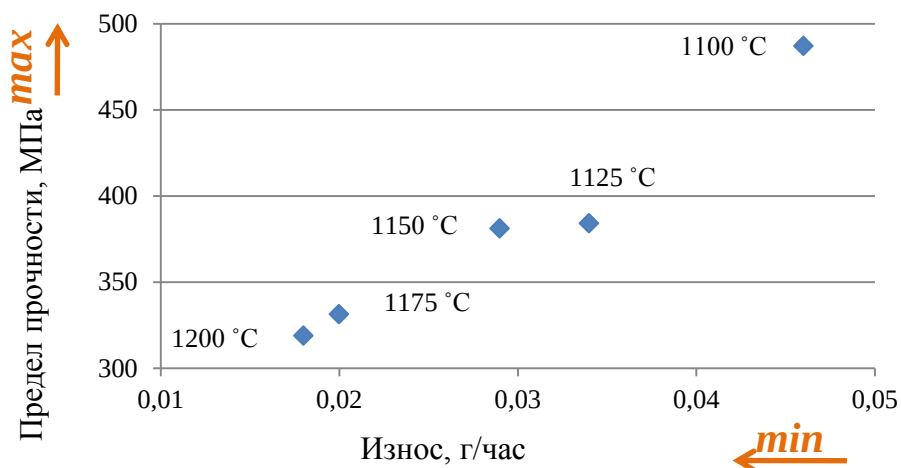


Рисунок 1 – Векторные оценки критериев износа и предела прочности для разных вариантов температур спекания [Vector estimates of wear criteria and tensile strength for different sintering temperature variants]

На следующем этапе была построена область, отражающая множество Парето. Оптимальные по Парето решения могут находиться на границе этой области (рис. 2).

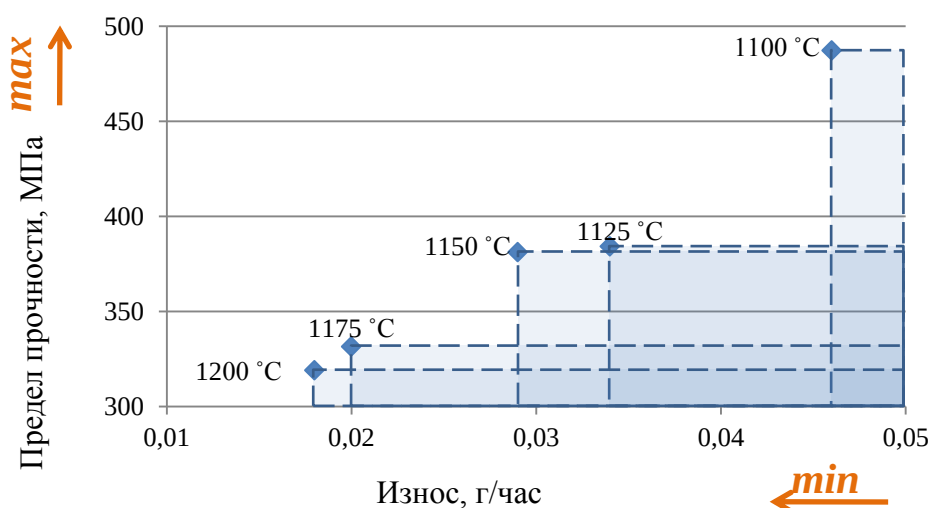


Рисунок 2 – Построение областей заполнения [Building areas of filling]

Ни один маркер не попал в заполненную область другого маркера. Это означает, что для предела прочности и износа любое значение температуры спекания от 1100 °C до 1200 °C попадает в область оптимальных значений.

Аналогично было проведено сравнение двух других частных критериев: коэффициента трения и предела прочности. На рисунке 3 результат построения векторных оценок для этих критериев.

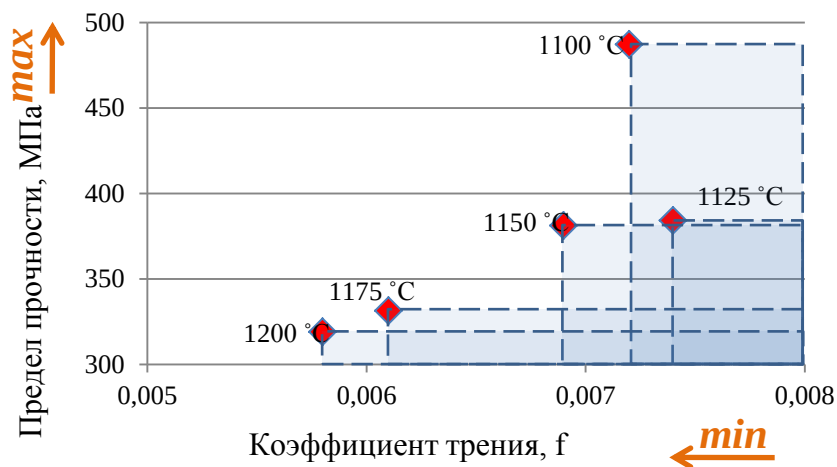


Рисунок 3 – Векторные оценки предела прочности и коэффициента трения для разных вариантов температур спекания [Vector estimates of tensile strength and friction coefficient for different sintering temperatures]

Маркер, соответствующий температуре спекания 1125°C не находится на границе области Парето (рис. 3), это означает, что данное значение температуры не является оптимальным.

На рисунке 4 приведен результат построения векторных оценок для двух частных критериев коэффициента трения и предела прочности.

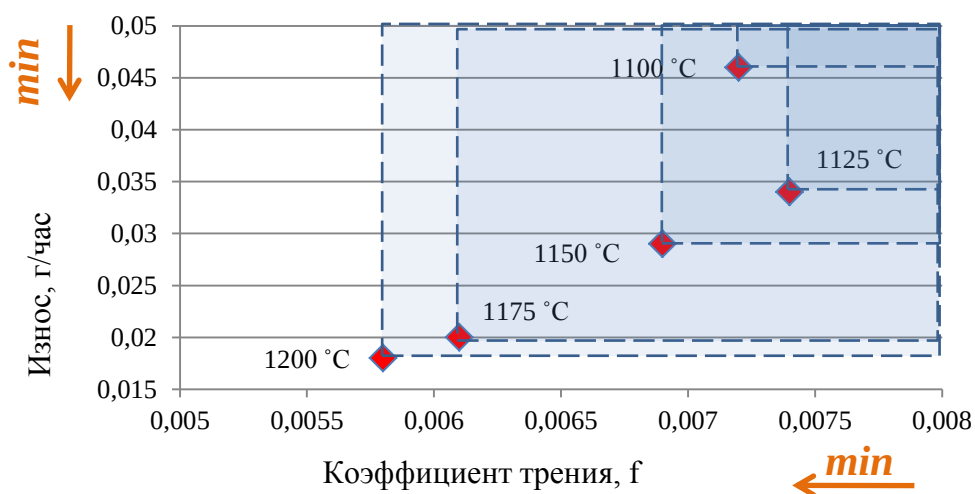


Рисунок 4 – Векторные оценки износа и коэффициента трения для разных вариантов температур спекания [Vector estimates of wear and friction coefficient for different sintering temperatures]

Здесь мы видим, что четыре варианта решения не находятся на границе области Парето. Для критериев износа и коэффициента трения 1200°C – это оптимальная температура спекания.

Полученные результаты хорошо соотносятся со структурами стали 110Г12п, полученных при различных температурах спекания.

Микроструктура порошковой стали 110Г13п исследовалась после спекания при 1100-1200°C (с интервалом 25°C) в течение двух часов.

При температуре спекания 1100°C образовывалась аустенитная структура с четко выраженными границами аустенитных зерен (рис. 5а). При этой температуре спекания в микроструктуре присутствуют многочисленные включения мартенсита и, в меньшей степени, ферритные включения (рис. 5б).

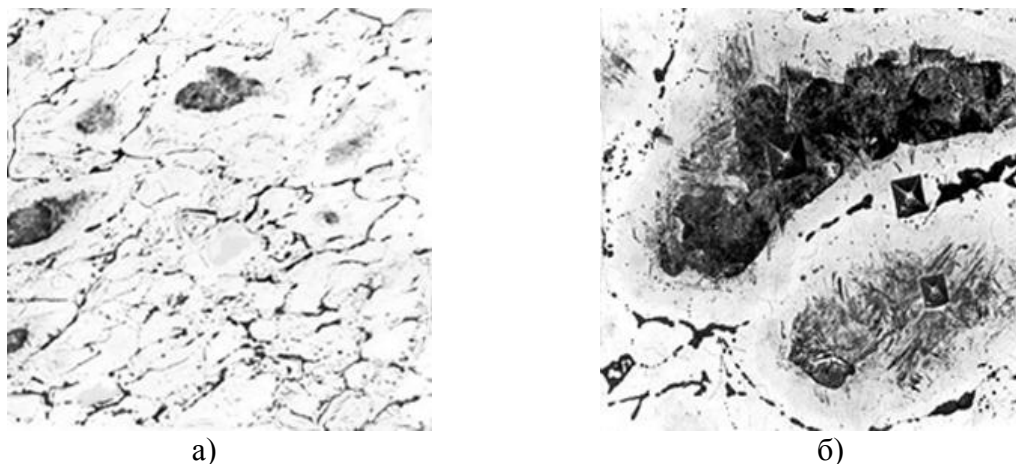


Рисунок 5 – Микроструктура стали 110Г13п при температуре спекания 1100°C (а), $\times 200$ и мартенситное и ферритное включения в структуре (б), $\times 500$ [The microstructure of 110G13P steel at sintering temperature of 1100 °C (a) $\times 200$ and martensitic and ferritic inclusions in the structure (b) $\times 500$]

Причиной образования таких локальных зон, в которых образуются нетипичные составляющие структуры для данной группы сталей, является то, что при таких низких температурах ферромарганец не переходит в жидкое состояние, в результате чего не происходит равномерного распределения ферромарганца в процессе спекания по металлической матрице. Контактная поверхность частиц железа и ферромарганца уменьшается, и в результате образуются области, обедненные марганцем и имеющие не аустенитную структуру [12, 13].

Различия в структуре образцов, изготовленных при температурах спекания 1100°C и 1125°C, металлографически не обнаруживаются.

Микроструктура образцов стали 110Г13п, полученных при температуре спекания 1150°C и 1175°C практически одинакова, и отличается от микроструктуры образцов, полученных при температуре спекания 1100°C и 1125°C, отсутствием ферритных включений (рис. 6а), а включения мартенсита очень немногочисленны (рис. 6б).

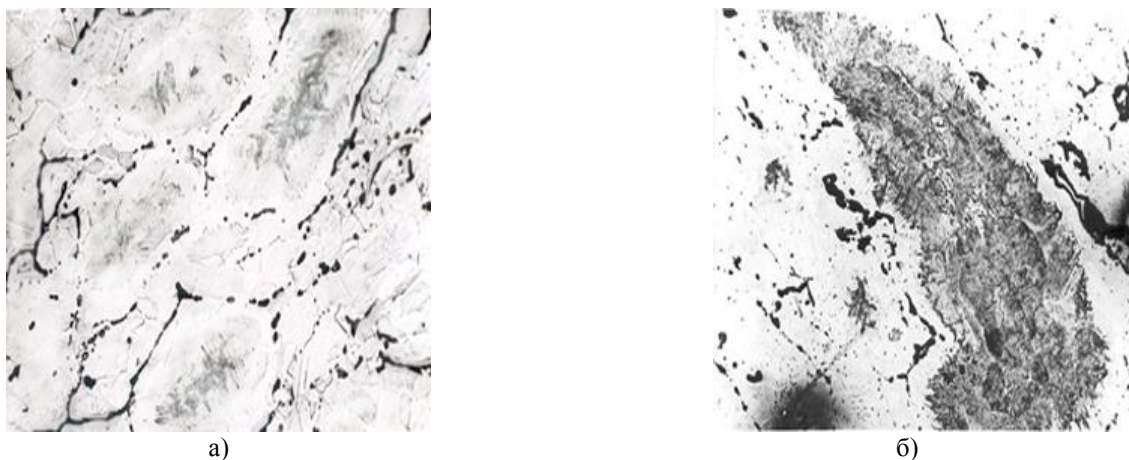


Рисунок 6 – Микроструктура стали 110Г13п при температуре спекания 1150°C (а), $\times 200$ и мартенситное включение в структуре при температуре спекания 1150°C (б), $\times 500$ [The microstructure of 110G13P steel at sintering temperature of 1150 °C (a) $\times 200$ and the martensitic inclusion in the structure at sintering temperature of 1150 °C (b) $\times 500$]

Ферромарганец практически весь растворился в железе, но из-за относительно невысокой температуре все же остались зоны, в которых диффузия марганца в железо прошла недостаточно полно.

Микроструктура стали 110Г13п после спекания при температуре 1200°C (рис. 7) наиболее близка к литой стали 110Г13л.

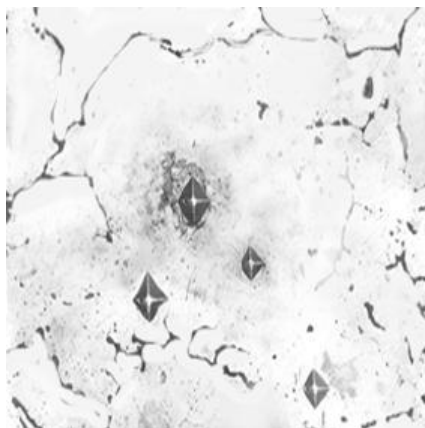


Рисунок 7 – Микроструктура стали 110Г13п при температуре спекания 1200°C, $\times 200$ [The microstructure of 110G13P steel at sintering temperature of 1200°C, $\times 200$]

Исследование области более высоких температур спекания (свыше 1200°C) нецелесообразно по следующим причинам: более интенсивно будет протекать процесс сублимации (переход в газообразное состояние) марганца, приводящий к неполучению требуемой структуры стали 110Г13 [14], существенное увеличение энергозатрат и расходных материалов (инертного газа защитной атмосферы, нагревателей печи и прочее).

Полученные результаты по критериям оптимальности Парето полностью соотносятся с данными практических исследований, полученных при формировании структуры и свойств порошковой стали 110Г13п [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорофеев, Ю. Г.* Влияние состава на структуру и свойства высокомарганцовистой металлокерамической стали Г13М / Ю. Г. Дорофеев, Н. Т. Жердицкий, В. А. Колесников // Новочеркасский политехнический институт. – Ростов-на-Дону : Ростовское книжное издательство, 1969. – Т. 221. – С. 146 -151.
2. *Дорофеев, Ю. Г.* Получение металлокерамической высокомарганцовистой стали Г13М // Ю. Г. Дорофеев, Н. Т. Жердицкий, В. А. Колесников // Новочеркасский политехнический институт. – Ростов-на-Дону: Ростовское книжное издательство, 1969. – Т. 221. – С. 49-57.
3. *Власов, В. И.* Литая высокомарганцовистая сталь / В. И. Власов, Е. Ф. Комолова. – Москва : Машгиз, 1963. – 196 с.
4. *Сабуров, В. П.* Синергетика: новые технологии получения и свойства металлических материалов / В. П. Сабуров. – Москва : Изд-во ИМЕТ АН СССР, 1991. – 51 с.
5. *Воынова, Т. Ф.* Высокомарганцовистые стали и сплавы / Т. Ф. Воынова. – Москва : Металлургия, 1988. – 343 с.
6. *Жердицкий, Н. Т.* Влияние технологических факторов на структуру и свойства стали Г13п / Н. Т. Жердицкий // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы Технической науки – 1975. – № 2. – С. 71-74.
7. *Дорофеев, Ю. Г.* Динамическое горячее прессование в металлокерамике. – Москва : Металлургия, 1972. – 176 с.
8. *Повышение качества отливок из стали Г13Л / Под редакцией И. Р. Крянина.* – Москва : Машгиз, 1963. – 204 с.
9. *Поддиновский, В. В.* Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В. В. Поддиновский, В. Д. Ногин. – Москва : Наука, 1982. – 256 с.
10. *Блауг, М.* Экономическая теория благосостояния Парето // Экономическая мысль в ретроспективе. – Москва : Дело, 1994. – С. 540-561.

11. Давыдов, Н. Г. Свойства, производство и применение высокомарганцевистой стали / Н. Г. Давыдов, В. В. Ситнов. – Москва : Машиностроение, 1996. – 232 с.
12. Воронова, Н. А. Влияние выдержки при закалочной температуре на механические свойства стали Г13Л // Н. А. Воронова, И. Е. Лев, И. З. Машинсон. – 1967. – № 4. – С. 25-27.
13. Дорофеев, Ю. Г. Высокомарганцевистая металлокерамическая сталь / Ю. Г. Дорофеев, Н. Т. Жердицкий, В. А. Колесников // Порошковая металлургия. – 1970. – № 11. – С. 28-31.
14. Прасюк, П. Ф. Термическая обработка литых деталей из стали Г13Л // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1968. – № 9. – С. 63-66.

REFERENCES

1. Dorofeev Y.G., Zherdinski N.T., Kolesnikov V.A. Vliyanie sostava na strukturu i svojstva vy`sokomarganczovistoj metallokeramicheskoy stali G13M [Effect of Composition on the Structure and Properties of G13M High-Manganese Cermet Steel]. Novochoerkasskij politexnicheskij institut [Technical Regulations of Novochoerkassk Politech Institute]. Rostov-na-Donu. Rostovskoe knizhnoe izdatel'stvo [Rostov-on-Don. Rostov book publishing house], 1969. T. 221. P. 146-151 (in Russian).
2. Dorofeev Y.G., Zherdinski N.T., Kolesnikov V.A. Poluchenie metallokeramicheskoy vysokomarganczovistoj stali G13M [Obtaining of G13M Cermet High Manganese Steel]. Novochoerkasskij politexnicheskij institut [Technical Regulations Of Novochoerkassk Politech Institute]. Rostov-na-Donu. Rostovskoe knizhnoe izdatel'stvo [Rostov-on-Don. Rostov Publishing House], 1969. T. 221. P. 49-57 (in Russian).
3. Vlasov V.I., Komolova E.F. Litaya vysokomarganczovistaya stal' [High-Manganese Cast Steel]. Moskava [Moscow], Mashgiz. 1963. 196 p. (in Russian).
4. Saburov V.P. Sinergetika: novye tehnologii polucheniya i svojstva metallicheskih materialov [Sinergetics: New Technologies for Production and Properties of Metallic Materials]. Moskava [Moscow], IMETANUSSR, 1991. 51 p. (in Russian).
5. Volynova T.F. Vysokomarganczovistye stali i splavy [High Manganese Steels and Alloys]. Moskava, Metallurgiya [Moscow, Metallurgy]. 1988. 343 p. (in Russian).
6. Zherdinski N.T. Vliyanie tehnologicheskikh faktorov na strukturu i svojstva stali G13p [Influence of Technological Factors on the Structure and Properties of G13P Steel]. Izvestiya Severo-Kavkazskogo nauchnogo czentra vysshey shkoly Tehnicheskoy nauki [Bulletin of the North Caucasian Scientific Center of the Higher School of Technical Science]. 1975. No 2. P. 71-74 (in Russian).
7. Dorofeev Y.G. Dinamicheskoe goryachee pressovanie v metallokeramike [Dynamic High Temperature Pressing in the Cermets]. Moskva, Metallurgiya [Moscow, Metallurgy]. 1972. 176 p. (in Russian).
8. Povyshenie kachestva otlivok iz stali G13L [Improving the Quality of Castings from G13L Steel]. Edited by. I.R. Kryanin. Moskva [Moscow]. Gos. nauchn.-tehn. izd-vo mashinostroitel'noy lit [Government Science Technological Publisher of Mechanical Engineering Literature]. 1963. 204 p. (in Russian).
9. Podinovskiy V.V., Nogin V.D. Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nyh zadach [Pareto-Optimal Solutions to Multicriteria Tasks]. Moskva, Nauka [Moscow, Science]. 1982. 256 p. (in Russian).
10. Blaug M. Ekonomicheskaya teoriya blagosostoyaniya Pareto [Pareto Economic Theory of Welfare]. Ekonomicheskaya mysl' v retrospektive [Economic Thought in Retrospect]. Moskva, Delo [Moscow, Delo]. 1994. P. 540-561 (in Russian).
11. Davydov N.G. Sitnov V.V. Svoystva, proizvodstvo i primeneniye vysokomarganczovistoj stali [Properties, Production and Using of High Manganese Steel]. Moskva, Mashinostroenie [Moscow, Mashinostrojenije]. 1996. 232 p. (in Russian).
12. Voronova N.A., Lev I.E., Mashinson I.Z. and other. Vliyanie vyderzhki pri zakalochnoj temperature na mehanicheskie svojstva stali G13L [Effect of Delay at Quenching Temperature on the Mechanical Properties of G13L Steel]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment Of Metals]. 1967. No 4. P. 25-27 (in Russian).
13. Dorofeev Y.G., Zherdinski N.T., Kolesnikov V.A. Vysokomarganczovistaya metallokeramicheskaya stal' [High Manganese Cermet Steel]. Poroshkovaya metallurgiya [Powder Metallurgy]. 1970. No 11. P. 28-31 (in Russian).
14. Prasuk P.F. Termicheskaya obrabotka lityh detalej iz stali [Heat Treatment of Cast Parts from G13L Steel]. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 1968. No 9. P. 63-66 (in Russian).

Technology Optimization for Producing 110G13P Powder Steel by System Analysis Methods**N.S. Zubenko¹, E.A. Tsvelik², R.V. Pirozhkov³**

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

¹*ORCID iD: 0000-0001-5682-519X*

WoS Researcher ID: AAD-4371-2020

e-mail: paradizka007@yandex.ru

²*ORCID iD: 0000-0001-9048-275X*

WoS Researcher ID: G-3560-2018

e-mail: stvelik@mail.ru

³*ORCID iD: 0000-0002-1547-6568*

WoS Researcher ID: AAD-3193-2020

e-mail: roman-3.14@yandex.ru

Abstract – The paper deals with theoretical aspects of optimizing the structure and properties of 110G13P austenitic powder steel using the system analysis method (Pareto method). The optimal sintering temperature of cold-pressed work pieces is selected using the criterion of maximum wear resistance of steel. Microstructures of 110G13P steel in the selected range of sintering temperatures are given. The dependence of the obtained microstructures on the sintering temperature of samples is shown.

Keywords: powder metallurgy, dynamic high temperature pressing, sintering, system analysis, optimization, Pareto method, microstructure.

ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

УДК 621.314.58

ПОЛНОМОСТОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С МЯГКОЙ
КОММУТАЦИЕЙ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ НАГРУЗКИ

© 2020 С.А. Баран, Г.П. Сметанкин

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

Разработка преобразователей с мягкой коммутацией для ЭПС позволит улучшить вопросы излучения помех и электромагнитной совместимости, снизить массогабаритные показатели за счет увеличения КПД и частоты преобразования. Значительное уменьшение коммутационных потерь позволяет использовать мощные IGBT – модули на повышенных частотах, которые они не способны выдержать в традиционных преобразователях с широтно-импульсной коммутацией.

Ключевые слова: IGBT-транзисторы, частотное преобразование, коммутация, электромагнитная совместимость.

Поступила в редакцию 02.08.2019

После доработки 04.10.2019

Принята к публикации 17.10.2019

Стремительное развитие элементной базы для силовой электроники в начале XXI века привело к появлению нового поколения IGBT с улучшенными характеристиками, дающими возможность снизить прямые потери проводимости и коммутационные потери. Это позволяет повысить КПД преобразователей и, как следствие, удельную мощность, что особенно важно для ЭПС.

Дальнейшее снижение массогабаритных показателей преобразовательной техники ЭПС возможно при значительном увеличении частоты коммутации, что заставляет разработчиков применять различные схемотехнические решения, позволяющие увеличить удельную мощность преобразователей по сравнению с традиционными схемами с широтно-импульсным регулированием за счет уменьшения коммутационных потерь IGBT (рис. 1).

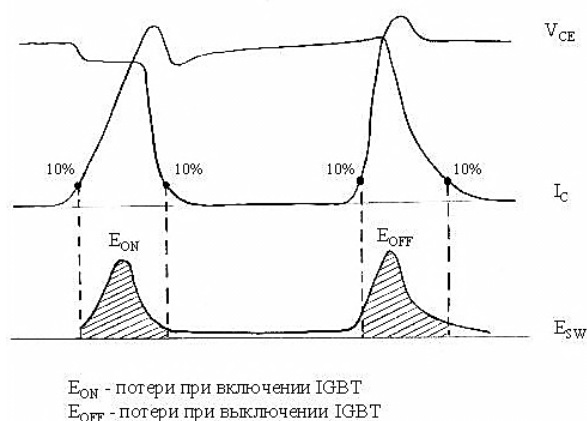


Рисунок 1 – Динамические потери IGBT при жесткой коммутации [Dynamic IGBT losses with hard commutation]

Одно из таких решений – это применение полномостового преобразователя с квазирезонансной коммутацией [1-2], в котором переходные процессы на временных интервалах переключения IGBT протекают при колебательном изменении токов и напряжений за счет паразитных и дополнительных реактивных элементов цепей коммутации. Включение и выключение IGBT в таких преобразователях осуществляется при малом или нулевом значениях тока и (или) напряжения на них, таким образом, имеет место так называемая «мягкая коммутация», что существенно снижает коммутационные потери и перенапряжения на силовых элементах.

На рисунке 2 представлена схема полномостового преобразователя с последовательным резонансным индуктором, способного работать в режиме мягкой коммутации. Выключение IGBT осуществляется при нулевом напряжении на них, а включение – при нулевых значениях тока и напряжения за счет колебательного перезаряда параллельного конденсатора в интервале коммутации.

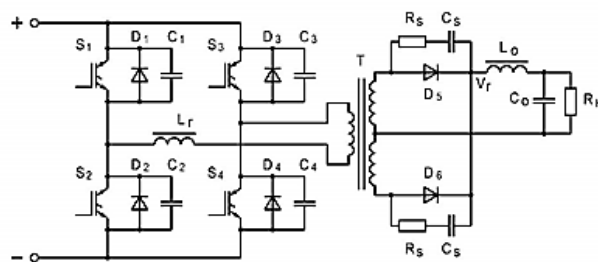


Рисунок 2 – Полномостовой преобразователь с мягкой коммутацией с последовательным резонансным индуктором [Full bridge soft-commanded converter with series resonant inductor]

Для управления мостового каскада используется метод сдвига по фазе момента переключения одной половины моста относительно другой (рис. 3). Особенностью фазосдвигающей технологии является то, что два IGBT, соединенные последовательно с трансформатором, могут быть открыты, а напряжение, приложенное к трансформатору, равно нулю. Это возможно потому, что эти IGBT не являются диагональными, а представляют собой или два верхних, или два нижних силовых ключа. В этом режиме первичная обмотка трансформатора по существу закорочена и имеет потенциал соответствующей шины входного напряжения. Значение тока первичной обмотки поддерживается на предыдущем уровне, так как не имеется напряжения, вызывающего изменение его значения.

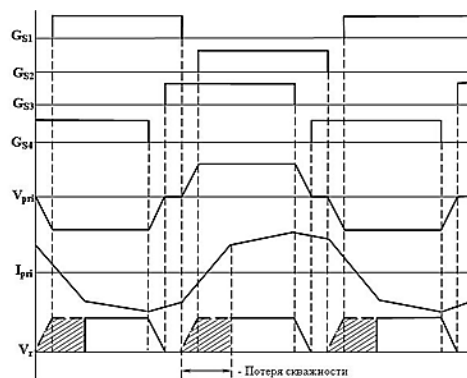


Рисунок 3 – Временная диаграмма работы преобразователя с последовательным резонансным индуктором [Timing diagram of a converter with a series resonant inductor]

Когда один из IGBT выключается, ток первичной обмотки начинает протекать через снабберную емкость ключа, порождая резонансный процесс между стоком ключа

и противоположной шиной входного напряжения, что позволяет противоположному IGBT того же самого плеча моста включиться при нулевом напряжении.

Энергия, необходимая для перезаряда снабберных конденсаторов $C_1 \div C_4$ накапливается в резонансном индукторе L_r , который может быть собственной индуктивностью рассеяния силового трансформатора L_{Lk} . Энергия, запасенная в резонансной индуктивности, должна быть больше, чем энергия, требуемая, чтобы заряжать и разряжать снабберные емкости IGBT во время резонансного процесса в пределах его длительности.

$$W_L = \frac{(L_r + L_{Lk}) I_{pri}^2}{2},$$

где I_{pri} – ток первичной обмотки,

$$W_C = \frac{C_r V_{pri}^2}{2},$$

где V_{pri} – напряжение первичной обмотки, C_r – суммарная емкость паразитных выходных емкостей IGBT и снабберных конденсаторов одного плеча.

Отсюда следует требование к величине резонансной индуктивности:

$$L_r > \frac{C_r V_{pri}^2 - I_{pri}^2 L_{Lk}}{I_{pri}^2},$$

т.е. при большой величине индуктивности рассеяния отпадает необходимость в дополнительном индукторе L_r .

Нами был испытан макетный образец данного преобразователя, с выходной мощностью 3 кВт с питанием от сети 3-фазного напряжения ~380В. Он показал высокую надежность, низкий уровень излучения помех, достаточно высокий КПД (до 91-92 %). Однако данная топология преобразователя имеет и ряд серьезных недостатков.

Во-первых, невозможность обеспечения переключения ключей при малой нагрузке или в отсутствии нагрузки. Минимальный ток первичной обмотки определяется выражением:

$$I_{pri(min)} = V_{pri} \sqrt{\frac{C_r}{L_r + L_{Lk}}}.$$

Во-вторых, эффект «потери скважности» – уменьшение эффективной скважности из-за перемангничивания резонансного индуктора (см. рис. 3):

$$D_{eff} = \frac{D}{1 + \frac{4(L_r + L_{Lk}) f_{sw}}{k^2 R_o}},$$

где D – скважность на первичной обмотке трансформатора;

f_{sw} – частота коммутации, коэффициент трансформации;

R_o – сопротивление нагрузки.

Это ведет к необходимости уменьшения значения k с вытекающими отсюда последствиями – увеличение амплитудных значений тока в первичной цепи и напряжений на выпрямительных диодах, увеличение индуктивности выходного дросселя для уменьшения пульсаций тока.

В-третьих, значительная величина L_r и L_{Lk} приводит к значительным паразитным колебаниям между резонансной индуктивностью первичной цепи и паразитной емкостью выпрямительных диодов, что ведет к увеличению интенсивности излучения помех и требует демпфирования диодов снабберными цепями.

Для преодоления указанных недостатков целесообразно использовать схему полномостового преобразователя с дополнительными LCC-цепями (рис. 4), которая способна обеспечить мягкое переключение IGBT во всем диапазоне нагрузки, в т.ч. без нагрузки [3-4].

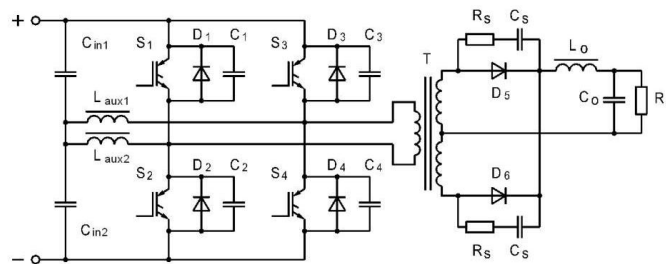


Рисунок 4 – Полномостовой преобразователь с мягкой коммутацией с дополнительными LCC-цепями
[Full-bridge soft-commutation converter with optional LCC circuits]

Дополнительные цепи состоят из емкостного делителя напряжения и двух индукторов, подключенных между средней точкой емкостного делителя и средней точкой каждого из плечей моста. Ток, циркулирующий в дополнительных индукторах, помогает разрядить снабберные емкости при переходных процессах в мосту, обеспечивая, таким образом, мягкое переключение во всем диапазоне нагрузки, даже без введения резонансного индуктора L_r [5-7].

Энергия, запасенная в дополнительном индукторе, равна:

$$W_L = \frac{I_o^2}{2k^2} L_{Lk} + \frac{V_{pri}^2}{32 f_{sw}^2 L_{aux2}}.$$

Мягкая коммутация обеспечивается при условии $W_L > W_C$.

Как показали расчеты, для применений с высоким входным напряжением, например, выпрямленное 3-фазное напряжение ~ 380 В, вклад тока дополнительных индукторов в общий ток через ключи очень велик, что ухудшает КПД и требует применения IGBT-модулей с большим запасом по току. Для таких применений целесообразно оставить в первичной обмотке резонансный индуктор L_r , что значительно увеличивает требуемые индуктивности дополнительных дросселей и снижает ток через ключи, т.е. необходим компромисс между потерей скважности из-за перезаряда L_r и величинами L_{aux1} и L_{aux2} . Правильное решение этого вопроса позволяет создать преобразователь с высоким КПД и, как следствие, большой удельной мощности, низким уровнем электромагнитного излучения, высокой частотой коммутации [8-9].

Был создан и испытан макет преобразователя (рис. 5). Трансформатор – ГМ14ДС 200x100x20, $k = 1,3:1$, намотка бифилярная, $L_{Lk} = 3 \mu\text{H}$, IGBT-модули - Mitsubishi PM75DSA120, $L_r = 35 \mu\text{H}$, $L_{aux1} = 210 \mu\text{H}$, $L_{aux2} = 610 \mu\text{H}$, $C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}$, $C_3 = C_4 = 5 \text{ nF}$, $R_s = 150 \text{ Ом}$, $L_o = 1,3 \text{ мГн}$, $f_{sw} = 20 \text{ КГц}$, $R_H = 8,7 \text{ Ом}$.

КПД преобразователя на полной нагрузке около 95% ($I_o = 34,4 \text{ А}$, $U_o = 300 \text{ В}$, мощность $\approx 10,3 \text{ кВт}$, потеря скважности $\approx 20\%$).

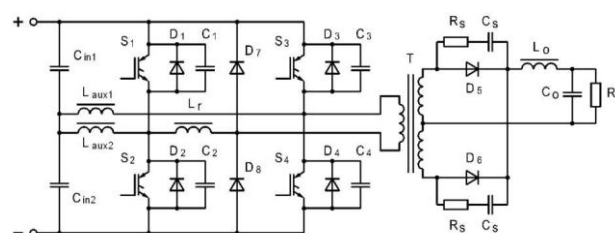


Рисунок 5 – Схема макетного образца преобразователя [Converter prototype layout]

Введенные в схему диоды D_7 и D_8 шунтируют индуктивность L_r при закрытии выпрямительных диодов D_5 и D_6 , что значительно снижает паразитные колебания на них (интенсивность их определяется только величиной L_{lk}) и уменьшает потери в снаббере C_S - R_S . При $C_S=1\text{ nF}$ выброс напряжения на диодах составлял $\sim 18\%$ от амплитудного значения, при $C_S=3,3\text{ nF}$ - $\approx 5\%$ [10-11].

Увеличить удельную мощность преобразователя можно, заменив L_r на насыщаемый индуктор, что уменьшит потерю скважности на полной нагрузке, при условии решении вопроса охлаждения насыщаемого индуктора [12].

Таким образом, разработка преобразователей с мягкой коммутацией для ЭПС позволит улучшить вопросы излучения помех и электромагнитной совместимости, снизить массогабаритные показатели за счет увеличения КПД и частоты преобразования. Значительное уменьшение коммутационных потерь позволяет использовать мощные IGBT – модули на повышенных частотах, которые они не способны выдержать в традиционных преобразователях с широтно-импульсной коммутацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vlatcovic V, Ridley R. B. Considerations for high-voltage high-power full-bridge ZVS-PWM converter. Applied Power and Electronics Conference Proceeding. 1990. (IEEE Catalog No. CH2853-0/90/0000-0265) P. 275-284.
2. Jovanovich M. M., Tabisz W. A., Lee F. C. Zero-Voltage Switching Technique in High-Frequency Off-Line Converters. IEEE Applied Power and Electronics Conference Proceeding. 1988.
3. Jain D.K., Jain P.K., Haibo Zhang Analysis and Design of an Auxiliary Commutated Full Bridge DC/DC Converter Topology Including the Effect of Leakage Inductance. Telecommunications Energy Conference. 2002. ISBN: 0-7803 -7512-2. P. 240-247.
4. Borges B.V., Beirante J.P. A Full Bridge Zero Voltage Switched Phase Shifted DC-DC Converter with Enlarged Duty Cycle and ZVS Range. On Power Electronics and Applications. 2000. № 2. P. 2.1-2.6.
5. Шевырëв, Ю. В. Повышение качества электрической энергии в сетях с полупроводниковыми преобразователями / Шевырëв Ю. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – № S4. – 2011. – С. 234-241.
6. Чëпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии / Чëпмэн Д. // Энергосбережение. – 2004. – № 1. – С. 66-69.
7. Добрусин, Л. А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники / Л.А. Добрусин – Москва : НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 84 с.
8. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения – URL : <http://docs.cntd.ru/document/1200006034>
9. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии / Розанов Ю. К., Рябчицкий М.В. // Электротехника. – 1998. – № 3. – С. 10-17.
10. Солодухо, Я. Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. Ч.1. Реактивная мощность при несинусоидальных режимах работы / Я. Ю. Солодухо. – Москва : Информэлектро, 1987. – 50 с.
11. Парфëнов, Б. М. Статические режимы фильтро-компенсирующих устройств в системах электропривода соизмеримой мощности / Б. М. Парфëнов, Ю. В. Шевырëв // Автоматизированный электропривод. – Сборник научных трудов. – ОАО «Электропривод», 2002. – С. 134-153.
12. Шевырëв, Ю. В. Методы моделирования и повышения электроэнергетических показателей электротехнических комплексов буровых установок / Ю. В. Шевырëв – Москва : Московский государственный геологоразведочный университет, 2005. – 177 с.

REFERENCES

- [1] Vlatcovic V, Ridley R.B. Considerations for High-Voltage High-Power Full-Bridge ZVS-PWM Converter. Applied Power and Electronics Conference Proceeding. 1990. (IEEE Catalog No. CH2853-0/90/0000-0265) P. 275-284.
- [2] Jovanovich M.M., Tabisz W.A., Lee F.C. Zero-Voltage Switching Technique in High-Frequency Off-Line Converters. IEEE Applied Power and Electronics Conference Proceeding. 1988.

- [3] Jain D.K., Jain P.K., Haibo Zhang Analysis and Design of an Auxiliary Commutated Full Bridge DC/DC Converter Topology Including the Effect of Leakage Inductance. Telecommunications Energy Conference. 2002. ISBN: 0-7803-7512-2. P. 240-247.
- [4] Borges B.V., Beirante J.P. A Full Bridge Zero Voltage Switched Phase Shifted DC-DC Converter with Enlarged Duty Cycle and ZVS Range. On Power Electronics and Applications. 2000. № 2. P. 2.1-2.6.
- [5] Shevryev Yu.V. Povyshenie kachestva elektricheskoy energii v setyax s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami [Improving the Quality of Electrical Energy in Networks with Semiconductor Converters]. Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-texnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. № S4. 2011. P. 234-241 (in Russian).
- [6] Chapman D. Cena nizkogo kachestva elektroeenergii [Price of Low Quality Electricity]. E'nergoberezhenie [Energy Saving]. 2004. №1. P. 66-69 (in Russian).
- [7] Dobrusin L.A. Fil'tro-kompensiruyushhie ustrojstva dlya preobrazovatel'noj tekhniki [Filter Compensating Devices for Converter Equipment]. Moskva [Moscow]: NTF «Energoprogress», 2003. 84 p. (in Russian).
- [8] GOST 13109-97. Normy kachestva elektricheskoy energii v sistemax elektrosnabzheniya obshhego naznacheniya [Quality Standards of Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006034> (in Russian).
- [9] Rozanov Yu.K., Ryabchitsky M.V. Sovremennyye metody uluchsheniya kachestva elektroeenergii [Modern Methods of Improving the Quality of Electricity]. E'lektrotexnika [Electrical Engineering]. 1998. №3. P. 10-17 (in Russian).
- [10] Soloduh I.Yu. Tendencii kompensacii reaktivnoj moshhnosti. Ch.1. Reaktivnaya moshhnost' pri nesinusoidal'nyx rezhimakh raboty [Reactive Power Compensation Trends. Part 1. Reactive Power during Non-Sinusoidal Operation]. Moskva: Informe'lektro [Moscow: Informelectro]. 1987. 50 p. (in Russian).
- [11] Parfenov B.M., Shevryov Yu.V. Sticheskie rezhimy fil'tro-kompensiruyushhix ustroystv v sistemax elektropriroda soizmerimoy moshhnosti [Static Modes of Filter-Compensating Devices in Electric Drive Systems of Comparable Power]. Avtomatizirovannyj elektroprivod [Automated Electric Drive]. Sbornik nauchnyx trudov [Collection of scientific works]. OAO «E'lektroprivod» [«Elektroprivod» OJSC]. Moscow. 2002. P. 134-153 (in Russian).
- [12] Shevryov Yu.V. Metody modelirovaniya i povysheniya elektroe'nergeticheskix pokazatelej elektrotexnicheskix kompleksov burovyx ustanovok [Methods of Modeling and Improving the Electric Power Indices of Electrical Engineering Complexes of Drilling Rigs]. Moskva: Moskovskij gosudarstvennyj geologorazvedochnyj universitet [Moscow: Moscow State Geological Prospecting University]. 2005. 177 p. (in Russian).

Full-Bridge Converter with Soft Commutation in All Load Range

S.A. Baran¹, G.P. Smetankin²

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

¹ORCID iD: 0000-0002-3232-4072

WoS Researcher ID: I-7933-2018

e-mail: bastr@rambler.ru

²ORCID iD: 0000-0002-8191-6496

e-mail: nvo_@mail.ru

Abstract – The development of converters with soft commutation improves issues of radiation interference and electromagnetic compatibility, reduce weight and size parameters by increasing efficiency and conversion frequency. A significant reduction in commutation losses allows the use of high-power IGBT modules at higher frequencies which they are not able to withstand in traditional converters with pulse-width commutation.

Keywords: IGBTs, frequency conversion, commutation, electromagnetic compatibility.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.586

**НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В РАСЧЕТАХ ИЗ-ЗА «МГНОВЕННЫХ»
АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ВВЭР-1000**

© 2020 Д.А. Амер^{*}, С.П. Никонов^{**}

^{*}Александрийский Университет, Александрия, Египет, 11432

^{**}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия, 115409

В работе показано возникновение волн давления и их распространение в оборудовании первого контура реакторной установки ВВЭР-1000 при аварийных ситуациях, связанных с мгновенной остановке Главного циркуляционного насоса или двухстороннем истечении при мгновенном двухстороннем разрыве в холодной нитке главного циркуляционного трубопровода. Исследуется влияние времени инициализации аварии (остановки насоса, разрыва трубопровода) на интенсивность процесса -амплитуду, частоту изменения давления. Рассматриваются перепады давления в процессе аварийной ситуации на основных элементах контура. Показано, что максимальные изменения в амплитуде и частоте, как самого давления, так и перепадов давления на элементах контура относятся к начальной стадии аварии. Основное внимание направлено на перепады давления на оборудовании, т.к. именно этот параметр определяет динамические нагрузки на оборудование, которые могут привести к выходу его из строя.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, Калининская АЭС, разрыв с двухсторонним истечением, аварии с потерей теплоносителя, ГЦН, мгновение, аварийные ситуации, волны давления, Время полного раскрытия сечения течи.

Поступила в редакцию 09.11.2019

После доработки 13.12.2019

Принята к публикации 25.12.2019

Introduction

According to the guidance [1], a studying of the instantaneous emergency modes are included in the report on the safety justification of the NPP with a WWER reactor, which is presented in the set of documents justifying the application for a license for the construction or operation of the NPP. In works [2-4], a study for: the instantaneous stop of MCP in the first loop of the primary circuit (ten seconds of the real process are considered) and double-end break (DBE) in the cold leg (two seconds of the real process are considered), were done. In case of an accident emergency protection reactor (PR-1) only works on the 2nd signal. The fuel composition and kinetics of the reactor core was considered for the case of the end of the cycle. The produced pressure waves and their propagation in the equipment of the primary circuit of the installation are shown. Thus, in the present study, a different gap of time is considered for both emergency cases. The pressure differences were considered because it is the main consequences after LBLOCA in WWER-1000 reactor. And this change in pressure was observed with a strongest amplitude and frequency of pressure fluctuations on NPP elements during the first period after the emergency, which can lead to significant dynamic loads on the structural elements of these objects. The parameters of a typical reactor plant V-320 (WWER-1000) are used for the calculation, particularly, the 3rd unit of the Kalinin NPP. All initial data for the calculation were obtained from the materials of the international standard problem Kalinin-3 [5]. The calculations were carried out using the computational best estimate code «ATHLET», developed by the society for reactor safety (Gesellschaft für

Anlagen-und Reaktorsicherheit-GRS) [6], Germany and certified in Russia for use in calculations to justify the safety of reactors with water coolant [7].

About the Reactor modeling by code ATHLET

As mention, the used NPP is the 3rd unit of the Kalinin NPP which were modeled using code ATHLET including the 4 loops of the primary coolant circuit and the secondary circuit too. Figure 1 shows core nodalization and sectors in the core. The core was divided into 6 parts with a central part. 4 of the six are directly connected to the coolant loops and the other two parts are connected with them using cross-connection considering the heat transfer between all. Figure 2 shows internal Structure and its nodalization using ATHLET input graphic.

As all information about the program ATHLET can be find in its manual [6], so its description will not be included here.

Quite widely used capabilities of the ATHLET code for linking with various three-dimensional neutron-physical programs in the calculation of the spatial distribution of energy release fields and the spatial distribution of the coolant parameters in the reactor core (up to the sub-cassette), an example are the works [8-12].

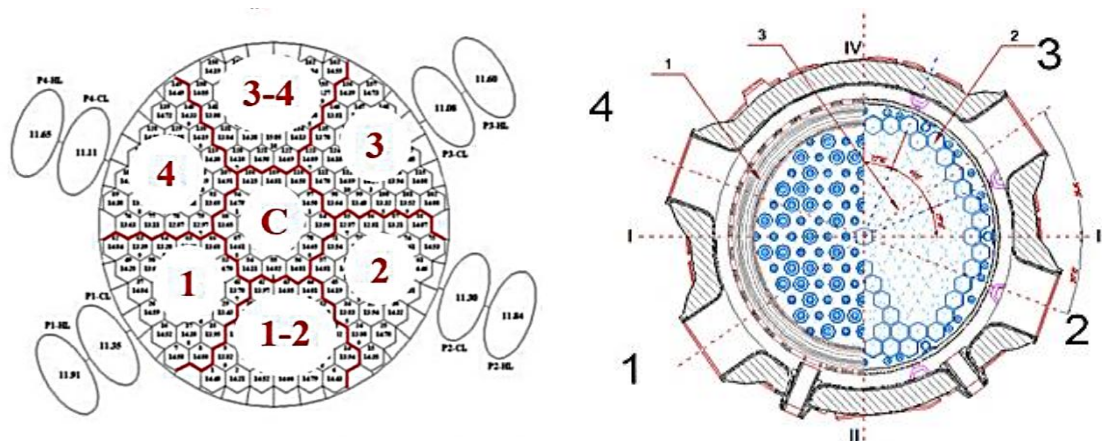


Figure 1 – Core nodalization and sectors in the core

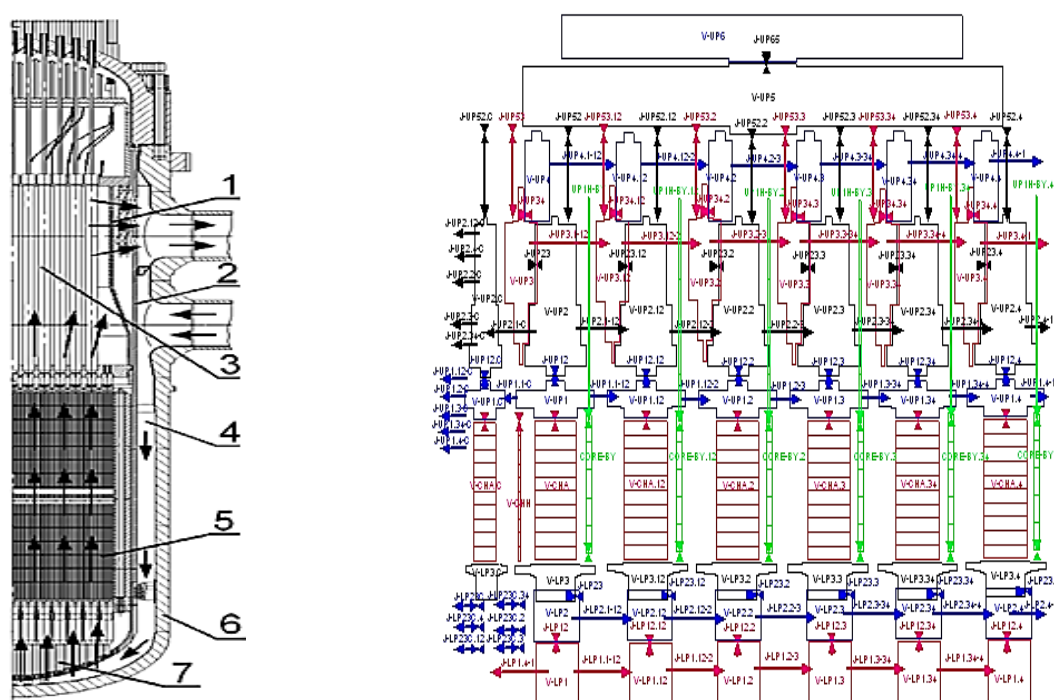


Figure 2 – Internal Structure and its nodalization

The point of the present research

As mentioned in the conclusion of those works, the considered "instantaneous" period of time of initialization of an accident (pump stop or pipeline rupture) is not defined in the guidance. Thus, in the present study, a different gap of accident initialization time (10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} and 1 second) are considered for two emergencies:

- 1) Double End Large Break LOCA (DELBLOCA) at the reactor entrance in the first loop of the primary circuit (the considered location for break is shown in figure 3),
- 2) Main Circulation Pump (MCP) in the first cooling loop stops.

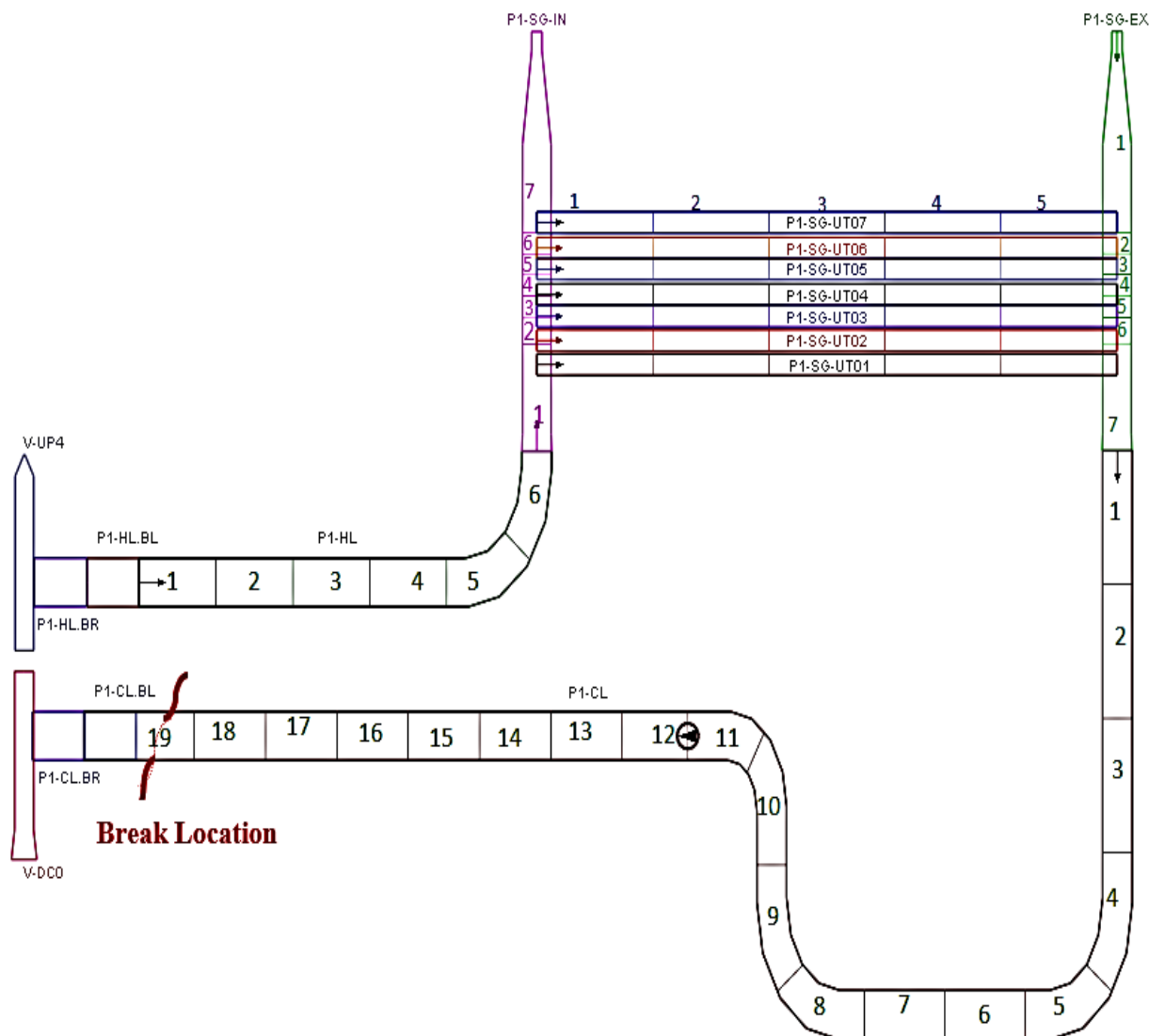


Figure 3 – The considered break location for the first case in the study

Results and discussion

1) Case 1: MCP stops:

Figure 4 shows the pressure waves in the reactor from the side of emergence comparing the 5-time gaps. For time gap ' 10^{-3} ' and ' 10^{-4} ' second, the first peak is sharper than the same in case of time gap ' 10^{-2} ' and ' 10^{-1} ' second. While for time gap '1' second case, the decreasing behavior on average is also noticed, but without the fluctuations which present in the other 4 cases.

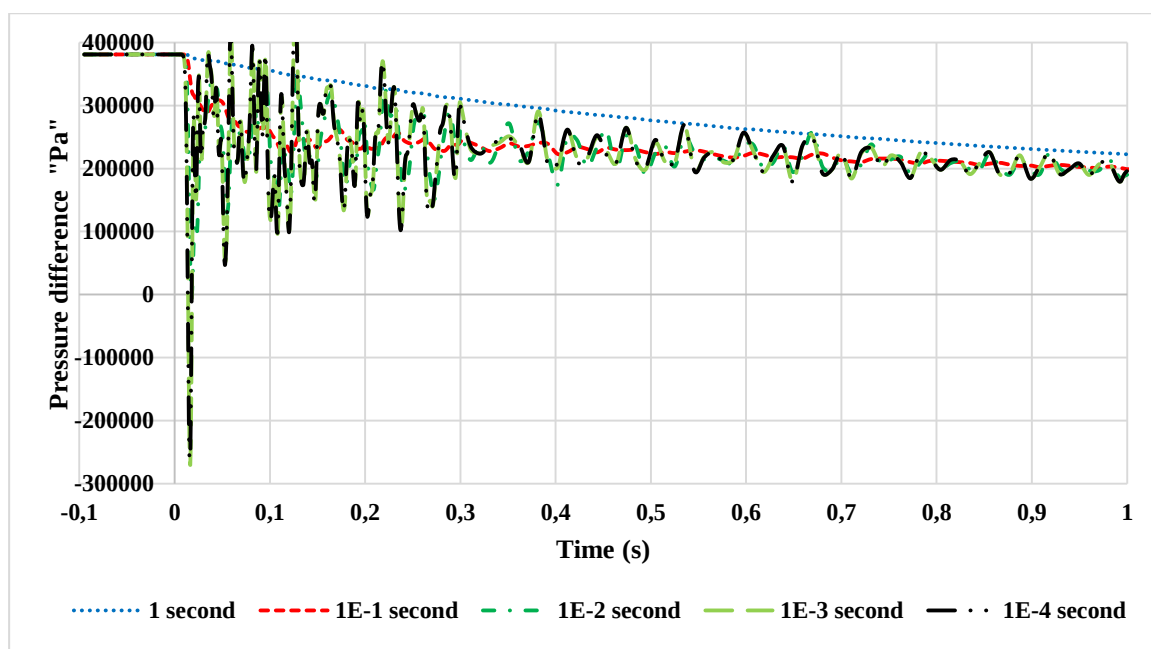


Figure 4 – Changing the pressure difference at the reactor from the side of the emergency loop in the case of MCP stops

Moreover, figure 5 shows the changing of the pressure drop at the core from the side of the emergency loop comparing the 5 considered time gaps. The sharpest peak of pressure drop is recorded in the cases of the time gaps ' 10^{-3} ' And ' 10^{-4} ' second followed by pressure drops due to time gap = 10^{-2} then 10^{-1} seconds. The smoothest pressure drops was recorded due to 1 second time gap.

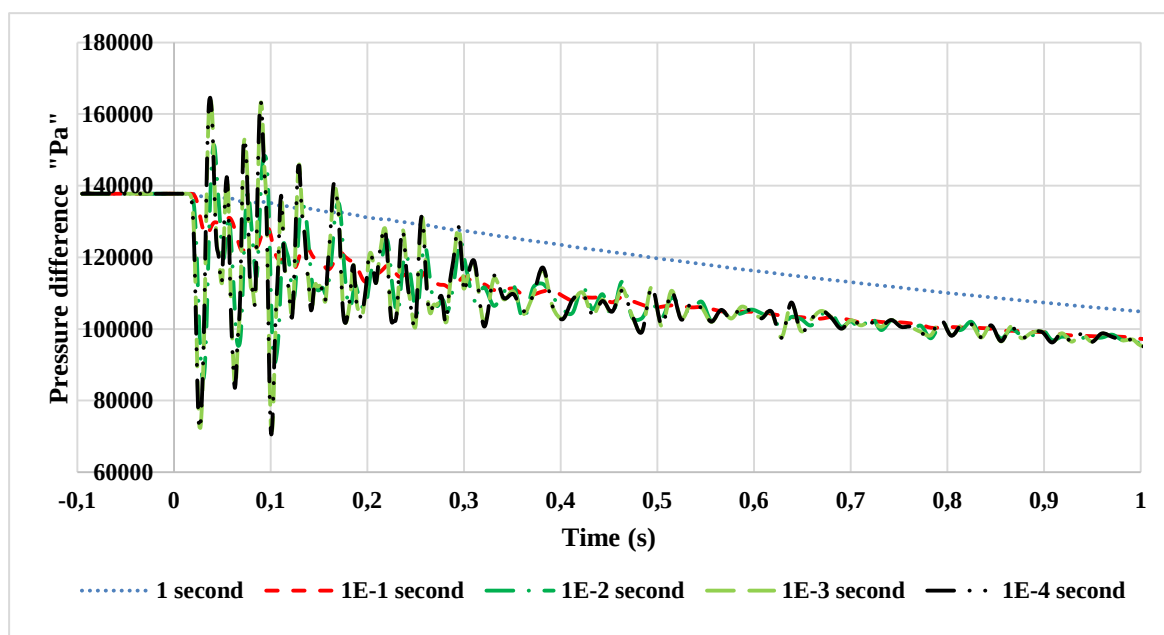


Figure 5 – Changing the pressure difference at the core from the side of the emergency loop in the case of MCP stops

Furthermore, the pressure wave in MCP is shown in figure 6. Similarly, the smoothest drop is observed in the case of time gap = 1 second. Then, a one-down peak is noticed due to a time gap = 10^{-1} second. And finally, a wavy pressure drop with oscillations was recorded due to the time gaps ' 10^{-3} ', ' 10^{-4} ', and ' 10^{-2} ' second too.

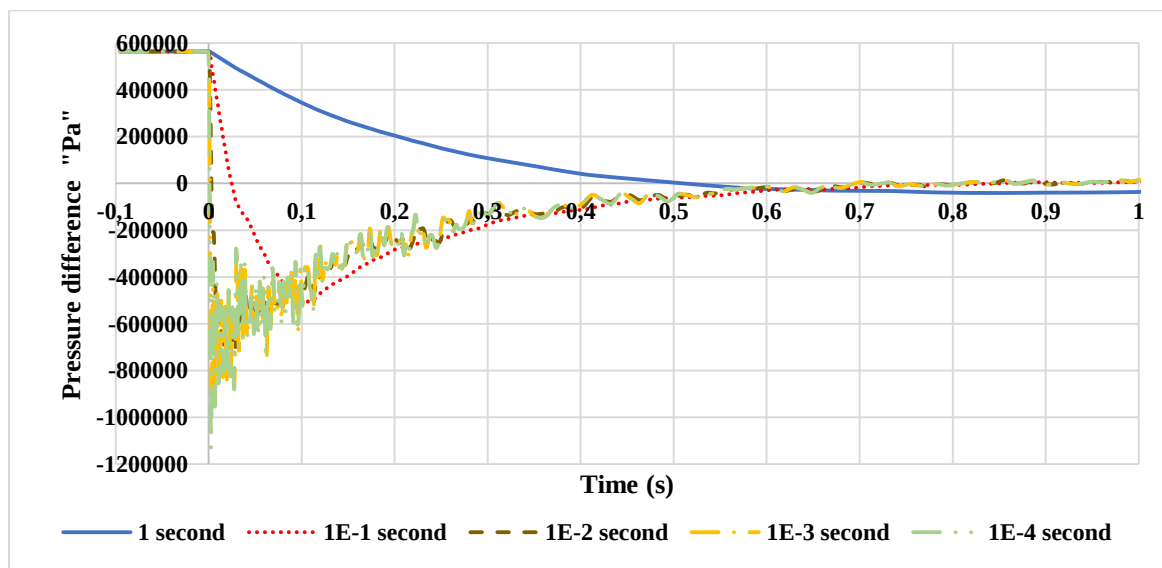


Figure 6 – Changing the pressure difference at the MCP in the emergency loop in the case of MCP stops

The fourth main component here is the steam generator. Figure 7 illustrates the consequences pressure waves in the SG in the emergence loop due to the considered the 5-time gaps. As well, the same response behavior like in the first three components is the recorded here.

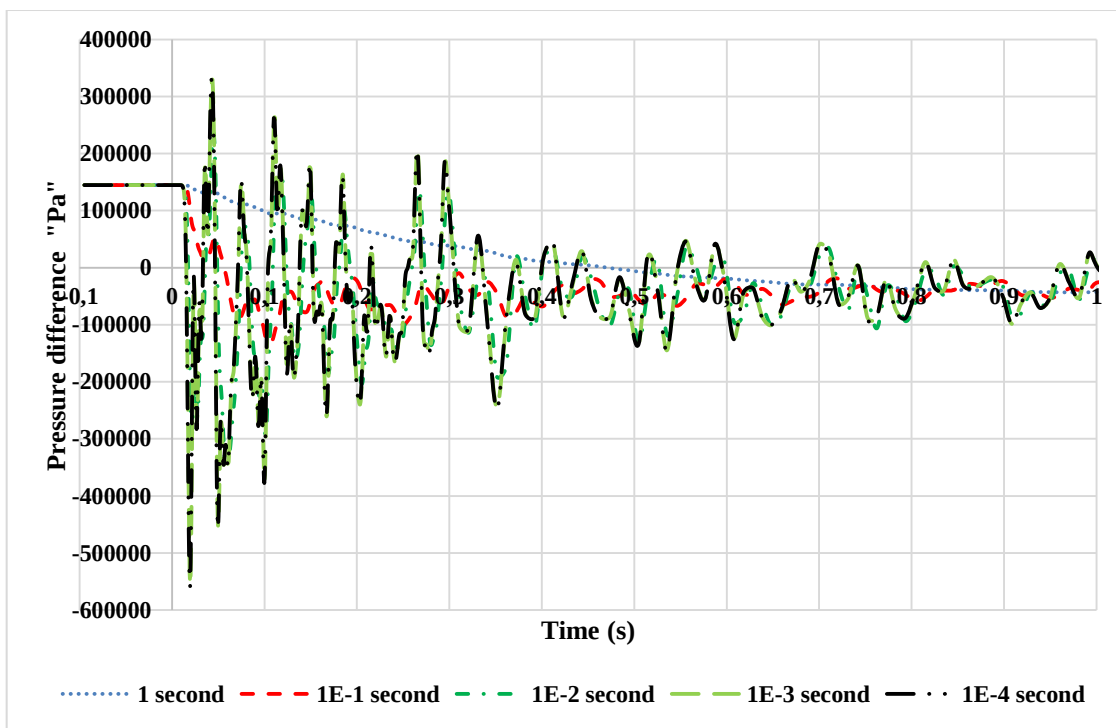


Figure 7 – Change of pressure difference on the SG from the side of the emergency loop in the case of MCP stops

2) Case 2: DELBLOCA

In the case of double end large break LOCA (DELBLOCA), two groups of time gaps are considered:

- 1) 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} comparing with 1 second, and
- 2) 0.3, 0.5, 0.7 and 1 second.

Considering the same time gaps in DELBLOCA case, the results show a completely different behavior for the pressure changing in case of 1 second than the others considered 4-time gaps. This difference can be noticed for pressure drop at reactor, core, MCP and the steam generator which shown in figures 8, 10, 12 and 14 respectively.

The other reason to include more time gaps in case of DELBLOCA is the general conclusion which was included in work [4]: “Comparing the two cases, MCP.1 instant stop and LOCA, the changes in all parameters are sharper and stronger in the case of LOCA than in the case of MCP.1 instant stop”.

Starting with the most important component: the reactor, figure 8 shows the pressure waves because of the 5-time gaps which considered in the first case study (MCP stops). But, here due to the completely differed recorded response from 1 second time gap to the others, thus in figure 9 shown the pressure waves due to time gaps = 0.3, 0.5, 0.7 and 1 second. The manner / behavior in which the pressure changed in case of 1-second time gap is more similar to it in the case of 0.3, 0.5 and 0.7 than in the case of 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} and 10^{-4} . There is no debate that the closest situation to the reality is 1 second time gap. Nevertheless, the maximum drop-peak is recorded in the case of time gap = 10^{-4} second with a value of (-9.98×10^6) .

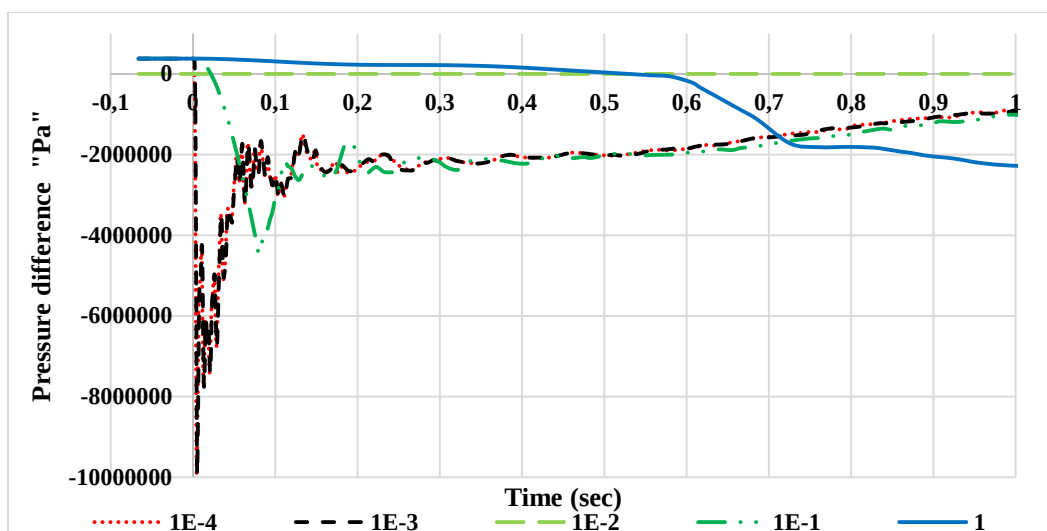


Figure 8 – Changing the pressure difference at the reactor from the side of the emergency loop (first group time gaps) in the case of DELBLOCA

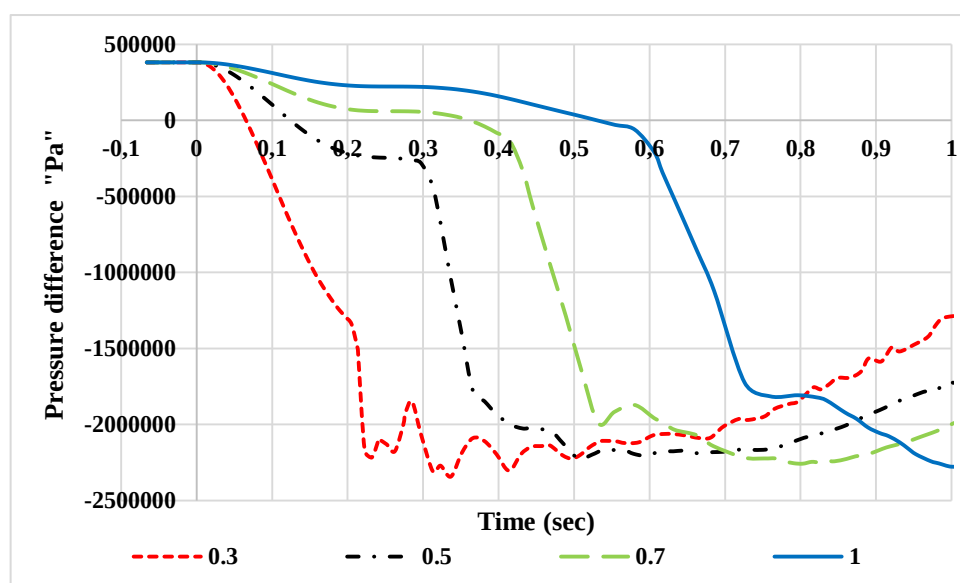


Figure 9 – Changing the pressure difference at the reactor from the side of the emergency loop (second group time gaps) in the case of DELBLOCA

The second main component is the reactor core. Also, the pressure waves due to the first-time gaps group (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} and 1 second) are shown in figure 10, the for the second time gaps group (0.3, 0.5, 0.7 and 1 second) are shown in figure 11.

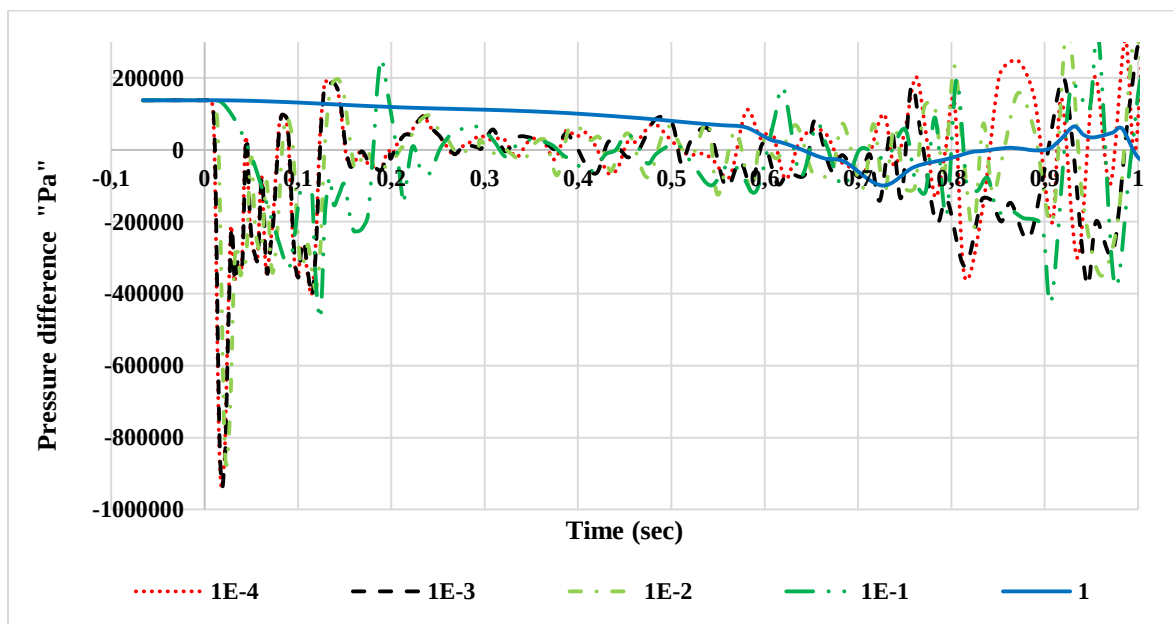


Figure 10: Change of pressure difference on the core from the side of the emergency loop (first group time gaps) in the case of DELBLOCA

Moreover, like mentioned before even the closest case to reality is the case of time gap = 1 second, but again, here the maximum drop-peak is recorded for time gap = 10^{-4} second with a value = -9.34×10^5 Pa.

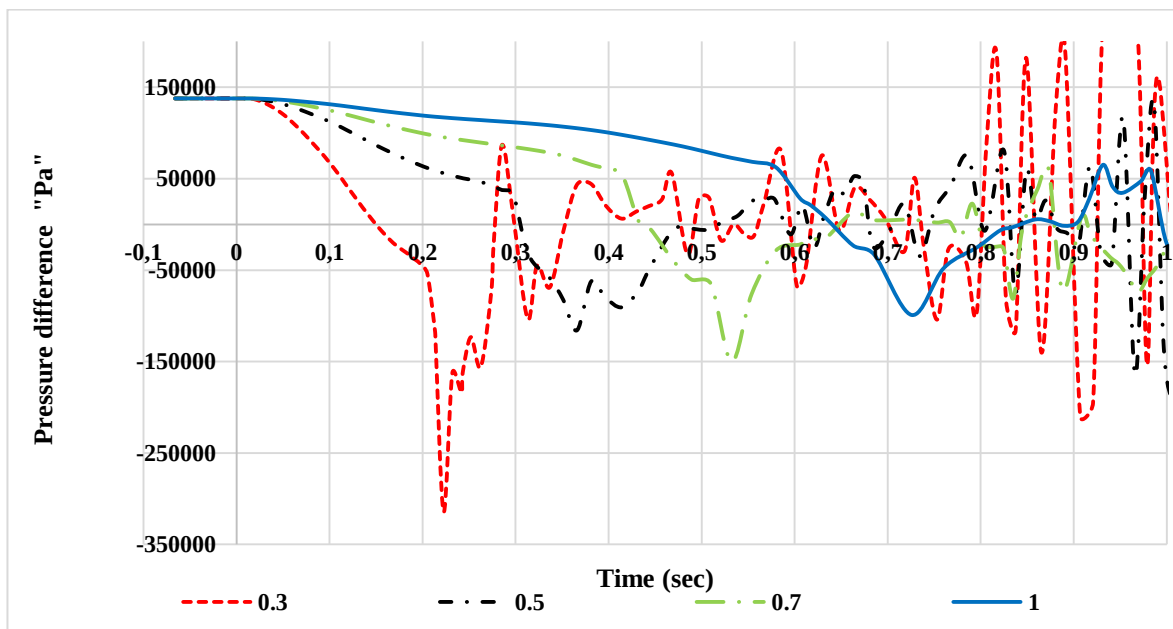


Figure 11 – Change of pressure difference on the core from the side of the emergency loop (second group time gaps) in the case of DELBLOCA

The third main component is the main circulation pump (MCP) which in the emergency loop. Figure 12 illustrates the comparison between the pressure waves due to the first group of time gap, while in figure 13 shown the pressure waves due to the second group of time gaps as it was mentioned for reactor and core.

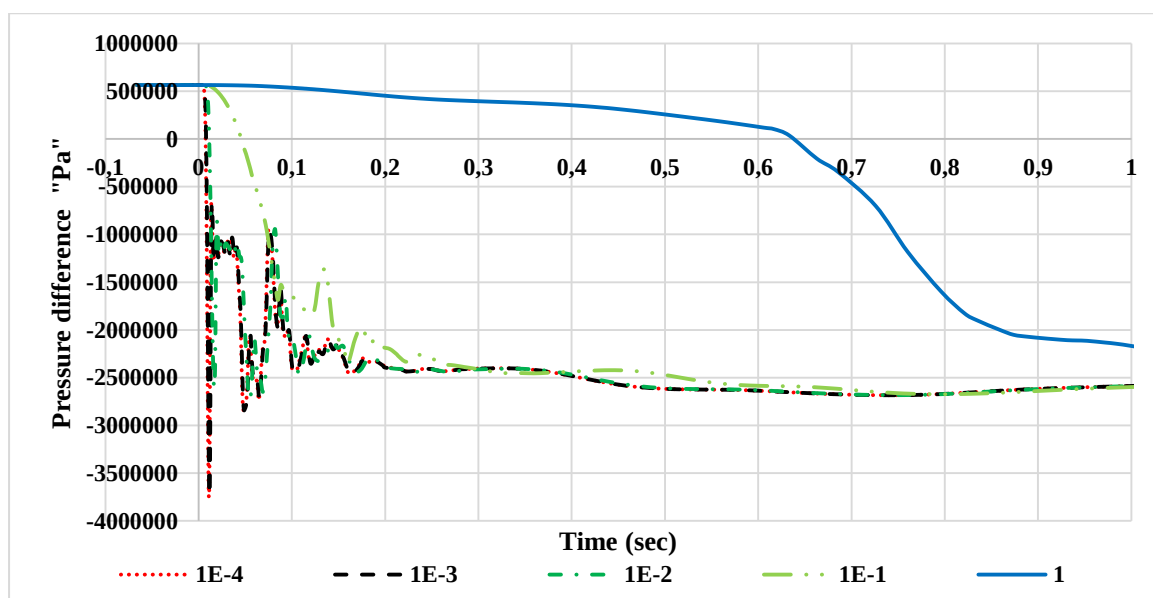


Figure 12 – Changing the pressure difference at the MCP in the emergency (first group time gaps) in the case of DELBLOCA

The same likes for the reactor and core, here too for the MCP, the maximum drop-peak is presence in the case of time gap = 10^{-4} and 10^{-3} seconds. Moreover, the completely different pressure wave in the case of time gap = 1 second than the other first group time gaps, which is more likely to be compared with the second group time gaps as shown in figure 13.

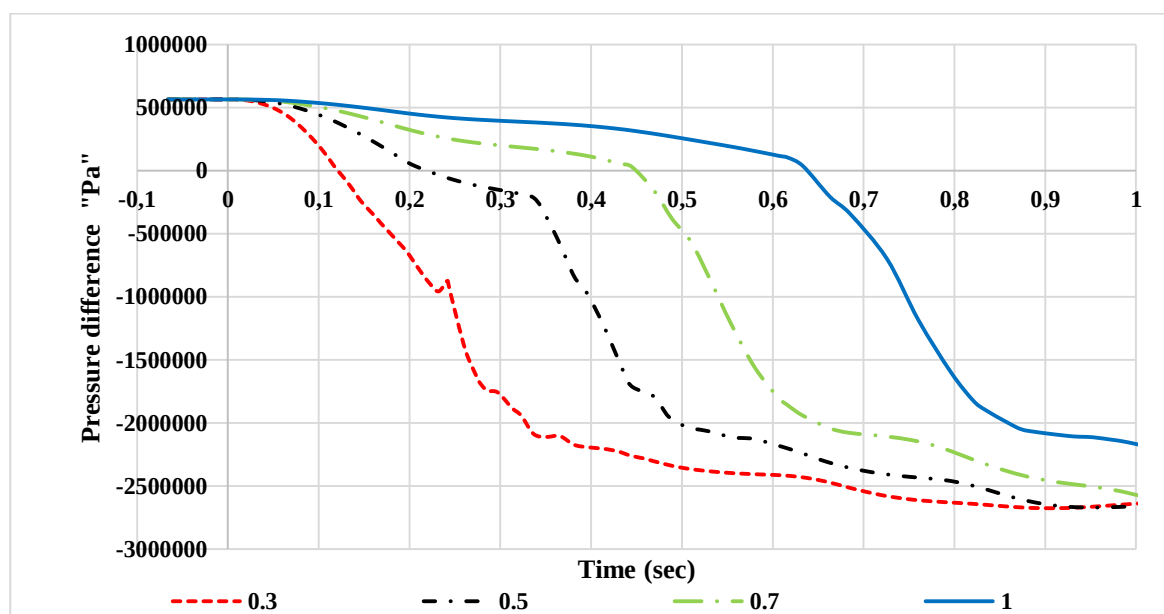


Figure 13 – Changing the pressure difference at the MCP in the emergency (second group time gaps) in the case of DELBLOCA

The last main component is the steam generator which is in the emergency loop. The maximum pressure difference in the steam generator is recorded due to time gap = 10^{-3} with value = 6.81×10^6 , while -as expected- at time gap = 1 second the pressure different has a completely different manner than the others comparable time gaps in the same figure.

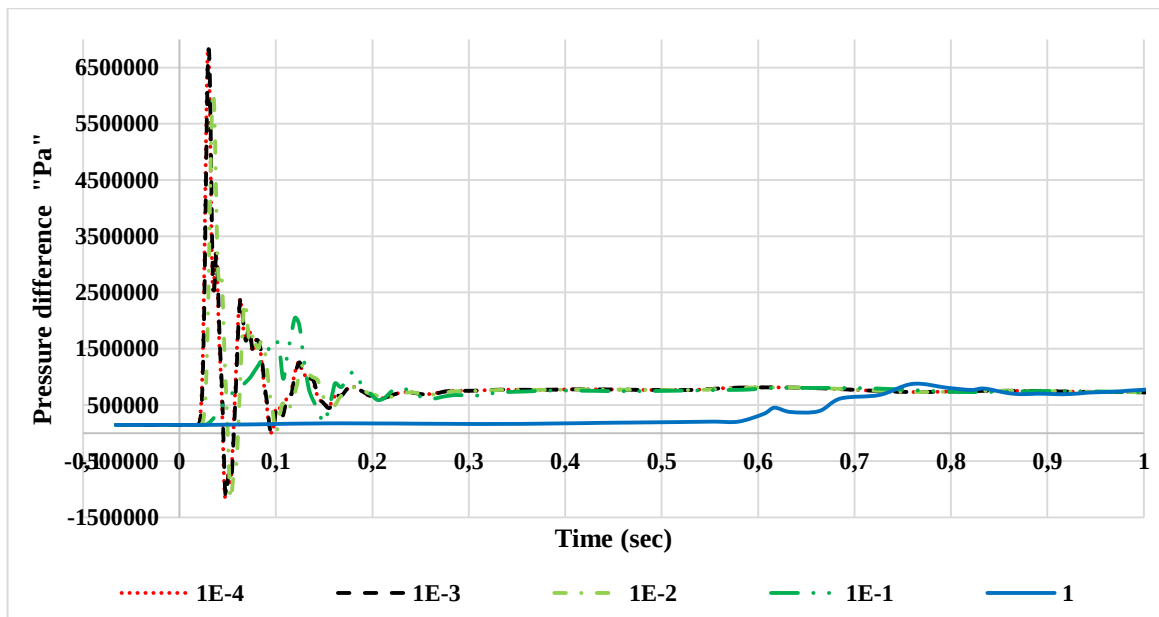


Figure 14 – Changing the pressure difference at the SG from the side of the emergency loop (first group time gaps) in the case of DELBLOCA

Figure 15 shows the wave of the pressure different in SG due to the second group time gaps. The maximum value is presented in the case of time gap = 0.3 second with peak value = 1.53×10^6 .

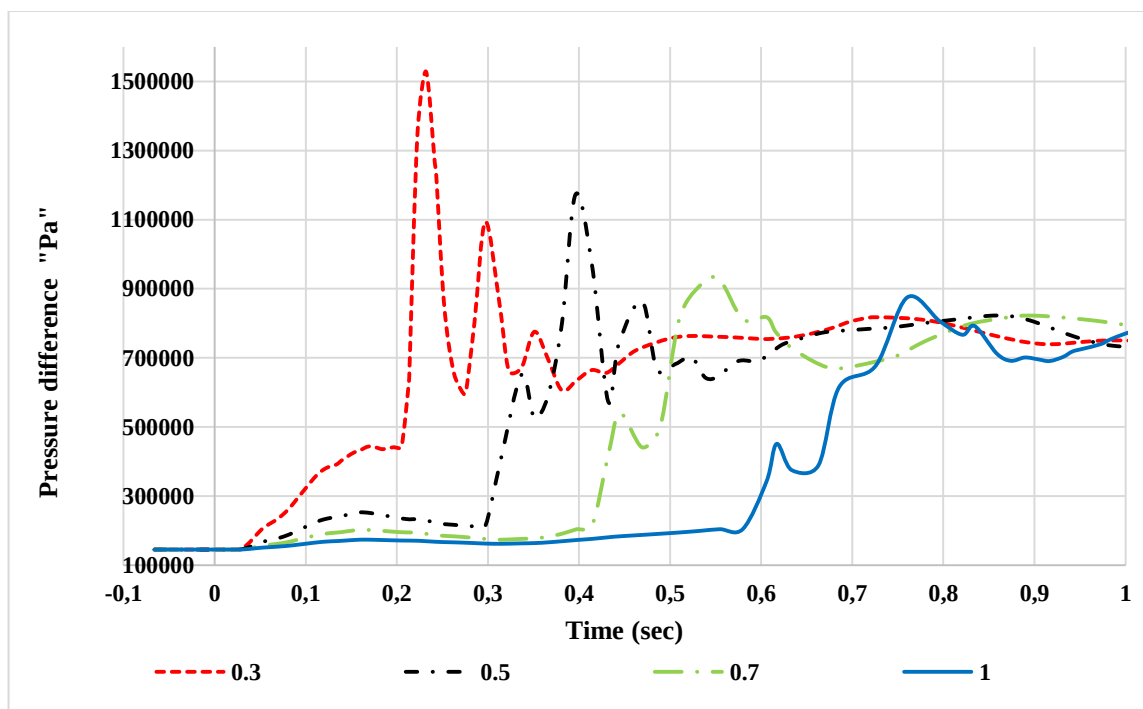


Figure 15 – Changing the pressure difference at the SG from the side of the emergency loop (second group time gaps) in the case of DELBLOCA

Conclusion

By change time gap, a different pressure behavior is presented. Also, word (Instantaneous) should be more defined during the study for nuclear reactor safety reports. Tables 1 and 2 include the maximum values for pressure for the main components (reactor, core, steam generator and MCP) which recorded and illustrate at which time gap were recorded.

Table 1 – In Pump Stop Case

Maximum value for Pressure drops in	Value (pressure different in Pa)	At time gap (in Second)
Reactor	$4.81179 \times 10^{+05}$	10^{-4}
Core	$1.64560 \times 10^{+05}$	10^{-4}
Pump	$5.63989 \times 10^{+05}$	Recorded for all time gaps
Steam Generator	$3.30584 \times 10^{+05}$	10^{-4}

Table 2 – In DEBLOCA Case

Maximum value for Pressure drops in	Value (pressure different in Pa)	At time gap (in Second)
Reactor	$3.81 \times 10^{+05}$	Recorded for all time gaps
Core	$4.11 \times 10^{+05}$	10^{-4}
Pump	$5.645 \times 10^{+05}$	Recorded for all time gaps
Steam Generator	$6.83 \times 10^{+06}$	10^{-4}

This means that, the choose of the time step in each case depends on which component will be considered.

For example, in the Pump Stop Case:

If it is important to check the effect on the Reactor, the worthiest situation will be shown if the considered time gap = 10^{-4} second, because in this time-gap, the maximum pressure drop was observed, and so-on.

The essence of the work: not the influence of the calculation step on the process, but the influence of the "instantaneity" of the accident initialization process was Investigated. The calculation step is set automatically in the calculation program, based on the stability and convergence criteria of the solution during the process simulation. The guidance documents refer to an "instantaneous" pump stop or "instantaneous" break, but do not specify the duration of this "instant".

The paper investigates the influence of uncertainty of the duration of the "instant" of the process of stopping the pump or breaking the pipeline on the intensity of the first few seconds of the accident. It is shown that the highest intensity of the process (the amplitude of pressure fluctuations) corresponds to the shortest time of the duration of the "moment".

For future work, it is recommended to do the same analysis of similar breaks in the other cold legs (other three loops), in the hot legs of 4-loops 'near the reactor', the study of such a break at the junction of the output 'cold' collector SG with cold leg for every loop.

REFERENCES

- [1] PNAE G-1-036-95 (NP-006-98). Requirements to the Content of the Report on the Justification of the Safety of as with a WWER Type Reactor (with Change No. 1 of 20.12.2005).
- [2] Dina Ali Amer, Nikonov S.P. Pressure Waves in The Primary Circuit of The WWER - 1000 Reactor at Instant Stop of the MCP, Volga-2018, International conference for young scientists, specialists, and post-graduates on Nuclear Reactor Physics, September 2018.
- [3] Dina Ali Amer, Nikonov S.P., LOCA and Pressure Waves in The First Loop of The WWER - 1000 Reactor, 28th Symposium of AER on WWER Reactor Physics and Reactor Safety, Olomouc, Czechia, October 8-12, 2018.

- [4] Dina Ali Amer, Nikonov S.P., Emergency Situations and Pressure Waves In WWER-1000, The Sixth International Conference of Radiation Sciences and Applications, Ibis Dahab, Egypt, 22-26 October, 2018.
- [5] V. A. Tereshonok, S.P. Nikonov, M. P. Lizorkin, K. Velkov, A. Pautz, K. Ivanov, International Benchmark for Coupled Codes and Uncertainty Analysis in Modelling: Switching-off of One of the Four Operating Main Circulation Pumps at Nominal Power at NPP Kalinin unit, 18th Symposium of AER on WWER Reactor Physics and Reactor Safety, Hungary, Eger, Oct. 6-10, 2008.
- [6] H. Austregesilo, H. Deitenbeck, A. Langenfeld, J. Scheuer, P. Schöffel, ATHLET 3.1A, programmer's Manual, March 2017.
- [7] Rostexnadzor, FBU «NTC YARB», Attestacionnyi Pasport Programmnogo Sredstva №350 17.04.2014, Russian.
- [8] I. Panka, Gy. Hegyi, Cs. Marácz, A. Keresztúri, Uncertainties of the Kiko3D- ATHLET Calculations Using the Kalinin-3 Benchmark (Phase II) Data, 25th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, Hungary, Balatongyörök, Oct.13-16, 2015.
- [9] S.Nikonov, A. Pautz, K.Velkov, Detailed Modeling of KALININ-3 NPP WWER-1000 Reactor Pressure Vessel by the Coupled System Code ATHLET/BIPR-VVER, International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2011), ISBN 978-85-63688-00-2, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, May 8-12, 2011.
- [10] S.P. Nikonov, P. Pham, V.I. Romanenko, G.V. Tikhomirov, Coupled Neutronics Thermohydraulic Calculation of HPLWR Fuel Cell Using Codes MCU/ATHLET, 27th Symposium of AER on WWER Reactor Physics and Reactor Safety, Munich, Germany Oct. 2017.
- [11] D Amer and S Nikonov Pressure Waves in the Primary Circuit of the WWER-1000 Reactor at Instant Stop of the MCP. 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1133 012049.
- [12] Grundmann U, Lucas D, Rohde U (1995) Coupling of the Thermohydraulic Code ATHLET with the Neutron Kinetic Core Model DYN3D. In: Proc. of Int. Conf. on Mathematics and Computations, Physics and Environmental Analysis, Portland (USA), vol. 1, pp. 257–263.

Uncertainty in Calculation Due to «Instantaneous» Emergency Situations in WWER-1000

D.A. Amer^{*1}, S.P. Nikonov^{2}**

**Alexandria University, El-Guish Road, 22, Alexandria, Egypt, 11432*

***Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

¹ORCID iD: 0000-0003-0365-2533

WoS Researcher ID: AAC-7247-2019

e-mail: Dina.amer@alexu.edu.eg

²ORCID iD: 0000-0003-4890-6920

e-mail: SPNikonov@mephi.ru

Abstract – The paper shows the occurrence of pressure waves and their propagation in the equipment of the first circuit of the WWER-1000 reactor plant in emergency situations associated with an instantaneous stop of the Main circulation pump or a two-way flow with an instantaneous two-way break in the cold thread of the main circulation pipeline. The influence of the time of initialization of the accident (pump stop, pipeline rupture) on the intensity of the process-amplitude, frequency of pressure changes is investigated. Pressure drops during an emergency on the main elements of the circuit are considered. It is shown that the maximum changes in the amplitude and frequency of both the pressure and the pressure drops on the circuit elements belong to the initial stage of the accident. The main attention is focused on the pressure drops on the equipment, because this parameter determines the dynamic loads on the equipment, which can lead to its failure.

Keyword: ATHLET, WWER-1000, Kalinin NPP, DBE, LOCA, MCP, moment, emergency situations, pressure waves, time gap.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 528.48

РЕГЛАМЕНТНЫЕ РАБОТЫ ПО НАЛАДКЕ МАШИНЫ ПЕРЕГРУЗКИ ТОПЛИВА МП-1000 НА ЭТАПЕ ПЛАНОВО- ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА

© 2020 Ю.И. Пимшин*, В.А. Наугольников*, И.Ю. Пимшин**

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

**Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Россия

В статье приведены результаты исследования, возможности повышения точности наведения машины перегрузки топлива (МП). Это реализуется путем определения фактических параметров конструктивных элементов машины. В том числе определяются геометрические характеристики, к которым относятся: горизонтальность путей машины и тележки, прямолинейность и параллельность в каждой паре путей машины и тележки, вертикальность штанги, ход моста МП, а в части уравнивания движения его правой и левой стороны (забегание сторон). Учет их, при автоматизированном наведении штанги МП на хвостовик тепловыделяющей сборки (ТВС), позволяет достичь полной автоматизации процесса и, в конечном счете, повысить оперативность кампании перегрузки топлива.

Ключевые слова: геометрические параметры; машина перегрузки топлива; контроль путей машины и тележки: прямолинейность, расположение, превышения; вертикальность штанги; забегание сторон машины.

Поступила в редакцию 02.10.2019

После доработки 21.12.2019

Принята к публикации 10.01.2020

Введение

Обязательным условием эксплуатации каждого блока любой атомной станции является выполнение планово-предупредительных ремонтов (ППР) на соответствующих этапах её работы. Основной регламентной работой, на каждом ППР, является компания по перегрузке ядерного топлива. Данная работа выполняется машиной перегрузки топлива (МП-1000), которая, в свою очередь, после вскрытия энергоблока, наладывается (рис. 1). Наладка МП заключается в проверке её технических нормативных параметров, составной частью перечня, которых являются геометрические характеристики.

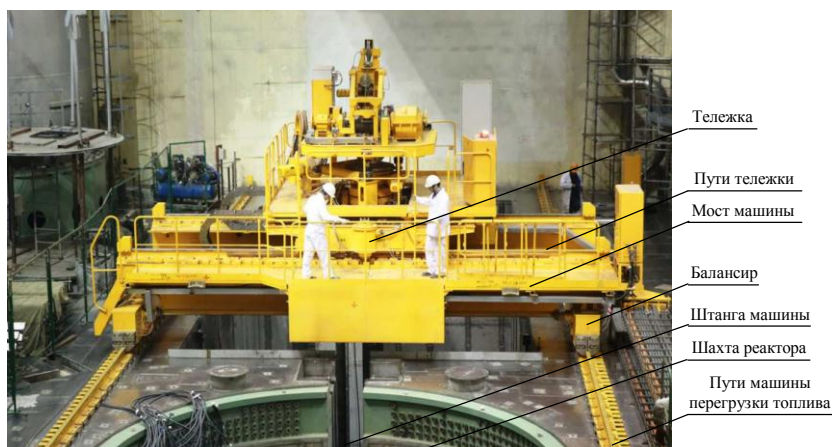


Рисунок 1 – Внешний вид машина перегрузки топлива (МП) [Refueling machine]

Основным технологическим допуском МП является точность наведения штанги на головку тепловыделяющей сборки (ТВС), соответствующей в линейной мере ± 3 мм. Для обеспечения этого параметра в автоматическом режиме работы машины необходимо, чтобы основные конструктивные элементы соответствовали требованиям, приведенным в чертежах: чертеж 8508.96.140 СБ «РП моста», чертеж 8508.96.425 СБ «РП тележки». При этом требования, предъявляемые к подкрановым путям МП, следующие:

- зазоры в стыках рельс не более 0,3 мм;
- отклонение от прямолинейности рельсового пути по боковым поверхностям не более 0,75 мм на длине 3 м;
- ступенчатость поверхности стыкуемых концов рельсов не более 0,15 мм;
- отклонение от прямолинейности рельсового пути не более 0,25 мм на длине 1 м;
- превышение в одном сечении поверхности одного рельса относительно другого не более 0,5 мм;

Технические требования, предъявляемые к подкрановым путям тележки МП следующие:

- зазоры в стыках рельс не более 0,3 мм;
- отклонение от прямолинейности рельсового пути по боковым поверхностям не более 0,75 мм на длине 3 м;
- ступенчатость поверхности стыкуемых концов рельсов не более 0,15 мм;
- поверхность правого и левого рельсов должны лежать в одной плоскости, неплоскостность должна быть не более 0,3 мм.

Методика выполнение контроля геометрических параметров МП

На каждом ППР, после остановки блока, выполняют контроль фактических геометрических параметров МП и выполняют их сравнение с допустимыми величинами этих же характеристик. Заполняют формуляры, предъявляют их надзорным структурам, и в случае соответствия всех характеристик требуемым значениям, получают разрешение на использование МП для перегрузки топлива.

В процессе контроля определяются геометрические характеристики, в том числе, выполняют нивелирование путей МП и её тележки, проводят контроль прямолинейности и параллельности в каждой паре путей машины и тележки, контроль вертикальности штанги, контроль хода моста, в части равенства перемещений его правой и левой стороны (забегание сторон).

Для выполнения данных работ на предварительном этапе при помощи стальной рулетки разбивают и маркируют точки с интервалом 1 метр (рис. 2).

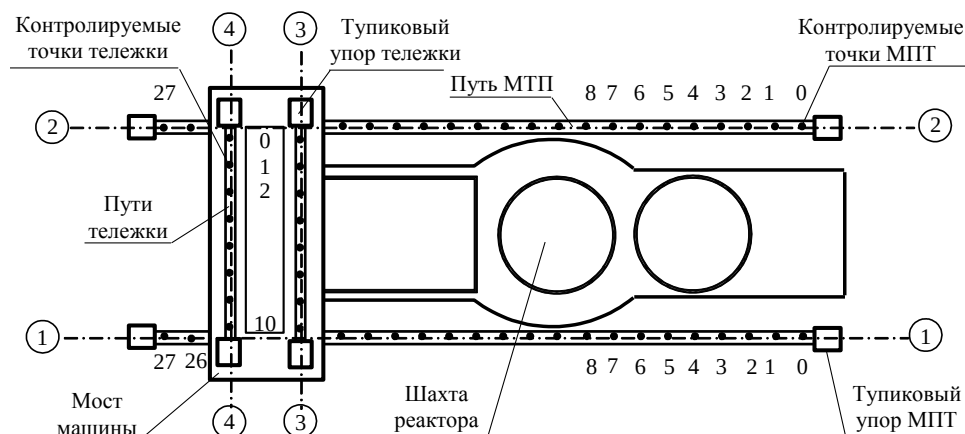


Рисунок 2 – Схема расположения контролируемых точек на путях МП и её тележки [The location of controlled points on the refueling machine tracks and its bogie]

Для обеспечения достоверного определения геометрических параметров МП, с учетом вышеперечисленных технических требований к ней, точность геодезических измерений m_i определялась в соответствии с известной формулой

$$m_i = C \cdot \delta_{mex}, \quad (1)$$

где C – коэффициент обеспечения точности;

δ_{mex} – технологическое отклонение.

В нашем случае, коэффициент обеспечения точности C примем равным 0,2. Тогда, контроль прямолинейности должен выполняться с точностью 0,05 мм ($\delta_{mex} = 0.25$ мм), контроль расположения с точностью 0.04 мм ($\delta_{mex} = 0.2$ мм), а нивелирование головок рельсов подкрановых путей должно выполняться с ошибкой, не превосходящей 0,10 мм ($\delta_{mex} = 0.5$ мм).

В соответствии с данными требованиями к точности, в качестве средства измерений рекомендуется лазерный трекер *Vintag* фирмы *Faro* [1-7]. Данное средство измерений широко используется для решения аналогичных измерительных задач [4-9]. Вопросы модернизации, повышения эффективности и безопасности, в том числе и для АЭС с реакторами РБМК затронуты в работах [10-13].

Способ измерений, реализуемый трекером – пространственная тахеометрия. Как известно, данный способ в общем виде заключается в том, что прибором измеряют горизонтальные β_i , вертикальные ν_i углы и наклонное расстояние S_i от инструмента до исследуемой точки, в системе системы координат машины или в системе координат выверяемого объекта. Имея полярные координаты исследуемых точек, программным комплексом измерительной машины, по ниже приведенным формулам (2, 3, 4) производится вычисление прямоугольных декартовых координат тех же точек в принятой системе координат:

$$x_i = x_0 + \Delta x_i = x_0 + S_i \cdot \cos \nu_i \cdot \cos \beta_i, \quad (2)$$

$$y_i = y_0 + \Delta y_i = y_0 + S_i \cdot \cos \nu_i \cdot \sin \beta_i, \quad (3)$$

$$h_i = z_0 + \Delta z_i = z_0 + S_i \cdot \sin \nu_i, \quad (4)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты определяемой (контролируемой) точки;

x_0, y_0, z_0 – начальные координаты *Vintag*;

$\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ – приращения координат до текущей точки i ;

ν_i, β_i – вертикальный и горизонтальный углы;

S_i – наклонное расстояние.

Методика выполнения измерений

Лазерный трекер последовательно устанавливают на двух станциях стояния. При этом одна станция расположена со стороны рельса 1-1 (А), вторая со стороны рельса 2-2 (В). Для ориентирования прибора в системе координат выверяемого объекта используют три точки, выполненные в виде марок, схема которых приведена на рисунке 3, приклеенных на верхней поверхности направляющих и совмещенных с их боковыми вертикальными образующими.

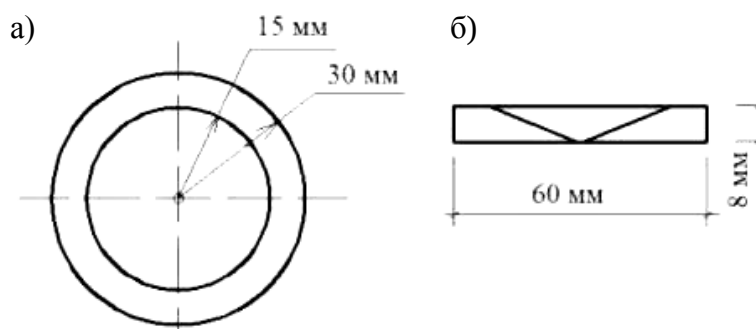


Рисунок 3 – Схема конструкции марок: а – вид сверху; б – вид сбоку [Stamp design diagram: a is top view; b is side view]

При этом две марки (т. 27-Л), (т. 0-Л) наклеены вдоль одного рельса, например, 1-1, а третья (т. 27-П), на противоположной стороне МП, например, на рельсе 2-2, примерно напротив (т. 27-Л). Установив измерительную машину на первой станции со стороны (А), примерно на расстоянии 4-10 метра от рельса 1-1, выполняют ее прогрев, и далее, в системе координат машины, без ее начального ориентирования, выполняют измерение координат марок (1), (2), (3). По полученным координатам, решая обратные геодезические задачи, определяют расстояния между точками $S_{(1-2)}$, $S_{(1-3)}$, $S_{(2-3)}$. По вычисленным параметрам, определяют и задают координаты выверяемого объекта, для этого принимают:

$$X_1=0, Y_1=0; \quad (5)$$

$$X_2=0, Y_2= S_{(1-2)}; \quad (6)$$

$$X_3= (S_{(1-3)}^2 + S_{(1-2)}^2 - S_{(2-3)}^2)/(2 \cdot S_{(1-2)}), Y_3= S_{(1-3)}^2 - X_3^2. \quad (7)$$

При принятых координатах марок ось Y-Y будет параллельна оси рельса 1-1, при этом величины координат будут возрастать от точки 27 к точке 0, а ось X-X будет ей перпендикулярна, возрастание координат по этой оси совпадет с направлением от рельса 1-1 к рельсу 2-2.

Затем выполняет ориентирование измерительной машины в системе этих трех точек. Далее формируют файл (сеанс) новых измерений и выполняют все измерительные процедуры со стороны (А) МП. Обеспечив полный объем измерений со стороны (А), выполняют переустановку измерительной машины на вторую станцию со стороны (В). Здесь после приведения трекера в рабочее положение выполняют ориентирование в системе координат тех же трех (1), (2), (3) точек. Далее реализуют измерительные процедуры со стороны (В). В результате получают измеренные координаты всех контролируемых точек путей машины и тележки (см. рис. 2). В результате обработки измеренных координат определяют искомые параметры МП. При этом, например, определяют параметры прямолинейности рельсового пути машины, реализуя нижеследующую процедуру. Вначале определяют уравнение прямой проходящей через две заданные точки, это точки 27 и 0 на рельсе 1-1. Затем данное уравнение преобразуют к каноническому виду. После чего вычисляют параметры прямолинейности, используя выражения:

$$\Delta_{np.i} = [(-1) \cdot Y_i + C \cdot X_i + D] / [\sqrt{(1 + C^2)}], \quad (8)$$

где $\Delta_{np.i}$ – параметр прямолинейности 1-1 рельса на i точке;

Y_i, X_i – координаты текущей точки i расположенной на рельсе 1-1;

C, D – коэффициенты уравнения прямой.

$$\Delta_{np,j} = [(-1) \cdot Y_j + C \cdot X_j + D] / [\sqrt{(1 + C^2)}] - B, \quad (9)$$

где $\Delta_{np,j}$ – параметр прямолинейности 2-2 рельса на j точке;

Y_j, X_j – координаты текущей точки j расположенной на рельсе 2-2;

B – проектный параметр расстояния между осями рельс 1-1 и 2-2.

Затем определяют превышение h_{ij} , в поперечном сечении сторон моста, одной над другой:

$$h_{ij} = H_i - H_j, \quad (10)$$

где H_i, H_j – отметки точек рельсового пути МП, расположенные в одном поперечном сечении соответственно на левом (1-1) и правом (2-2) рельсе.

Затем определяют уклон I_{ij} в заданном сечении ij :

$$I_{ij} = \frac{h_{ij}}{B_{i-j}}, \quad (11)$$

где B_{i-j} – расстояние между точками $i-j$.

Имея в виду, что $I_{ij} = I_w$, (рис. 4), получим:

$$\chi_i = l_w \cdot I_{i-j}, \quad (12)$$

где l_w – длина секций штанги;

I_w – относительный крен штанги;

χ_i – смещение нижней осевой точки штанги от отвесной линии.

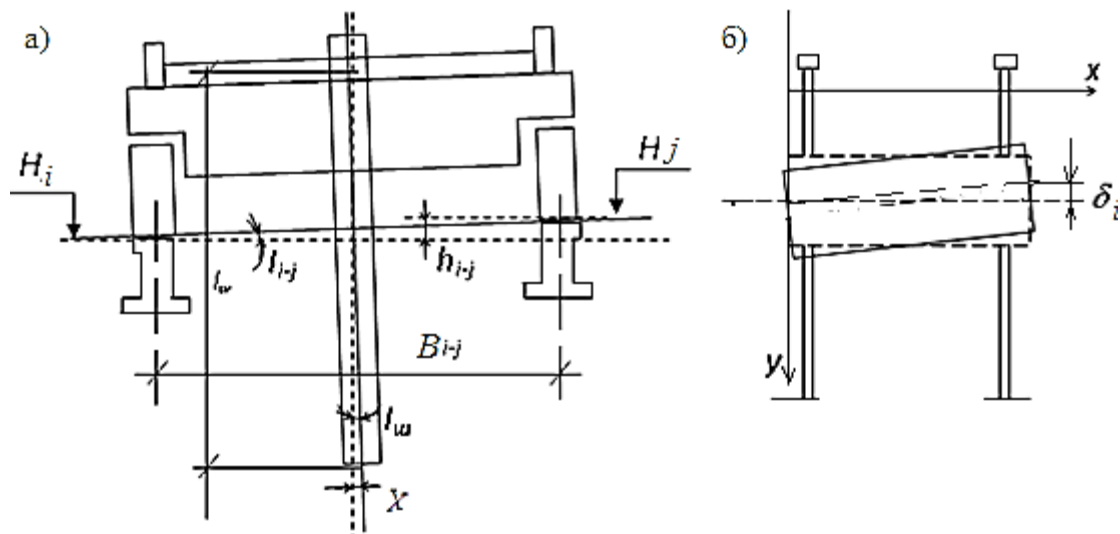


Рисунок 4 – Схема деформационных геометрических параметров машины перегрузки топлива (а – уклон моста и крен штанги; б – прекос моста) [Scheme of refueling machine deformation geometric parameters (a is slope of the bridge and roll of the bar; b is bridge imbalance)]

По плановым координатам x_i, y_i определяют параметры прямолинейности $\Delta_{np,i}$, $\Delta_{np,j}$ рельсового пути МП и тележки. Кроме этого определяют принадлежность верхней поверхности головки рельсов пути машины одной горизонтальной плоскости и превышение h_{ij} , в поперечном сечении между рельсами 1-1 и 2-2; 3-3 и 4-4. Исследуют равномерность хода моста крана (см. рис. 4б), определяют δ_i неравномерные составляющие (параметры опережения одной стороны моста машины относительно другой).

Заключение

В итоге контроля определяют совокупность деформационных параметров:

$$F = f(\chi_i, \Delta_i, h_{ij}, \delta_i, \dots), \quad (13)$$

на величины, которых, при позиционировании МП, управляющей программой корректируют, путем перемещения положение штанги, её расположение. Таким образом, обеспечивают повышение точности наведения до величин, характеризующихся ошибками измерений в диапазоне точности не более ± 0.5 мм. Кроме того, повышается производительность машины перегрузки и сокращается время на кампанию перегрузки топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пимшин, Ю. И. Контроль геометрических параметров путей машины перегрузки топлива МП-1000 / Ю. И. Пимшин [и др.] // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Технические науки. – 2008. – Спец. выпуск. – С.141-143.
2. Пимшин, Ю. И. Контроль прямолинейности и горизонтальности подкрановых путей / Ю. И. Пимшин, А. Р. Губеладзе, И. Ю. Пимшин // Прикладная геодезия. – Сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2002. – Депонировано в ВИНТИ 05.12.02. 2100-B2002.
3. Губеладзе, А. Р. Повышение точности наведения машины перегрузки топлива МП-1000 / А. Р. Губеладзе, Г. А. Наumenko, Л. Ф. Кирильчик // Научное обозрение. – Москва : Издательский дом «Наука образования». – № 12. – 2013. – С. 56-58.
4. Пимшин, Ю. И. Калибровка станков с числовым программным управлением с помощью лазерного трекера VINTAG / Ю. И. Пимшин [и др.] // Инженерный вестник Дона. – № 3. – 2016. – URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3667.
5. Пимшин, Ю. И. Применение лазерного трекера для определения деформационных характеристик защитных оболочек / Ю. И. Пимшин [и др.] // Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XI Международной научно-практической конференции 27-29 мая 2015 г. – ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск : [Б.н.], 2015. – 1 электрон. опт. диск [CD]. – ISBN 978-7262-2114-4
6. Полянский, А. В. Разработка методики геодезического обеспечения строительства и эксплуатации ускорительно-накопительного комплекса на основе гармонического анализа : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. В. Полянский. – Новосибирск, 2015. – 24 с.
7. Буренков, Д. Б., Разработка методики геодезического контроля изготовления и установки элементов ускорительно-накопительных комплексов с использованием API Laser Tracker 3 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Д. Б. Буренков. – Новосибирск, 2016. – 24 с.
8. Gurov, S. et al. Status of NSLS-II booster. PAC'11. New-York, 2011. WEP201. 437 p. URL : <http://www.JACoW.org>.
9. Bokov, M., Burenkov, D., Polyanskiy, A., Pupkov, Yu., Levashov, Yu. Results of Long-term Observations of Deformations of the VEPP-4 Storage Ring Constructions, BINP. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004. 1 electron optdisc (CD-room).
10. РЭ АТЭ.118.0003-2001. Модернизация перегрузочных машин для энергоблоков АЭС с ВВЭР / Концепция модернизации перегрузочных машин. – Москва : Концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ», 2001. – 22 с.
11. Коробкин, В. В. Методы и средства повышения эффективности и безопасности функционирования мехатронного комплекса перегрузки ядерного топлива атомного реактора ВВЭР-1000 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. В. Коробкин. – Таганрог, 2007. – 18 с.
12. Твердовский, О. В. Разработка автоматизированной системы геодезического обеспечения наведения разгрузочно-загрузочной машины при перегрузке топлива в реакторах РБМК : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск, 2000, 23 с.
13. АМЕ. 114.00.00.000 РР2. Машина перегрузочная. Анализ функциональной безопасности. – Волгодонск : ОАО «Атоммашэкспорт», 2006.

REFERENCES

- [1] Pimshin Yu.I. [et al.] Kontrol' geometricheskix parametrov putej mashiny` peregruzki topliva MP-1000 [Control of Geometric Parameters of the MP-1000 Fuel Overload Machine Paths]. Izvestiya vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhnicheskie nauki [University News. North Caucasus Region. Technical Science]. 2008. Specz. vy`pusk [Spets. Issue]. P. 141-143 (in Russian).
- [2] Pimshin Yu.I., Gubeladze A.R., Pimshin I.Yu. Kontrol' pryamolinejnosti i gorizonta`nosti podkranovy`x putej [Control of Straightness and Horizontal Crane Tracks]. Prikladnaya geodeziya. Sbornik nauchny`x trudov. Rostov-na-Donu: RGSU. 2002. Deponirovano v VINITI [Engineering Geodesy. Collection of Scientific Works. Rostov-on-Don: RSBU, 2002. Deposited in VINITI] 05.12.02. 2100-V2002 (in Russian).
- [3] Gubeladze A.R., Naumenko G.A., Kiril`chik L.F. Povy`shenie tochnosti navedeniya mashiny` peregruzki topliva MP-1000 [Improving the Accuracy of Guidance of the MP-1000 Fuel Overload Machine]. Nauchnoe obozrenie. Moskva: Izdatel'skij dom «Nauka obrazovaniya» [Scientific Review. Moscow: Publishing House «Science of Education»]. № 12. 2013. P. 56-58 (in Russian).
- [4] Pimshin Yu.I. [et al.] Kalibrovka stankov s chislovy`m programmny`m upravleniem s pomoshh`yu lazernogo trekera VINTAG [Calibration of Machine Tools with Numerical Control Using Laser Tracker VINTAG]. Inzhenerny`j vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. № 3. 2016. URL : ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3667 (in Russian).
- [5] Primenenie lazernogo trekera dlya opredeleniya deformacionny`x xarakteristik zashhitny`x obolochek [Application of Laser Tracker for Determination of Deformation Characteristics of Protective Shells]. Bezopasnost` yadernoj e`nergetiki: tezisy` dokladov XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 27-29 maya 2015 g. VITI NIYaU MIFI [i dr.]. Volgodonsk: [B.n.], 2015. 1e`lektron. opt. disk [SD]. [Safety of Nuclear Power: abstracts of XI International Scientific-Practical Conference May 27-29, 2015. VETI NRNU MEPhI [et al.]. Volgodonsk: [B.N.], 2015. 1 electron disc [CD]. ISBN 978-7262-2114-4 (in Russian).
- [6] Polyansky A.V. Razrabotka metodiki geodezicheskogo obespecheniya stroitel'stva i e`kspluatatsii uskoritel'no-nakopitel'nogo kompleksa na osnove garmonicheskogo analiza : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk [Development of Methods of Geodetic Support of Construction and Operation of the Accelerator-Storage Complex on the Basis of Harmonic Analysis: Thesis Abstract of the PhD in Engineering]. Novosibirsk. 2015. 24 p. (in Russian).
- [7] Burenkov D.B. Razrabotka metodiki geodezicheskogo kontrolya izgotovleniya i ustanovki e`lementov uskoritel'no-nakopitel'ny`x kompleksov s ispol'zovaniem API Laser Tracker 3 : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk [Development of Methods of Geodetic Control of Manufacturing and Installation of Elements of Accelerator-Storage Complexes Using API Laser Tracker 3: Thesis Abstract of the PhD in Engineering]. Novosibirsk. 2016. 24 p. (in Russian).
- [8] Gurov S. [et al.] Status of NSLS-II booster. PAC'11. New-York, 2011. WEP201. 437 p. URL : <http://www.JACoW.org>.
- [9] Bokov M., Burenkov D., Polyanskiy A., Pupkov Yu., Levashov Yu. Results of Long-term Observations of Deformations of the VEPP-4 Storage Ring Constructions, BINP. 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering Nottingham, United Kingdom, 28 June – 1 July 2004. 1 electron optdisc (CD-room).
- [10] RE`ATE.118.0003-2001. Modernizaciya peregruzochny`x mashin dlya e`nergoblokov AE`S s VVE`R / Konceptiya modernizatsii peregruzochny`x mashin. Moskva: Koncern «ROSE`NERGOATOM» [RE ATE.118.0003-2001. Modernization of Reloading Machines for NPP Power Units with WVER / Concept of Reloading Machines Modernization. Moscow: «ROSENERGOATOM» Concern]. 2001. 22 p. (in Russian).
- [11] Korobkin V.V. Metody` i sredstva povы`sheniya e`ffektivnosti i bezopasnosti funkcionirovaniya mexatronnogo kompleksa peregruzki yadernogo topliva atomnogo reaktora VVE`R-1000 : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk [Methods and Means of Increasing the Efficiency and Safety of the Operation of the Mechatronic Complex of Nuclear Fuel Overload of the WVER-1000 Nuclear Reactor: Thesis Abstract of the PhD in Engineering]. Taganrog. 2007. 18 p. (in Russian).
- [12] Tverdovskiy O.V. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy` geodezicheskogo obespecheniya navedeniya razgruzochno-zagruzochnoj mashiny` pri peregruzke topliva v reaktorax RBMK : avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk [Development of the Automated System of Geodetic Support of Guidance of the Unloading and Loading Machine at Fuel Overload in RBMK Reactors: Thesis Abstract of the PhD in Engineering]. Novosibirsk. 2000. 23 p. (in Russian).

- [13] AME. 114.00.00.000 PP2. Mashina peregruzochnaya. Analiz funktsional'noj bezopasnosti. Volgodonsk: OAO «Atommashe'ksport» [Reloading Machine. Functional Safety Analysis. Volgodonsk: «Atommasheksport» JSC]. 2006 (in Russian).

Regulatory Works of MP-1000 Fuel Overloading Machine Adjustment at the Preventive Maintenance Stage

Yu.I. Pimshin ^{*1}, V.A. Naugolnov ^{*2}, I.Yu. Pimshin ^{3}**

^{}Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 34736*

*^{**}Don State Technical University, Gagarin square 1, Rostov-on-Don, Russia, 344000*

¹ORCID iD: 0000-0001-6610-8725

WoS Researcher ID: J-6791-2017

e-mail: yipimshin@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0002-1631-3365

e-mail: naugolnov53@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0002-8267-3617

WoS Researcher ID: O-8809-2018

e-mail: ivan.pimschin@yandex.ru

Abstract – The article presents the study results of the possibility to increase the accuracy of pointing the of the fuel refueling machine by determining the actual parameters of the structural elements including determining geometric characteristics which include leveling the paths of the manipulator and its bogie, control of straightness and parallelism in each pair of paths of the machine and bogie, control of rod verticality, control of the course of the fuel reloading machine bridge in terms of the equality of movement of its right and left sides. Taking them into account with automated guidance of the fuel refueling machine rod to the fuel assembly shank, it allows to achieve complete automation of the process and increase the efficiency of the fuel reloading company ultimately.

Keywords: geometric parameters; fuel refueling machine; control of paths of the machine and bogie, straightness control, location, excess, rod verticality, running over of the machine sides.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 004.94

**КОНЦЕПЦИЯ МОНИТОРИНГА ОБОРУДОВАНИЯ АЭС НА
ОСНОВЕ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ И
ОБУЧЕННОЙ НЕЙРОСЕТИ**

© 2020 В.В. Кривин, В.Я. Шпицер, В.Г. Бекетов, И.О. Ишигов, В.А. Толстов

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

В данной статье рассматривается концепция мониторинга, основанная на непараметрической статистике. Областью возможного применения предполагается мониторинг технологических систем АЭС. Современные сложные производства и техногенные среды оснащаются промышленными системами мониторинга. Естественной формой эволюции таких систем является генерация альтернативных концептов, конструктивов и селекция экземпляров по эффективности в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: мониторинг, прогнозирование, безопасность АЭС, главный циркуляционный насос, цифровая обработка сигналов, искусственная нейронная сеть, непараметрическая статистика, фильтр Калмана-Бьюси, обработка в реальном времени, нормативные пределы.

Поступила в редакцию 31.01.2020

После доработки 05.02.2020

Принята к публикации 14.02.2020

Технологические системы (ТС) АЭС проектируются и обслуживаются исходя из принципа функциональной целостности [1]. Это означает, что множество параметров, измеряемых для отдельной технологической схемы, обладают определённой топологической общностью, т.е. отражают связи в некоторой семантической сети. Традиционно образ ТС это точка в параметрическом пространстве, траектория которой представляет её динамические свойства. В нормальных условиях эксплуатации доминирующими динамиками являются переходные процессы, управляющие воздействия и дефекты элементов оборудования. Измерения с периодом около 10 с., реализуемые штатной системой мониторинга АЭС устанавливает предельное значение динамической ошибки распознавания состояний и задаёт общий масштаб времени.

Определим первую процедуру мониторинга как предобработку [2] на примере одного временного ряда. Спецификация операций в процедуре может быть следующей:

- загрузка в буфер фрагмента временного ряда, например, 100 чисел (формирование пакета); первый пакет формируется примерно 17 мин., далее он обновляется в скользящем режиме;
- исключение локальных выбросов относительно центра тяжести пакета;
- низкочастотное сглаживание фильтром Калмана-Бьюси;
- оценка положения центра тяжести пакета относительно нормативных границ;
- оценка предсказуемости с использованием автокорреляционной функции.

Определим вторую процедуру мониторинга. Она содержит статистический анализатор сглаженных копий, анализатор выбросов и шумов, прогнозный экстраполятор. Процедура предназначена для формирования динамического вероятностного пространства; вычисления предсказанных моментов превышения пределов и оценки деградации [3]. Ниже приведены основные формализмы.

Одиночные, редкие (например, < 5 из 100), локальные выбросы (значительное превышение нормативных пределов) выделяются в отдельный пакет для специального анализа нормативным уровнем значимости или по принципу:

$$T_n = \frac{|x_{(n)} - \bar{x}|}{s}, \quad (1)$$

где T_n – критическое значение; $x_{(n)}$ – последние числа вариационного ряда;

$\bar{x}$ – арифметическое среднее;

s – среднеквадратическое отклонение.

Фильтр Калмана-Бьюси [4] используется для получения сглаженной копии временного ряда и отделения стохастической (высокочастотной) составляющей в отдельный пакет для специального анализа. Степень сглаживания является параметром алгоритма и подстраивается под объект мониторинга. Для одномерного временного ряда $Z = \{z_k\}$ скалярная версия фильтра имеет параметры:

$x_0 = z_0$ – первое число пакета, принимается за первое число сглаженной копии сигнала;

R – дисперсия пакета;

Q – дисперсия гипотетического нормального белого шума, являющегося естественным фоном (используется как параметр алгоритма);

P_0 – начальное значение дисперсии суммарного аддитивного шума:

$$P_0 = \frac{Q \cdot R}{Q + R}. \quad (2)$$

Алгоритм фильтрации построен на рекуррентном пересчёте дисперсии аддитивного шума и коэффициента усиления для всех измеряемых значений временного ряда по формулам:

$P_{k+1} = P_k + Q$, $k = 0, \dots, 99$ – возобновляемое значение дисперсии шума;

$K_{k+1} = \frac{P_{k+1}}{P_{k+1} + R}$ – возобновляемое значение коэффициента усиления фильтра;

$x_{k+1} = x_k + K_{k+1}(z_{k+1} - x_k)$ – сглаженные значения;

z_{k+1} – измеренные значения;

$X = \{x_k\}$ – сглаженная копия сигнала (она сохраняет свойства случайной функции).

Сглаженная копия сигнала становится основным объектом мониторинга, а «шумовая компонента» $\xi = (Z - X)$ направляется в нейросетевой классификатор.

Обоснуем постановку задачи классификации «шумовой компоненты». Исходный временной ряд $Z = \{z_k\}$ разделён на пакеты, на аналогичные пакеты разделим сглаженную копию $X(k)$. Каждый пакет данных обоих сигналов содержит L последовательных значений, равных размеру скользящего окна. Следовательно, сигнал шумовой ξ компоненты тоже можно разделить (или сразу вычислить) на пакеты. Получаем некоторое количество M векторов длины L , которые собираем в матрицу входных значений нейронной сети. Характеристики $\{R, Q, P_0\}$, описание которых приводилось выше, у каждого из пакетов индивидуальны и представляет собой функции неизвестного класса. Объявив их выходными сигналами искусственной нейронной сети, можем составить матрицу выходных сигналов [5].

Помимо указанных наблюдаемых характеристик, строки этой матрицы необходимо дополнить информацией, полученной на основе мониторинга деградации,

который будет подробно описан ниже. На основе мониторинга возможна оценка вероятности наступления события «выход контролируемой величины из допустимых пределов с указанной вероятностью», обозначим как $P(A)$. С точки зрения системы безопасности важен именно этот показатель, следовательно, нейронную сеть необходимо обучить оценивать и его. Реальный опыт мониторинга на любой АЭС позволит разделить строки матрицы $\{R, Q, P_0, P(A)\}$ на классы по степени индикации опасности данных текущего содержимого скользящего окна. Задача классификации в нейросетевом анализе решается сетями типа «многослойный персептрон». В этом случае количество входов сети будет равным L , количество выходов – количеству классов, а количество скрытых слоёв и нейронов в каждом из них определено экспериментально. Можно сказать, что срабатывание в выходном слое нейрона, настроенного на этапе обучения определять наиболее «опасные» пакеты, в случае адекватной модели должно с высокой степенью надёжности указывать на нарастание деградации в контролируемой системе и принятие решение об остановке и ремонте.

Для компоненты X можно указать два предела несоответствия на плоскости, образуемой индикаторами $T = (t_1, t_2)$:

$$t_1 = \left| \frac{a_n + b_n - 2\bar{X}}{b_n - a_n} \right| \leq 1, \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{2U(p) \frac{S_x}{\sqrt{n}}}{b_n - a_n} \leq 1, \quad (4)$$

где $X \in (a_n, b_n)$ – нормативный интервал значений;

$\bar{X}$ – среднее по пакету;

S_x – среднеквадратическое по пакету;

$U(p)$ – число, заданное равенством $\Phi(U(p)) = (1+p)/2$, где $\Phi(U(p))$ – функция стандартного нормального распределения с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1. Например: $p = 0,95$, $U(p) = 1,96$.

Индикаторы образуют единичный квадрат допустимых значений, в котором выход из точки $(0,0)$ на границы фиксируется вплоть до прекращения измерений.

Существенным показателем является предсказуемость сглаженной копии. Её рассчитывают по автокорреляционной функции [6]:

$$S1 = \sum_{k=0}^{99} (x_k - \bar{X})(x_{k+\tau} - \bar{X}) ; \quad (5)$$

$$S2 = \sqrt{\sum_{k=0}^{99} [(x_k - \bar{X})^2 \cdot \sum_{k=0}^{99} (x_{k-\tau} - \bar{X})^2]} . \quad (6)$$

Задавшись значением доверительной вероятности прогноза $p = S1/S2$, например, $p = 0,7$ получаем возможную перспективу прогноза на τ точек вперёд. Величина τ характеризует степень детерминированности X . Резкое уменьшение этого индикатора свидетельствует о потере предсказуемости, хаотизации режима эксплуатации объекта.

Первая процедура предложенной концепции мониторинга сигналов даёт достаточно оснований для принятия решения относительно состояния оборудования. Тем, не менее, мы сочли необходимым присоединить к ней вторую процедуру – статистический анализатор.

Классическая задача непараметрической статистики – оценка неизвестной функции распределения и плотности распределения по наблюдениям за процессом

[7, 8]. Для построения эмпирической (выборочной) функции распределения контролируемой величины x вычисляется доля всех наблюдений $x_1, x_2, \dots, x_n$, которые оказались меньше, чем x . Эта доля (частота) $F_n(x)$ по теореме Бернули сходится по вероятности при каждом x к $F(x)$. Порядок различия между $F_n(x)$ и $F(x)$ устанавливает теорема Муавра – Лапласа $|F(x) - F_n(x)| < \frac{1}{\sqrt{n}}$. Для вероятности любой случайной

величины X справедливо $P(a \leq X < b) = F(b) - F(a)$. Это даёт возможность по выборке $x_1, x_2, \dots, x_n$ оценивать дефектность контролируемой величины значением $d_n = 1 - F_n(b_n) + F_n(a_n)$, а деградацию функцией $0 < d_n(t) \leq 1$. Для систем без восстановления $d_n(t)$ – (вероятность выхода за нормативные границы) логистическая кривая.

Мониторинг деградации $d_n(t)$ состоит в подсчёте вероятности независимой случайной величине X_i иметь значение вне нормативного интервала в скользящем окне с фиксированным числом n событий. Величина $[nd_n(t)] \equiv Y \in [0, n]$ имеет биномиальное распределение. Случайная величина Y принимает любое из возможных значений $y_1, y_2, \dots, y_m$ с вероятностью q :

$$P(Y = y|q, m) = \binom{m}{y} q^y (1-q)^{m-y}, \quad y = 0, 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

$$\binom{m}{y} = \frac{m!}{y!(m-y)!} = C_m^y, \quad q = d_n(t); \quad (8)$$

$$M(y) = nd_n(t), \quad D(y) = nd_n(t)(1 - d_n(t)). \quad (9)$$

Биномиальное распределение при $m \rightarrow \infty$ является асимптотически нормальным с центром $M(y)$ и дисперсией $D(y)$.

Назовём состояния вне нормативного интервала дефектными, а число Y – числом дефектных состояний в случайной выборке объёма n из генеральной совокупности объёма N . Если $n < N$, то Y имеет гипергеометрическое распределение:

$$P(Y = y|N, D, n) = \frac{\binom{n}{y} \binom{N-n}{D-y}}{\binom{N}{D}}, \quad (10)$$

где D – число дефектных состояний в генеральной совокупности.

При этом y принимает значения от $\max\{0, n - (N - D)\}$ до $\min\{n, D\}$, при прочих y вероятность P равна нулю. В статистических методах управления качеством продукции объёмы генеральной совокупности (партии) N и выборки n считаются известными. Определению подлежит число дефектных изделий D в партии. Вводится также характеристика распределения D/N – уровень дефектности. Для гипергеометрического распределения:

$$M(y) = n D/N, \quad D(y) = n D/N \left(1 - \frac{D}{N}\right) \left(1 - \frac{n-1}{N-1}\right).$$

Если $N > 10n$, и обозначить $q = D/N$, то выражения для математического ожидания и дисперсии гипергеометрического распределения перейдут в соответствующие выражения для биномиального распределения.

Модели деградации можно построить на эволюции выборочной эмпирической интегральной функции распределения ВИФР $F_n(x)$.

$$F_n(x) = \frac{1}{N} \sum_{1 \leq i \leq n} I(x, x_i); \quad (11)$$

$$I(x, x_i) = \begin{cases} 0, & x \leq x_i; \\ 1, & x > x_i. \end{cases} \quad (12)$$

С помощью, которой вычисляются вероятности принадлежности значения x нормативному множеству или превышения нормативных пределов в сформированном пакете. Формально эта же процедура применима к шумовой составляющей.

Деградацию по шуму принято связывать с процессами старения и износа, природа которых в необратимых, прогрессирующих физико-механических и химических изменениях материалов [9]. Напротив внезапные отказы объясняют скачком свойств или мгновенным разрушением структуры. Обе модели сопрягаются, если рассматривать вырождение логистической кривой $d_n(t)$ в экспоненту.

Вторая процедура мониторинга оснащается экстраполятором и нейросетью. Известны экстраполяторы, построенные на различных принципах. В данном случае используется линейный экстраполятор, позволяющий методом наименьших квадратов получать значение прогнозируемых моментов пересечения нормативных границ. Экстраполятор определён для кривых X и $d_{99}(t)$, что значительно увеличивает достоверность прогноза [10, 11, 12].

Предполагается, что нейросеть будет, обучается на архивных копиях временных рядов измерений АЭС. Для сглаженных копий она работает по распознаванию текущих кривых X относительно типизированной кривой $\tilde{X}$. Для «шумовой компоненты» текущий портрет шума ξ сравнивается с типизированным, эталонным образцом, $\tilde{\xi}$ для заданной мощности $W = \sqrt{\xi^2(t)}$.

В качестве иллюстрации приведенных рассуждений предлагаем результат мониторинга двух сигналов разной степени зашумлённости. Ниже показаны результаты обработки сигналов, измеренные в контрольных точках технологического контура главного циркуляционного насоса (ГЦН) реактора ВВР-1000. На рисунке 1 приведена архивная копия одного из измеренных сигналов. На его восходящем участке осуществлена линейная и квадратичная экстраполяция по 100-м первым точкам. Получены предсказания моментов превышения сигналом верхнего предела. Здесь же демонстрируется сглаженная копия исходного сигнала. Верхний нормативный предел установлен по регламенту АЭС. По осям – температура масла в °С и номер измерения во временном ряду.

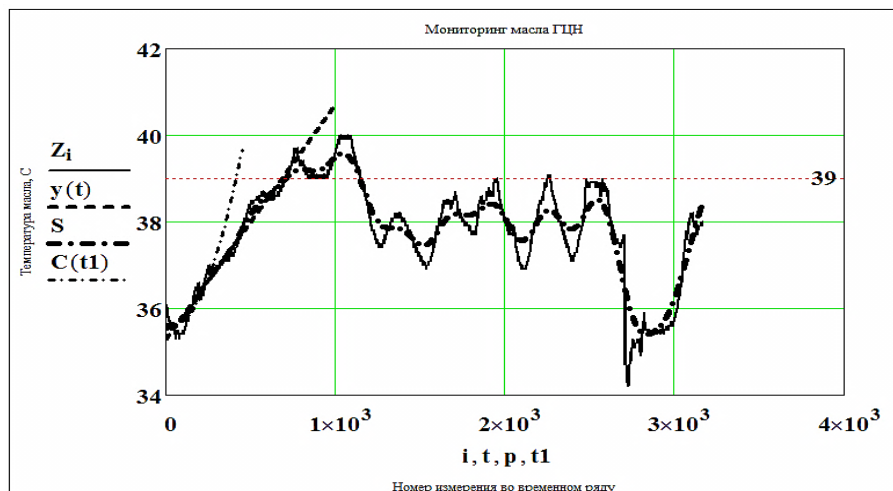


Рисунок 1 – Мониторинг температуры масла ГЦН [The oil monitoring of the main circulation pump]

На рисунке 2 представлена временная зависимость вероятности превышения предела для этого сигнала. Оценка эмпирической вероятности проводилась по 100 точкам в скользящем окне. Область превышения предела уверенно локализуется. По осям – вероятность превышения предела и номера пакетов данных.



Рисунок 2 – Эволюция вероятности превышения предела [The evolution of the probability of exceeding the limit]

На рисунке 3 предлагается сигнал – расход технической воды, охлаждающей масло ГЦН. Нормативные пределы установлены из опыта эксплуатации. На график исходного сигнала нанесена сглаженная копия. По осям графика – расход технической воды в м³/час, номера измерений во временном ряду.

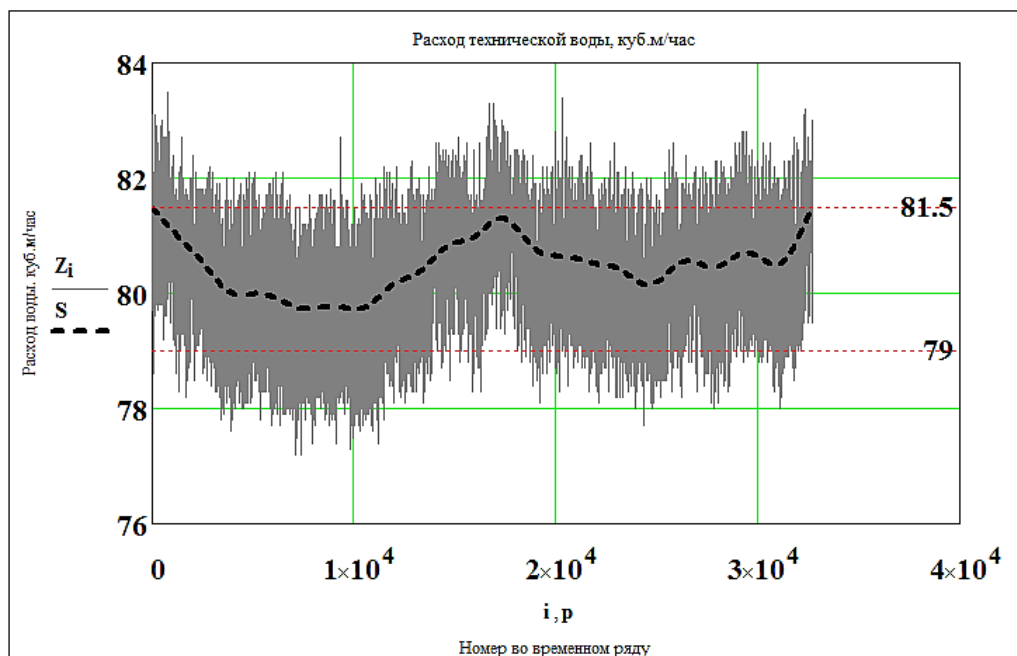


Рисунок 3 – Результаты мониторинга расхода технической воды [The monitoring results for technical water consumption]

На рисунке 4 представлена временная зависимость вероятности выхода за нормативные пределы для этого сигнала. По осям – вероятность превышения пределов и номера пакетов данных. Очевидно, что изменяя значения нормативных пределов можно влиять на результат эмпирической оценки вероятности их превышения.



Рисунок 4 – Эволюция вероятности выхода за нормативные пределы [The evolution of the probability of exceeding normal limits]

Предсказание эпизодов выхода за нормативный предел по эмпирическим вероятностям осуществляется фиксацией доли наблюдаемого периода, в течение которого система находится вне нормы. Рассмотренные процедуры мониторинга и их последовательность позволяет с приемлемой точностью делать оценку текущего состояния и работоспособности в целом технологического оборудования в процессе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Острейковский, В. А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев – Москва : Физматлит, 2008. – 352 с.
2. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. – Москва : ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
3. Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян [и др.]. – Москва : Финансы и статистика, 1983. – 471 с.
4. Браммер, К. и др. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг – Москва : Наука, 1982. – 199 с.
5. Флах, П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / П. Флах. – Москва : ДМК Пресс, 2015. – 400 с.
6. Соколова, Э. С. Анализ временных рядов технических параметров промышленных объектов / Э. С. Соколова, Д. А. Ляхманов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, 2013. – № 2(99). – С. 88-95.
7. Вентцель, Е. С. Теория случайных процессов и её инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва : Высшая школа, 2000. – 383 с.
8. Рунион, Р. Справочник по непараметрической статистике. Современный подход. – Москва : Финансы и статистика, 1982. – 198 с.
9. Погосов, А. Ю. Моделирование физических процессов и технологическая информатизация в нефтяной промышленности и энергетике / А. Ю. Погосов, С. А. Положаенко, Ю. В. Григоренко. – Одесса : Наука и техника. – 2013. – 656 с.
10. Сысоев, Ю. С. Алгоритм прогнозирования дрейфа температур маслосистемы ГЦН блока АЭС с реактором ВВЭР-1000 / Ю. С. Сысоев, В. Г. Бекетов, Н. А. Симакова // Глобальная ядерная безопасность, 2016. – № 3(20). – С. 57-63.
11. Эльясберг, П. Е. Определение движения по результатам измерений / П. Е. Эльясберг. – Москва : Либроком, 2019. – 416 с.
12. Сизиков, В. С. Устойчивые методы обработки результатов измерений / В. С. Сизиков – Санкт-Петербург : «Спец Лит», 1999. – 240 с.

REFERENCES

- [1] Ostrejkovskij V.A., Shvy`ryaev Yu.V. Bezopasnost` atomny`x stancij. Veroyatnostny`j analiz [Nuclear Plant Safety. Probability Analysis]. Moskva [Moscow]. Fizmatlib. 2008. 352 p. (in Russian).
- [2] Richard G. Lyons. Cifrovaya obrabotka signalov [Understanding Digital Signal Processing]. Moskva. [Moscow]. Binom-Press. 2006. 656 p. (in Russian).
- [3] Ajvazyan S.A. et al. Prikladnaya statistika: Osnovy` modelirovaniya i pervichnaya obrabotka danny`x [Applied Statistics: Fundamentals of Modelling and Primary Data Processing]. Moskva. Finansy` i Statistika [Moscow. Finance and Statistics]. 1983. 471 p. (in Russian).
- [4] Bramer K., Ziffling G. Fil`tr Kalmana-B`yusi [Kalman-Bucy Filter]. Moskva. Nauka [Moscow. Science]. 1982. 199 p. (in Russian).
- [5] Flax P. Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroeniya algoritmov, kotory`e izvlekayut znaniya iz danny`x [The Machine Learning. The Science and Art of Building Algorithms that Extract Knowledge from Data]. Moskva [Moscow]. DMK Press. 2015. 400 p. (in Russian).
- [6] Sokolova E`.S., Lyaxmanov D.A. Analiz vremenny`x ryadov texnicheskix parametrov promy`shlenny`x ob`ektov [Analysis of Time Series of Technical Parameters of Industrial Objects]. Trudy` Nizhegorodskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva [Works of Nizhni Novgorod State Technical University n. a. R.Y. Alexeev]. Nizhni Novgorod. 2013. № 2(99). 366 p. (in Russian).
- [7] Ventcel` E.S., Ovcharov L.A. Teoriya sluchajny`x processov i eyo inzhenerny`e prilozheniya [Theory of random processes and its engineering applications]. Moskva. Vy`ssh. shk. [Moscow. High School]. 2000. 383 p. (in Russian).
- [8] Runion R. Spravochnik po neparametricheskoy statistike. Sovremenny`j podxod [Handbook of Nonparametric Statistics. Modern Approach]. Moskva. Finansy` i Statistika [Moscow. Finance and Statistics]. 1982. 198 p. (in Russian).
- [9] Pogosov A.Yu., Polozhaenko S.A., Grigorenko Yu.V. Modelirovanie fizicheskix processov i texnologicheskaya informatizaciya v neftyanoy promy`shlennosti i e`nergetike [Modeling of Physical Processes and Technological Informatization in the Oil Industry and Energy]. Odessa. Nauka i Teknika. 2013. 656 p. (in Russian).
- [10] Sy`soev Yu.S., Beketov V.G., Simakova N.A. Algoritm prognozirovaniya drejfa temperatur maslosistemy` GCzN bloka AE`S s reaktorom VVE`R-1000 [Prediction Algorithm the Temperature Drift of the MCP Oil System of a Nuclear Power Plant Unit With a WWER-1000 Reactor]. Global`naya yadernaya bezopasnost` [Global Nuclear Safety]. 2016. № 3(20). P. 57-63.
- [11] E`l`yasberg P.E. Opredelenie dvizheniya po rezul`tatah izmerenij [Motion Detection Based on Measurement Results]. Moskva [Moscow]. Librokom. 2019. 416 p. (in Russian).
- [12] Sizikov V.S. Uстойchivye metody` obrabotki rezul`tatov izmerenij [Sustainable Methods of Processing Measurement Results]. Sankt-Peterburg. Specz Lit. 1999. 240 p. (in Russian).

The Conception of NPP Equipment Monitoring Based on Nonparametric Statistics and Trained Neural Network

V.V. Krivin¹, V.Ya. Shpicer², V.G. Beketov³, I.O. Ishigov⁴, V.A. Tolstov⁵.

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

¹ORCID iD: 0000-0003-0903-0786
WoS ResearcherID: E-2267-2018
e-mail: vkrivin@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0002-5051-5091
e-mail: shpitsr@mephi.ru

³ORCID iD: 0000-0003-0242-6745
WoS ResearcherID: G-3866-2017
e-mail: vvbeketov@mephi.ru

⁴ORCID iD: 0000-0002-5829-6989
WoS ResearcherID: E-2448-2018
e-mail: ioishigov@mephi.ru

⁵ORCID iD: 0000-0001-7144-5195
WoS ResearcherID: F-1032-2017
e-mail: v-tolstov-2017@mail.ru

Abstract – The article deals with the concept of monitoring based on nonparametric statistics. It is supposed the possible application to monitor the technological systems of nuclear power plants. Modern complex plants and technogenic objects are equipped with industrial monitoring systems. The evolution of such systems in natural form is the generation of alternative concepts, constructs, and items selection for efficiency during operation.

Keywords: monitoring, forecasting, NPP safety, main circulation pump, digital signal processing, artificial neural network, nonparametric statistics, Kalman-Bucy filter, real-time processing, regulatory limits.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 539.17.01

ВОЗМОЖНОСТИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПРИРОДНОГО УРАНА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

© 2020 А.В. Гончарук

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В данной работе рассматриваются современные тенденции развития мировой энергетики. Отмечается прогресс в развитии возобновляемых источников энергии. Обозначены ключевые преимущества атомной генерации, которые во многом обуславливают значимость и перспективность этого вида энергетики для развития стран с высокими темпами роста энергопотребления. Значительная часть работы посвящена описанию специфики уранового топлива для ядерных реакторов. В частности, приведены основные показатели мировых запасов урановой руды в увязке с экономической составляющей их добычи. Кратко описаны основные нейтронно-физические процессы, протекающие в ядерном реакторе на тепловых нейтронах. В качестве альтернативы рассмотренным технологиям представлены особенности реакторов на тяжелой воде и реакторов на быстрых нейтронах. Делается упор на фундаментальные различия в видах используемого топлива и физической основе процесса протекания ядерной реакции. На основе приведенной информации строится предположение о возможных преимуществах разработки указанного технологического направления для расширения ресурсной базы атомной энергетики.

Ключевые слова: уран, быстрые нейтроны, ядерный реактор, атом, топливо, БН-800.

Поступила в редакцию 24.12.2019
После доработки 08.02.2020
Принята к публикации 12.02.2020

Атомная энергетика еще «в тренде»

Даже несмотря на выход США из парижского соглашения по климату, проблема борьбы с выбросами углекислого газа в атмосферу продолжает оставаться одной из глобальных проблем, которые объединяют все мировое сообщество. Мировое внимание к выступлению шведской активистки Греты Тунберг, крупнейшие пожары, охватившие в течение 2019 г. леса Сибири, леса Калифорнии и почти весь австралийский континент значительно укрепили позиции «зеленых». Сейчас все развитые и даже развивающиеся страны стремятся к более активному использованию экологически безопасных технологий.

Несмотря на то, что к возобновляемым источникам энергии тоже возникает много вопросов, в том числе в части их утилизации, влияния на экосистемы, низкого коэффициента полезного действия и высокой стоимости, их распространение в мире идет достаточно высокими темпами. Так, только за 2018 г. Китай ввел в эксплуатацию 20,59 ГВт мощностей ветряных станций и 44,3 ГВт солнечных [1].

Кроме возобновляемой энергетики, все большее внимание в качестве основного источника энергии уделяется газу. В частности, руководство Республики Корея в лице президента Мун Чжэ Ина, заявив о намерении постепенно отказаться от развития атомной генерации в стране, стремительно наращивает объемы импорта газа. По результатам 2017 г. страна стала 3-м крупнейшим мировым импортером сжиженного природного газа (после Японии и Китая) [2]. Также все чаще звучит и понятие «сланцевой революции». Когда добыча, так называемого, сланцевого газа станет экономически целесообразной, и ресурсная база голубого топлива значительно

увеличится, еще большее количество стран получат возможность строить свою национальную энергосистему на экологически безопасном газе.

Если для развивающихся стран наиболее простой путь повышения энерговыработки – это использование угля, то для развитых, как например Япония, США, Франция, большую роль играет атомная энергетика, которая принадлежит к «зеленым технологиям». В случае же с Китаем, как крупнейшим энергопотребителем в мире, можно наблюдать одновременное продвижение сразу всех возможных видов энергогенерации. Одно из самых значительных преимуществ атомной энергетике перед угольной состоит в удельной энергоемкости топливных ресурсов. Например, энергия деления атомов 1 кг природного урана (содержит 99,3% изотопа урана-238 и 0,7% изотопа урана-235) составляет $5,8 \cdot 10^{11}$ Дж, что эквивалентно энергии деления 10 т. угля (антрацита) [3].

В настоящее время атомная энергетика продолжает укреплять свои позиции на энергетических рынках многих стран, хотя авария на АЭС «Фукусима» в марте 2011 года поставила ее перспективы под значительные сомнения. Аналогичные сложности возникали и после иных крупных аварий на атомных объектах – авария на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.) и авария на Три-Майл-Айленд (28 марта 1979 г.). Сейчас количество ядерных энергоблоков в мире все же непрерывно увеличивается. На начало 2020 года в мире в эксплуатации находится уже 447 реактор, ещё 52 – на стадии строительства [4].

Основа для топлива – уран и плутоний

Возможность использования того или иного элемента обуславливается целым рядом факторов. Первым критерием, разумеется, является энергетический выход. Исходя из нейтронно-физических свойств атомов, энергетически выгодными являются две реакции – слияние легких ядер (синтез) и деление тяжелых на более легкие. С ростом массового числа элемента энергия связи нуклонов в ядре уменьшается. Это объясняется увеличением кулоновских сил отталкивания между протонами в ядре. Соответствующая зависимость (так называемая, кривая Бете-Вайцзеккера) представлена на рисунке 1.

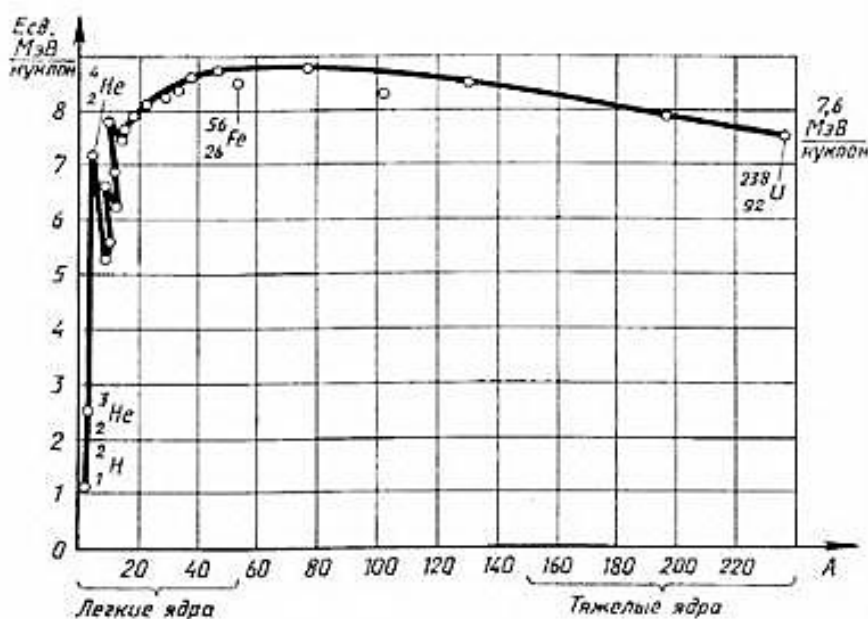


Рисунок 1 – Зависимость удельной энергии связи нуклонов в ядре от массы ядра [The dependence of the specific binding energy of nucleons in the nucleus on the its mass]

Если для слияния легких ядер нужна колоссальная энергия (термоядерный синтез), что на нынешней ступени технологического развития является слишком сложно управляемым процессом, то распад тяжелых ядер изучается с 40-х годов прошлого века и к настоящему моменту является хорошо освоенным механизмом получения энергии. Для определения способности различных элементов к поддержанию цепной ядерной реакции за счет вторичных нейтронов деления необходимо изучить целый ряд их характеристик, например период полураспада, энергию потенциального барьера, удельную энергию связи, количество вторичных нейтронов деления, сечение захвата и сечение деления на нейтронах средней и низкой энергий. По итогам анализа этих параметров для различных элементов удалось определить, что элементов, пригодных для использования в качестве топлива для ядерных реакторов не так много. В частности, под вышеназванные критерии попадают несколько изотопов урана, некоторые изотопы плутония (хоть он и не существует в природе) и изотоп тория-232. Основным топливом для всех реакторов в мире является уран.

Разведанные мировые запасы урана оцениваются в 5,5 млн. т, в том числе 1,77 млн. т со стоимостью извлечения до 40 долл./кг и 1,57 млн. т со стоимостью извлечения 40-130 долл./кг. Около 23% разведанных запасов приходится на страны СНГ (Казахстан, Узбекистан, Россию и Украину), по 22% – на страны Африки (прежде всего на Южно-Африканскую Республику, Нигер и Намибию) и Австралию (в том числе 40% запасов со стоимостью извлечения менее 40 долл./кг), 21% – на Северную Америку [5].

Более того, не вся добываемая руда пригодна для производства топлива. Для протекания ядерной реакции в реакторе на тепловых нейтронах, которыми являются почти все энергетические реакторы в мире, используется изотоп урана-235. А его содержание в природном уране достаточно невелико – всего около 0,7%. Для использования урана в качестве топлива в реакторе на тепловых нейтронах его необходимо сначала обогатить по изотопу-235 до процентного содержания в загружаемом топливе 2,5 – 5%. На примере строящейся Белорусской АЭС поясним, какое количество урана необходимо для загрузки реактора. Планируется, что начальная загрузка реактора Белорусской АЭС будет содержать 163 тепловыделяющие сборки (ТВС) со средним обогащением 2,68% по урану-235. Вес топлива в одной ТВС – 571 килограмм. Вес топливной загрузки в реактор составит около 93 тонн. Длительность работы полной топливной загрузки примерно один год. В первую перегрузку в активную зону одного реактора загружается 42 свежих ТВС. В процессе перегрузки извлекается примерно 1/4 часть топлива и загружается такое же количество свежего топлива [6].

В связи с небольшим содержанием изотопа урана-235 в урановой руде и наличии крупных резервов в настоящее время практически неиспользуемого изотопа урана-238 (содержание в руде – 99,3%) ученых всего мира долгое время озадачивал вопрос о возможности активного вовлечения всего ресурса урана в ядерно-топливный цикл. В настоящее время уже существует несколько моделей реакторов, которые достаточно успешно решают обозначенную задачу – это реакторы на тяжелой воде и реакторы на быстрых нейтронах. Но стоит отметить, что если тяжеловодные реакторы более-менее распространены и в настоящее время входя в реакторный парк таких стран, как Канада, Индия, Китай, то реакторы на быстрых нейтронах, в том числе в промышленном ключе, эксплуатируются только в России.

Физические основы реакторных технологий

И реактор на тяжелой воде, и реактор на быстрых нейтронах позволяют вовлечь в ядерно-топливный цикл природный уран, содержащий большое количество изотопа урана-238, но принцип его вовлечения, физика процесса и итоговые продукты реакции кардинально отличаются.

В ядерной реакции лишь небольшое количество нейтронов обладают низкой энергией или высокой энергией. Большинство нейтронов деления обладают средней энергией – распределение энергии вторичных нейтронов представлено на рисунке 2. Так как физически не имеется возможности нейтрон ускорить (потому что нейтрон не имеет заряда), мы можем манипулировать процессами в ядерной реакции только через замедление нейтронов путем их соударения с другими частицами.

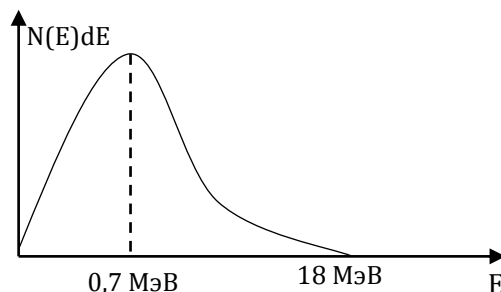


Рисунок 2 – Энергия вторичных нейтронов деления [Energy of secondary fission neutrons]

Для описания принципа работы реактора необходимо рассмотреть взаимодействие двух интересующих нас изотопов урана (235 и 238) с нейтронами различных энергий. Так, уран-238 практически не делится нейтронами низких энергий, но при этом способен делиться нейтронами с высокой энергией. В то же время уран-235 может делиться нейтронами любой энергии, но при этом значительно лучше он делится нейтронами невысокой энергии – соответствующая зависимость представлена на рисунке 3. Рассмотрим, как эти процессы протекают в реакторе на тяжелой воде и реакторе на быстрых нейтронах.

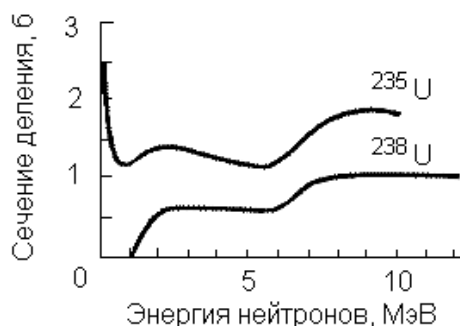


Рисунок 3 – Зависимость деления ядер урана от энергии вторичного нейтрона [The dependence of uranium nuclei fission on the secondary neutron energy]

Тяжеловодный реактор

В качестве топлива такой реактор использует природный уран с составом 99,3% по изотопу 238, 0,7% по изотопу 235. Тяжелая вода является наилучшим из известных замедлителей нейтронов (ее коэффициент замедления равен 5700, тогда как у графита – 205, у обычной воды – 61 [7]). В таком реакторе замедление нейтронов будет достаточным, чтобы уран-235 все равно поддерживал цепную ядерную реакцию. Также какая-то часть урана-238 будет делиться нейтронами высоких энергий, не успевших замедлиться, но основная реакция пойдет в уране-235.

Продуктом работы такого реактора станет, так называемый реакторный плутоний – облученное ядерное топливо с большим содержанием изотопа плутония-239. Основная часть урана-238 при захвате замедленных нейтронов вместо деления и испускания нейтронов будет превращаться в плутоний-239 [8]. Однако в связи с длительным периодом облучения топлива в энергетическом реакторе итоговый продукт

не будет являться плутонием оружейного качества. В продуктах распада будут накапливаться также и «загрязняющие» изотопы плутоний – 238, 240, 241, которые получаются в результате захвата нейтронов ураном-235, а также последовательным захватом нейтронов уже плутонием-239 без деления (изотопный состав плутония из различных видов реакторов представлен в таблице 1). В случае если тяжеловодный реактор перевести на режим коротких облучений (примерно 14 дней и 8 дней «долеживания»), использовать в канальном режиме с возможностью перегрузки на ходу, то это путь к созданию реактора – наработчика оружейного плутония [9].

Таблица 1 – Изотопный состав плутония в облучённом ядерном топливе [Isotopic composition of plutonium in irradiated nuclear fuel]

Тип реактора	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu
Тяжеловодный на естественном уране (3 года облучение)	0,1	67,6	25,6	5,3	1,4
Реактор с водой под давлением, обогащение около 4,4%	1,7	58	22,3	12,3	4,7
Тяжеловодный для наработки плутония	Доли %	~95	~5	Доли %	-

Вместе с тем, радиохимическая обработка облученного ядерного топлива из тяжеловодного реактора крайне сложна и не позволяет в необходимых масштабах выделять изотоп плутония-239 для его дальнейшего использования в реакторах на замедленных нейтронах (но позволяет в быстрых) или для создания ядерных взрывных устройств.

Наличие «загрязняющих» изотопов плутония создает очень высокий радиационный фон, и характеризуется высоким уровнем спонтанного деления ядер, делая ядерное взрывное устройство мало контролируемым.

В 1962 г. США провели экспериментальный подрыв устройства на основе топлива из тяжеловодного реактора, но ввиду высокой технологической сложности конструкции это направление не получило развития.

Таким образом, изотоп урана 235, содержащийся в естественной смеси урана при очень эффективном замедлении нейтронов способен поддерживать ядерную цепную реакцию, делая природный уран топливом для тяжеловодного реактора. Уран-238 также вносит ограниченный вклад в протекание реакции и получение энергии.

Реактор на быстрых нейтронах

Так как вероятность деления нейтронами высоких энергий для урана-235 невелика, то для поддержания цепной ядерной реакции за счет нейтронов высоких энергий необходимо значительно увеличить содержание урана-235 в топливе реактора. Например, в российском реакторе на быстрых нейтронах БН-800 в качестве топлива используются ТВС с обогащением по урану-235 от 18% до 24%, также частично задействованы сборки на основе МОКС-топлива [10]. Реакция в активной зоне реактора проходит без какого-либо замедления нейтронов и в основном реакция полагается на энергетический поток нейтронов высокой энергии, доля которых, как описано выше, не велика. Для отвода тепла используется жидкость, не влекущая потерю нейтронами энергии, в частности на БН-800 используется натрий.

Реактор на быстрых нейтронах позволяет осуществлять две вещи: замкнуть ядерный топливный цикл и вовлечь в цикл уран-238. Замыкание цикла происходит путем дожигания, в активной зоне быстрого реактора отработавшего ядерного топлива других реакторов, в частности ВВЭРов. В связи с тем, что процессы в зоне протекают за счет нейтронов высоких энергий, эти же самые нейтроны способны делить и

реакторный плутоний, и продукты отработавшего ядерного топлива (изотопы плутония 240, 241, урана 236, нептуния 237, америция 243, стронция 244...). Таким образом, вместо складирования в пристанционных хранилищах, остекловывания и захоронения отработавшего топлива его можно дожигать в быстрых реакторах. Разумеется, в одном цикле одного реактора возможность по сжиганию такого топлива не очень велика, поэтому для полноценного замыкания цикла необходимо создания большого количества мощностей.

Уран-238 при захвате нейтрона без деления превращается в плутоний 239, который в свою очередь благодаря высоким нейтронно-физическим свойствам (лучше, чем у урана-235) может в дальнейшем служить основной для топлива любого реактора, как напрямую, так и в смеси с оксидом урана (мокс-топливо), потому что подобно урану-235 способен делиться нейтронами любых энергий, более того, количество вторичных нейтронов деления у плутония-239 выше, чем у урана-235 (чем больше, тем лучше для протекания реакции) [11].

Конструкция быстрого реактора предусматривает, так называемую, сферу воспроизводства вокруг ядра реактора. Сфера воспроизводства предназначена для захвата вылетающих нейтронов и непосредственного участия в протекании ядерной реакции не принимает. Эта сфера состоит из ТВС с обедненным ураном, то есть ураном-238, без изотопа урана 235 [12]. По итогам протекания реакции в этих ТВС при соответствующем кратком периоде облучения уран-238 превращается в плутоний-239, расширяя топливную базу атомной энергетики.

По результатам эксплуатации быстрого реактора не создается большого количества отработавшего ядерного топлива, все топливо в значительной мере просто выгорает за счет деления нейтронами высоких энергий.

Таким образом, изотоп урана-238 используется в быстром реакторе для расширения топливно-ресурсной базы атомной энергетики и помогает нарабатывать плутоний-239 свободный от «загрязняющих» изотопов и при этом пригодный для дальнейшего использования, как в качестве топлива быстрого реактора, так и в топливе реакторов на замедленных нейтронах.

Заключение

Хотя атомная энергетика периодически сталкивается с новыми вызовами и даже вызывает значительное недоверие у широких слоев населения (как, например, в 2019 году после просмотра сериала Чернобыль), но она все же способна сыграть ключевую роль в стремлении человечества к снижению выброса углекислого газа в атмосферу и сокращении антропогенного влияния на изменения климата. Возможно, одним из крупных «трендов» 21 века является всеобщая озабоченность ресурсами планеты и поэтапным переходом на ресайклинг, то есть повторное использование материалов. Атомная энергетика с определенной точки зрения тоже способна к снижению отходов при производстве топлива и к ресайклингу – не только в рамках переработки ОЯТ, но и в процессе эксплуатации реакторов. При существующей схеме эксплуатации реакторов на тепловых нейтронах в качестве топлива в основном задействуется изотоп урана-235, тогда как основная часть добываемой руды в виде изотопа урана-238 становится своеобразным отходом производства. Однако благодаря своим нейтронно-физическим характеристикам этот изотоп также пригоден к использованию в качестве топлива для ядерных реакторов. Более того, в случае его активного вовлечения в ядерно-топливный цикл вся атомная отрасль в долгосрочной перспективе решит вопрос с ограниченной топливной базой.

Уже существующие реакторы на тяжелой воде и еще не до конца освоенные реакторы на быстрых нейтронах могут оказать всему человечеству значительную услугу в деле борьбы с экологически чистый долгосрочный источник производства

энергии. При этом если тяжеловодный реактор просто способен производить электроэнергию из топлива на основе природного урана без дополнительного процесса обогащения, то реактор на быстрых нейтронах имеет и дополнительные функциональные возможности. Он способен как нарабатывать новое топливо из изотопа урана-238, так и сжигать различные долгоживущие минорные актиниды и высокоактивные отходы. Единственный в мире промышленный реактор на быстрых нейтронах в настоящее время эксплуатируется на четвертом энергоблоке Белоярской АЭС – это уже упоминавшийся реактор БН-800 (введен в промышленную эксплуатацию 1 ноября 2016 г.). В настоящее время в России также рассматривается возможность сооружения аналогичного реактора повышенной мощности – БН-1200. Кроме того, непрерывно идут процессы по исследованию и новых видов топлива как с точки зрения устойчивости к аварийным ситуациям, повышения глубины выгорания, так и с точки зрения активного вовлечения изотопов урана-238 (например, МОКС-топливо). Вероятно, активное использование изотопа урана-238, имеющегося в природе в больших количествах, вместе с активным продвижением технологий реакторов на быстрых нейтронах 4-го поколения может стать одним из перспективных направлений развития будущей атомной энергетики, ориентированной на максимальное вовлечение урановых ресурсов в ядерный-топливный цикл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Renewable Energy Policy Network for the 21st century. Global status report. – URL : <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/08/Full-Report-2018.pdf>. (дата обращения: 06.02.2020).
2. *Ирина, М. Ю.* Газовые рынки стран восточной Азии / М. Ю. Ирина. – Санкт-Петербург, 2016. – 25 с.
3. *Аль-Бермани, А. Г.* Атомные электростанции / А. Г. Аль-Бермани // Молодой ученый. – 2015. – № 7. – С. 82-85.
4. *Алан, М.* Ядерная Энергетика: положение дел в мире. – URL : https://www.iaea.org/sites/default/files/49204734548_ru.pdf (дата обращения: 06.02.2020).
5. *Никулин, А. А.* Перспективы мирового рынка урана в контексте новых тенденций развития ядерной энергетики / А. А. Никулин. – Москва, 2013. – 19 с.
6. Начальная загрузка реактора Белорусской АЭС составит 93 тонны урана. – Сайт экологического центра «Беллона». 2012. – URL : <https://bellona.ru/2012/08/29/nachalnaya-zagruzka-reaktora-belorus/> (дата обращения: 06.02.2020)
7. *Hinds, D.* Next Generation Nuclear Energy: The ESBWR / D. Hinds, C. Maslak // Nuclear News. – 2006. – № 49. – P. 35-40.
8. *Mark, J.K.* Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium / J.K. Mark // Science and Global Security. – 2010. – № 2-3. – P. 170.
9. *Шмелев, А. Н.* Физические факторы и свойства ядерных материалов, влияющие на их защищенность / А. Н. Шмелев, Г. Г. Куликов, В. А. Апсэ. – Москва, 2001. – 56 с.
10. *Фридман, В.* Долгий путь быстрой энергетики / В. Фридман // В мире науки. – 2014. – № 4. – с. 15-18.
11. *Милукова, М. С.* Аналитическая химия плутония / М. С. Милукова, Н. И. Гусев, И. Г. Сентюрин, И. С. Складенко. – Москва, 1965. – 454 с.
12. *Левин, В. Е.* Ядерная физика и ядерные реакторы / В. Е. Левин. – Москва, 1979. – 284 с.

REFERENCES

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st century. Global Status Report. URL: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/08/Full-Report-2018.pdf>.
- [2] Irina M.Y. Gazovy`e ry`nki stran vostochnoj Azii [East Asia Gas Markets]. Sankt-Peterburg [Sankt-Peterburg]. 2016. 25 p. (in Russian).
- [3] Al-Bermani A.G. Atomny`e e`lektrostantsii [Nuclear Power Plants]. Molodoj ucheny`j [Young scientist]. 2015. № 7. P. 82-85 (in Russian).
- [4] Alan M. Yadernaya E`nergetika: polozhenie del v mire [Nuclear Energy: It's Current State in the World]. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/49204734548_ru.pdf (in Russian).

- [5] Nikulin A.A. Perspektivy` mirovogo ry`nka urana v kontekste novy`x tendencij razvitiya yadernoj e`nergetiki [Prospects of the World Uranium Market in the Context of New Trends in the Development of Nuclear Energy]. Moskva [Moscow]. 2013. 19 p. (in Russian).
- [6] Nachalnaya zagruzka reaktora Belorusskoi AES sostavit 93 tonni urana [The Initial Loading of the Reactor of the Belorussian NPP Will Amount to 93 Tons of Uranium]. Sait ekologicheskogo centra Bellona [Website of the Ecological center Bellona]. 2012. URL: <https://bellona.ru/2012/08/29/nachalnaya-zagruzka-reaktora-belorus/> (in Russian).
- [7] Hinds D. Maslak C. Next Generation Nuclear Energy: The ESBWR. Nuclear News. 2006. № 49. P. 35-40.
- [8] Mark J.K. Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. Science and Global Security. 2010. № 2-3. P. 170.
- [9] Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A. Fizicheskie faktory i svoistva yadernih materialov, vliyayushchie na ih zaschischennost [Physical Factors and Properties of Nuclear Materials that Affect Their Security]. Moskva [Moscow]. 2001. 56 p. (in Russian).
- [10] Freedman V. Dolgyi put bistroi energetiki [Long Way of Fast Energy]. V mire nauki [In the World of Science]. 2014. № 4. P. 15-18 (in Russian).
- [11] Milukov M.C., Gusev N.I., Senturin I.G., Sklyarenko I.C. Analiticheskaya khimiya plutoniya [Analytical Chemistry of Plutonium]. Moskva [Moscow]. 1965. 454 p. (in Russian).
- [12] Levin V.E. Yadernaya fizika I yadernie reaktori [Nuclear Physics and Nuclear Reactors]. Moskva [Moscow]. 1979. 284 p. (in Russian).

Usage of Natural Uranium in Nuclear Reactors

A.V. Goncharuk

*Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409
ORCID iD: 0000-0001-9159-4243
WOS Researcher ID: O-6356-2018
e-mail: del17@yandex.ru*

Abstract – The paper reviews the modern tendencies in the development of the world nuclear energy sector and progress in research of renewable energy technologies. Due to the unique advantages of the nuclear energy generation it proves to be very prospective source of power for the countries with a very intensive pace of development and huge energy demands. The main part of the article goes through the physical and economic backgrounds of the uranium fuel usage. The basics of the into-core processes and nuclear reactions substance are described. The comparative assessment of some aspects of thermal neutron and fast neutron technologies is listed. The physical background behind the two different reactor types builds up the conclusion on the potential advantages for the fuel basis of the atomic energy due to high involvement of the fast neutron specter into the nuclear energy generation processes.

Keywords: uranium, fast neutrons, nuclear reactor, atom, fuel, BN-800.

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

УДК 78.4 : 331.546 : 621.039

**СИНХРОНИЗАЦИЯ ЗАДАЧ ОТРАСЛЕВЫХ ВУЗОВ СО
СТРАТЕГИЕЙ РАЗВИТИЯ ГК «РОСАТОМ» КАК ФАКТОР
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

© 2020 В.А. Руденко, М.В. Головкин, С.А. Томилин, О.Ф. Цуверкалова

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

Рассмотрены вопросы необходимости синхронизации задач отраслевых вузов со стратегиями предприятий – промышленных партнеров. Обосновано стратегически значимое и взаимовыгодное сотрудничество предприятий и образовательных организаций. Определена роль опорных вузов Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» и их региональных филиалов на территориях расположения объектов атомной энергетики в формировании у будущих работников атомных станций в России и за рубежом высокого уровня культуры безопасности. Предложены к реализации мероприятия в соответствии с направлениями развития АО «Концерн «Росэнергоатом».

Ключевые слова: ГК «Росатом», ВИТИ НИЯУ МИФИ, АО «Концерн «Росэнергоатом», безопасность, стратегия развития, вуз, подготовка кадров.

Поступила в редакцию 16.12.2019

После доработки 09.01.2020

Принята к публикации 10.01.2020

Оптимизационные процессы последних лет в сфере образования ориентированы на повышение эффективности деятельности образовательных организаций, на качественный отбор наиболее перспективных и «жизнеспособных» субъектов, способных осуществлять подготовку наиболее востребованных рынком специалистов, отвечающих требованиям сверхдинамичной внешней среды, способных к высокопрофессиональному труду и к инициации нововведений. Ужесточение требований к вузам происходит на фоне общего падения спроса на специалистов в связи с сокращением масштабов производства, на фоне проблем, связанных с «демографической ямой», с низким уровнем подготовки в общеобразовательных учреждениях. Это приводит к необходимости поиска компромисса между требованиями современного законодательства и требованиями рынка и поиску новых форм и направлений развития вузов. Речь идет, прежде всего, о небольших вузах, например, региональных, являющихся субъектами филиальной сети крупных столичных вузов.

Филиалы, расположенные на удаленных по отношению к федеральному и региональным центрам территориях, вносят существенный вклад в реализацию «третьей миссии» университетов – связь с обществом, обеспечение социальной стабильности территории, подготовка инженерной элиты для кадрового обеспечения предприятий города. В связи с этим, эффективность стратегии региональных вузов будет зависеть от максимально полной кастомизации – синхронизации задач с целевыми ориентирами развития промышленных предприятий, расположенных на территории размещения вуза.

Эффективные практики согласования интересов вуза и предприятий можно рассмотреть на примере кейса Волгодонского инженерно-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (далее – ВИТИ НИЯУ МИФИ) – одного из опорных вузов Госкорпорации по атомной энергии «Росатом» (далее – ГК «Росатом»). Амбициозные цели, которые ставит перед собой ГК «Росатом» требуют соответствующей кадровой поддержки. В связи с этим, одной из задач НИЯУ МИФИ и его региональных филиалов является повышение эффективности подготовки высококвалифицированных кадров для предприятий атомной отрасли по профильным специальностям в интересах усиления позиций университета и ГК «Росатом» на мировом рынке ядерных технологий в странах присутствия. Местоположение ВИТИ НИЯУ МИФИ уникально – г. Волгодонск является единственным городом в стране, на территории которого функционируют предприятия четырех дивизионов ГК «Росатом»: от производства оборудования для атомных станций, его монтажа и наладки, до непосредственной эксплуатации и поддержания работоспособности (рис. 1).



Рисунок 1 – Предприятия дивизионов ГК «Росатом» и промышленного кластера, расположенные на территории г. Волгодонска [The enterprises of the Rosatom State Corporation divisions and the industrial cluster located on the territory of Volgogradsk]

Сегодня миссией атомной отрасли является становление лидерских позиций на мировом рынке технологий к 2030 г. и обеспечение государственных интересов: поддержание ядерного потенциала страны, решение проблем наследия, энергобезопасность. Выполнение миссии требует постановки и достижения стратегических целей повышения доли на международных рынках, снижения себестоимости продукции и сроков протекания процессов, создания новых продуктов для российского и международного рынков.

Согласуясь со стратегическими принципами, корпоративные цели каскадируются и декомпозируются в цели и задачи, стратегических бизнес-единиц контура ГК «Росатом»:

- первый уровень (ГК «Росатом»);
- второй уровень (АО «ТВЭЛ», АО «Концерн Росэнергоатом», АО «Атомэнергомаш», АО «Техснабэкспорт», АО «Атомредметзолото», АО «Ураниум Уан Груп», АО «Наука и инновации», АО «АСЭ», АО «Русатом Оверсиз», АО «ФЦЯРБ», ЯОК);
- третий уровень (другие организации, часть из которых напрямую подчиняются ГК «Росатом») [1].

Стратегические задачи электроэнергетического дивизиона:

- гарантирование безопасного, эффективного и надежного функционирования АЭС;
- повышение мощности и увеличение эффективности выработки электроэнергии при обеспечении необходимого уровня безопасности;
- цифровизация основных процессов и корпоративных функций с целью повышения безопасности и экономической эффективности эксплуатации АЭС;
- создание кадрового резерва для российского и международного рынков в рамках экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом».

Стратегические задачи машиностроительного дивизиона:

- наращивание производственных мощностей;
- снижение себестоимости и повышение операционной эффективности изготовления продукции;
- обеспечение роста экономического результата в долгосрочной перспективе: контрактация на международных рынках.

По словам Котова И.В., генерального директора АО «АЭМ-технологии», в ближайшие годы «Атоммаш» должен выйти на уровень производства пяти реакторов и 20 парогенераторов в год. Работа с такими объемами требует реформирования управленческих и производственных процессов, инвестиций в развитие производства, набора нового персонала и заставляет вплотную заняться бережливым производством [2].

Стратегической задачей предприятий инжинирингового дивизиона, расположенных на территории г. Волгодонска, является удержание первого места на глобальном рынке по количеству сооружаемых энергоблоков и сохранение доли на рынке с учетом тенденций роста рынка в абсолютном выражении. Решение данной задачи ведется по следующим направлениям:

- реализация проектов по проектированию и сооружению АЭС большой мощности, центров ядерных исследований и исследовательских реакторов, объектов по обращению с РАО и ОЯТ, объектов теплоэнергетики;
- разработка и внедрение цифровой платформы Multi-D[®], направленной на оптимизацию строительно-монтажных работ с целью более эффективного управления капитальным объектом и оптимизации сроков его создания и стоимости.

Группа компаний «Новавинд», представляющих дивизион по консолидации ветроэнергетических активов, ориентирует стратегическое развитие в консолидации

усилий ГК «Росатом» в передовых сегментах и технологических платформах электроэнергетики, основными направлениями которого являются:

- производство и сбыт ветроэнергетических установок мегаваттного класса;
- разработка готовых технологических решений, включая проектирование, производство, поставку комплектов оборудования, монтаж оборудования и инжиниринговое сопровождение автономных ветроэнергетических систем;
- разработка проектов ветропарков в соответствии с мировыми стандартами, включая проектирование, производство, поставку комплектов оборудования, монтаж, услуги инжинирингового и организационного сопровождения.

ВИТИ НИЯУ МИФИ, осуществляя образовательную деятельность, выступает инновационным ядром промышленно-образовательного кластера, консолидирующим предприятия четырех дивизионов ГК «Росатом» в г. Волгодонске и обеспечивающим опережающую подготовку специалистов для реализации экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом». Поддержка зарубежных проектов реализуется через развитие Ресурсного центра ГК «Росатом» – НИЯУ МИФИ, ориентированного на подготовку иностранных студентов для зарубежных АЭС. Стратегия цифровой трансформации экономики в целом и ГК «Росатом», в частности, находит отражение в разработке концепции «smart-образования» для подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров в интересах формирования цифровой корпоративной культуры и цифровых компетенций будущих специалистов. Рост требований отрасли к квалификации сотрудников вызывает необходимость в организации эффективной системы выявления, поддержки и развития способностей и талантов у детей и молодёжи, в развитии современного научно-технического творчества в Ростовской области для подготовки инженерно-технических кадров путем создания технопарка «Кванториум» в г. Волгодонске.

Стратегическим значением для развития ГК «Росатом» обладает электроэнергетический дивизион АО «Концерн «Росэнергоатом», реализующий сервисно-ориентированную модель развития, выступая поставщиком не только технико-технологической, но и «мягкой» инфраструктуры в рамках экспортоориентированной стратегии госкорпорации. «Мягкая» инфраструктура включает нормативно-правовую базу, планы по ликвидации аварий, на случай чрезвычайных ситуаций, а также неотъемлемый элемент – развитие человеческого капитала. Подготовка кадров для ядерной индустрии в эпоху глобализации требует новых решений, основанных на лучших российских практиках [3-5]. Следует особо отметить, что, кроме уникальных технологий во всем ядерном цикле – от добычи до бэк-энда, для строящихся АЭС крайне важно обеспечить формирование ответственности и принципиальной позиции в сфере безопасности и эффективности функционирования всех объектов атомной отрасли не только в стране их присутствия, но и за пределами.

В свою очередь, деятельность филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция» и его партнерство с ВИТИ НИЯУ МИФИ в формировании кадрового потенциала отрасли и территории является значимым фактором социально-экономического развития г. Волгодонска и Ростовской области в целом. ВИТИ НИЯУ МИФИ всегда гибко реагировал на запросы Концерна. Так, в период 2010-2017 гг. в ВИТИ НИЯУ МИФИ, в соответствии с потребностями ГК «Росатом» в целом и Концерна, в частности, осуществлены:

- оптимизация перечня специальностей и направлений подготовки под требования ядерного энергетического комплекса, включая лицензирование специальностей СПО, входящих в ТОП-50;
- в рамках реализации компетентностного подхода учтены конкретные навыки и компетенции студентов, необходимые для атомной отрасли;

- унифицированы рабочие учебные планы под требования ядерного энергетического комплекса;
- подготовка кадров адаптирована и постоянно корректируется с учетом изменений профессиональных стандартов в отрасли;
- организована работа международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики» и осуществляется выпуск научного журнала «Глобальная ядерная безопасность», входящего в ведущие наукометрические базы данных, для апробации результатов фундаментальных и прикладных исследований в сфере атомной энергетики, для популяризации и продвижения бренда ГК «Росатом» как инновационной, перспективной и безопасной отрасли;
- ведутся хоздоговорные работы и НИОКР по заказам и темам ядерного энергетического комплекса.

Указанные тренды определяют направления синхронизации стратегии опорных (отраслевых) вузов, являющихся основными поставщиками HR-потенциала. В качестве одного из ключевых партнеров Концерна определен ВИТИ НИЯУ МИФИ [6, 7]. Направления синхронизации задач ВИТИ НИЯУ МИФИ со стратегией Концерна для обеспечения эффективности и безопасности развития представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Планируемые к реализации мероприятия отраслевых вузов в соответствии с направлениями развития АО «Концерн «Росэнергоатом» [The measures to be taken by industry universities in accordance with the development directions of “Rosenergoatom Concern” JSC]

Целевые установки КРЭА	Задачи КРЭА
Освоение новых рынков	Создание технико-технологической инфраструктуры за рубежом, трансфер знаний
МЕРОПРИЯТИЯ НИЯУ МИФИ	
✓ Подготовка иностранных специалистов в НИЯУ МИФИ [8] ✓ Обеспечение организации проведения практик для иностранных студентов на базе Ресурсного центра и развитие его инфраструктуры ✓ Обеспечение на базе Ресурсного центра организации подготовки иностранного персонала по надзору, контролю изготовления и приемке продукции для строящихся атомных электростанций ✓ Обучение в Ресурсном центре представителей зарубежных организаций, которые могут способствовать продвижению отечественных ядерных технологий на мировой рынок. ✓ Развитие системы лингвистической подготовки высокопрофессиональных кадров международного уровня	
Повышение эффективности производства	А) Продуктовая диверсификация, внедрение и использование современных цифровых технологий
	Б) Развитие человеческого капитала
МЕРОПРИЯТИЯ НИЯУ МИФИ	
А) ✓ Развитие прикладных научных исследований в интересах предприятий атомной отрасли с использованием накопленного опыта, в соответствии с ключевым трендом цифровизации экономики по темам, предполагающим использование VR/AR-технологий, проведение научных мероприятий ✓ Обеспечение соответствия инфраструктурного комплекса требованиям опережающей подготовки кадров и возможности проведения научных исследований Б) ✓ Профессионально-ориентационная работа на различных уровнях образования для привлечения кадров на предприятия ГК «Росатом». Подготовка лабораторий и оснащение 6 квантов для создания технопарка «Кванториум» с целью популяризации инженерных и информационных направлений, ранней профессиональной ориентации школьников ✓ Практико-ориентированная подготовка и переподготовка кадров на основе принципов дуальности и индивидуализации процесса обучения с учетом требований профессиональных стандартов	

✓ Развитие академической мобильности как инструмента повышения качества образования ✓ Развитие базовых кафедр на предприятиях отрасли ✓ Развитие Центров профессиональных компетенций ✓ Подготовка кадров по приоритетным направлениям развития отечественной промышленности и технологий с учетом требований WorldSkills/AtomSkills ✓ Внедрение обязательной независимой оценки квалификаций и сертификации выпускников	
Максимальное повышение надежности и безопасности атомной энергетики	Формирование ответственности и принципиальной позиции в сфере безопасности и эффективности функционирования всех объектов атомной отрасли
МЕРОПРИЯТИЯ НИЯУ МИФИ	
✓ Реализация компетентностного подхода в воспитании культуры безопасности, формирование высокого уровня ответственности за объем и качество получаемых знаний [9] ✓ Становление научной школы «Культура безопасности на предприятиях атомной энергетики» [10-13] ✓ Проведение НИР и НИОКР по обеспечению эксплуатационной надёжности и безопасности оборудования и систем АЭС и других энергетических объектов ✓ Ежегодная международная научно-практическая конференция «Безопасность ядерной энергетики» [14] ✓ Научно-практический журнал «Глобальная ядерная безопасность» (входит в Перечень ВАК РФ) [15]	

Сегодня ВИТИ НИЯУ МИФИ ориентирует свое стратегическое развитие как международного образовательно-производственный центр (МОПЦ) по обеспечению кадрами экспортоориентированной стратегии ГК «Росатом» и продвижению отечественных ядерных технологий на мировой рынок для сохранения позиций лидерства в атомной энергетике (рис. 2)



Рисунок 2 – Модель ВИТИ НИЯУ МИФИ в 2030 г. в контексте стратегических задач ГК «Росатом» [The model of VETI NRNU MPhI in 2030 in the context of the strategic objectives of «Rosatom» State Corporation]

Реализация вузом перечисленных мероприятий, направленных на решение приоритетных задач основных промышленных партнеров, предприятий-работодателей, позволяет образовательной организации выходить на конкурентный уровень, выполнять установленные действующим законодательством критерии эффективности, осуществлять подготовку кадров в соответствии со стратегией инновационного роста национальной экономики. Для предприятий атомной отрасли развитие опорных вузов определяет, прежде всего, качество подготовки специалистов, отвечающих современным требованиям инновационного развития экономики, обладающих высоким уровнем профессионализма на основе принципов культуры безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт ГК «Росатом». – URL : <https://www.rosatom.ru/about/mission/>.
2. Контролируемая реакция: как развивается «Атоммаш». – URL : <https://expertsouth.ru/news/kontroliruemaya-reaktsiya-kak-razvivaetsya-atom mash/>.
3. Опыт и перспективы подготовки lean-специалистов на основе эффективного взаимодействия вуза и предприятий ГК «Росатом» / В. А. Руденко, М. В. Головкин, И. А. Ухалина, С. П. Агапова, А. В. Анцибор, Н. А. Ефименко // Глобальная ядерная безопасность – 2018. – № 1 (26). – С. 119-128.
4. Ранняя профессиональная ориентация в сфере атомной энергетики как фактор стратегического развития атомной отрасли / В. А. Руденко, М. В. Головкин, Н. В. Ермолаева, Н. И. Лобковская // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 4 (29). – С. 97-108.
5. Факторы и вектор стратегического развития вуза в контексте реализации инновационного потенциала региона / В. А. Руденко, С. П. Агапова, С. А. Томилин, И. А. Ухалина, О. Ф. Цуверкалова, М. В. Головкин, Н. А. Ефименко // Современное образование. – 2017. – № 1. – С. 19-31.
6. Шаповалова, И. Карьера начинается в школе / И. Шаповалова // Росэнергоатом. – 2018. – № 10. – С. 41.
7. Кадры. Пройти не поскользнуться // Росэнергоатом. 2017. – № 7. – С. 27.
8. Дмитриев, Н. М. Подготовка специалистов для атомной промышленности зарубежных стран в НИЯУ «МИФИ» / Н. М. Дмитриев, П. А. Арефьев. – Москва : ЦСПиМ, 2018. – 264 с.
9. Руденко, В. А. Компетентностный подход в воспитании культуры безопасности в вузе / В. А. Руденко, Н. П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2012. – № 2-3(4). – С. 136-141.
10. Руденко, В. А. Практические методы формирования приверженности культуре безопасности на индивидуальном уровне у студентов вуза / В. А. Руденко, Н. П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 1(6). – С. 100-103.
11. Руденко, В. А. Ценностная составляющая культуры безопасности / В. А. Руденко, Н. П. Василенко // Глобальная ядерная безопасность. – 2013. – № 4(9). – С. 82-86.
12. Жук, А. В. Отечественная и зарубежная историография проблем культуры безопасности в атомной энергетике / А. В. Жук, М. В. Головкин, Ю. А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 1 (22). – С. 113-121.
13. Головкин, М. В. Корпоративные ценности в системе устойчивого развития и безопасности экономики промышленных предприятий (на примере ГК «Росатом») / М. В. Головкин, В. А. Руденко // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 4 (17). – С. 103-114.
14. Официальный сайт ежегодной международной научно-практической конференции «Безопасность ядерной энергетики». – URL : <http://nps.viti-mephi.ru> (дата обращения: 26.11.2019).
15. Официальный сайт научно-практического журнала «Глобальная ядерная безопасность». – URL : <http://gns.mephi.ru/ru> (дата обращения: 26.11.2019).

REFERENCES

- [1] Oficial'ny'j sajt GK «Rosatom» [Official site of Rosatom State Corporation]. URL: <https://www.rosatom.ru/about/mission/> (in Russian).
- [2] Kontroliruemaya reakciya: kak razvivaetsya «Atom mash» [Controlled reaction: how Atom mash is developing]. URL: <https://expertsouth.ru/news/kontroliruemaya-reaktsiya-kak-razvivaetsya-atom mash/> (in Russian).

- [3] Rudenko V.A., Golovko M.V., Ukhulina I.A., Agapova S.P., Antsybor A.V., Efimenko N.A. Опы́т и перспективы подготовки lean-specialistov na osnove eʹffektivnogo vzaimodejstviya vuza i predpriyatij GK «Rosatom» [Experience and Perspectives of LEAN-Specialist Training on the Basis of Effective Interaction between University and “Rosatom” State Corporation Enterprises]. *Globalʹnaya yadernaya bezopasnostʹ* [Global Nuclear Safety]. 2018. № 1 (26). С. 119-128 (in Russian).
- [4] Rudenko V.A., Golovko M.V., Ermolaeva N.V., Lobkovskaya N.I. Rannaya professionalʹnaya orientatsiya v sfere atomnoj eʹnergetiki kak faktor strategicheskogo razvitiya atomnoj otrasli [Early Professional Orientation in the Field of Nuclear Energy as a Factor of Nuclear Industry Strategic Development]. *Globalʹnaya yadernaya bezopasnostʹ* [Global Nuclear Safety]. 2018. № 4 (29). P. 97-108 (in Russian).
- [5] Rudenko V.A., Agapova S.P., Tomilin S.A., Ukhulina I.A., Tsuverkalova O.F., Golovko M.V., Efimenko N.A. Faktory i vektor strategicheskogo razvitiya vuza v kontekste realizatsii innovacionnogo potentsiala regiona [Factors and vector of university strategic development in the context of the region innovative potential implementation]. *Sovremennoe obrazovanie* [Modern education]. 2017. №1. P. 19-31 (in Russian).
- [6] Shapovalova I. Karʹera nachinaetsya v shkole [Career starts at school]. *Roseʹnergoatom* [Rosenergoatom]. 2018. №10. P. 41 (in Russian).
- [7] Kadry. Projti ne poskolʹznutʹsya [Personnel. Go not to Slip]. *Roseʹnergoatom* [Rosenergoatom]. 2017. № 7. P. 27 (in Russian).
- [8] Dmitriev N.M., Arefʹev P.A. Podgotovka specialistov dlya atomnoj promyʹshlennosti zarubezhnyʹx stran v NIYaU MIFI [Training of Specialists for the Nuclear Industry of Foreign Countries in MEPhI]. Moskva : CzSPiM [Moscow : CSEM] 2018. 264 p. (in Russian).
- [9] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Kompetentnostnyʹj podxod v vospitanii kulʹtury bezopasnosti v vuzе [Competence Approach in the Education of Safety Culture at the University]. *Globalʹnaya yadernaya bezopasnostʹ* [Global Nuclear Safety]. 2012. № 2-3(4). P. 136-141 (in Russian).
- [10] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Prakticheskie metody formirovaniya priverzhennosti kulʹture bezopasnosti na individualʹnom urovne u studentov vuza [Practical Methods of Formation of Commitment to the Safety Culture at the Individual Level of University students]. *Globalʹnaya yadernaya bezopasnostʹ* [Global Nuclear Safety]. 2013. № 1 (6). P. 100-103 (in Russian).
- [11] Rudenko V.A., Vasilenko N.P. Cennostnaya sostavlyayushhaya kulʹtury bezopasnosti [Value Component of Safety Culture]. *Globalʹnaya yadernaya bezopasnostʹ* [Global Nuclear Safety]. 2013. № 4 (9). P. 82-86 (in Russian).
- [12] Zhuk A.V., Golovko M.V., Evdoshkina Yu.A. Otechestvennaya i zarubezhnaya istoriografiya problem kulʹtury bezopasnosti v atomnoj eʹnergetike [Domestic and Foreign Historiography of Safety Culture Problems in Nuclear Power Engineering]. *Globalʹnaya yadernaya bezopasnostʹ* [Global Nuclear Safety]. 2017. № 1 (22). P. 113-121 (in Russian).
- [13] Golovko M.V., Rudenko V.A. Korporativnyʹe cennosti v sisteme ustojchivogo razvitiya i bezopasnosti eʹkonomiki promyʹshlennyʹx predpriyatij (na primere GK «Rosatom») [Corporate Values in the System of Sustainable Development and Economic Security of Industrial Enterprises (on the example of Rosatom)]. *Globalʹnaya yadernaya bezopasnostʹ* [Global nuclear safety]. 2015. № 4 (17). P. 103-114 (in Russian).
- [14] Oficialʹnyʹj sayt ezhegodnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Bezopasnostʹ yadernoj eʹnergetiki» [Official website of the Annual International Scientific and Practical Conference «Nuclear Energy Safety»]. URL: <http://nps.viti-mephi.ru> (in Russian).
- [15] Oficialʹnyʹj sayt nauchno-prakticheskogo zhurnala «Globalʹnaya yadernaya bezopasnostʹ» [Official website of the scientific and practical journal «Global nuclear safety»]. URL: <http://gns.mephi.ru/ru> (in Russian).

Synchronization of Industrial Higher Education Institution Objectives with Strategy of «Rosatom» State Corporation Development as Nuclear Energy Safety Factor

V.A. Rudenko¹, M.V. Golovko², S.A. Tomilin³, O.F. Tsuverkalova⁴

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

¹ORCID iD: 0000-0002-6698-5469

WoS Researcher ID: B-7730-2016

e-mail: VARudenko@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0002-4835-9800

WoS Researcher ID: J-2461-2016

e-mail: MVGolovko@mephi.ru

³ ORCID iD: 0000-0001-8661-8386

Wos Researcher ID: G-3465-2017

e-mail: SATomilin@mephi.ru

⁴ ORCID iD: 0000-0001-6304-4498

WoS Researcher ID: J-8183-2016

e-mail: oftsuverkalova@mephi.ru

Abstract – The article considers the issues of the need to synchronize the objectives of industrial universities with the strategies of enterprises which are industrial partners. The strategically significant and mutually beneficial cooperation of enterprises and educational organizations is justified. The role of the supporting universities of the “Rosatom” State Corporation and their regional branches in the areas where nuclear power facilities are located in the formation of a high level of safety culture among future employees of nuclear plants in Russia and abroad is determined. The paper proposes the events for implementation in accordance with the development directions of “Rosenergoatom Concern” JSC.

Keywords: “Rosatom” State Corporation, VETI NRNU MEPhI, “Rosenergoatom Concern” JSC, safety, development strategy, university, personnel training.

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

УДК 621.039:005.932

**ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ПСР И
ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ БЕРЕЖЛИВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ НА СОЦИАЛЬНУЮ СФЕРУ**

© 2020 И.А. Ухалина, С.П. Агапова, Н.А. Ефименко

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

Целью данного исследования является оценка результатов системного развертывания Производственной системы «Росатома» по пяти основным направлениям и возможности переноса бережливых подходов и технологий, используемых на предприятиях ГК «Росатом», в организации социальной сферы. В процессе изучения заявленной проблемы использовались такие методы исследования как анализ и синтез, метод экономического моделирования. Для оценки возможности применения бережливых технологий в организациях социальной сферы был использован метод экстраполяции полученного положительного эффекта от применения бережливого производства на предприятиях ГК «Росатом» на учреждения здравоохранения. В статье приведена оценка результатов выполнения социального заказа атомных городов через реализацию программ социального партнерства по проекту «Бережливая поликлиника». На основе анализа результатов использования бережливых подходов в медучреждениях пилотных регионов и для повышения качества обслуживания населения предлагается внедрение бережливых технологий в различные предприятия непромышленной сферы. В работе сделан вывод о том, что в результате партнерской работы эффективных Производственных систем и предприятий социальной сферы можно сделать удобными и комфортными не только поликлиники, стационары, но и целые города.

Ключевые слова: бережливое производство, производственная система «Росатома» (ПСР), бережливые технологии, социальное партнерство, «Бережливая поликлиника».

Поступила в редакцию 06.12.2019
После доработки 27.12.2019
Принята к публикации 10.01.2020

Бережливое производство (БП) в современных условиях признано наиболее эффективной системой производственных отношений, нацеленной на повышение конкурентоспособности предприятий, удержания позиций на рынке и завоевания его новых сегментов, посредством непрерывных усовершенствований процессов, устранения всех видов потерь и признания приоритетности запросов клиентов. Актуальность и необходимость внедрения бережливых технологий на российских предприятиях отмечается многими авторами [1-6].

ГК «Росатом» не является первой компанией, в РФ начавшей внедрять на своих предприятиях бережливые технологии. Начало бережливому движению в госкорпорации было положено в 2008 г., хотя в нашей стране уже был опыт применения бережливых инструментов на предприятиях автопрома: ГАЗ с 2003-2004 гг., КАМАЗ с 2006 года. Предприятиям автомобильной промышленности было легче применить опыт Тойоты в бережливых подходах к производству, все бережливые инструменты могли быть вовлечены в производственные процессы практически без

существенных корректировок. Однако и другие отрасли промышленности нашли возможным и необходимым встраивать в производственные процессы элементы бережливых технологий, постепенно перестраивая свои производственные системы, переводя их на бережливые рельсы. Опыт внедрения Бережливого производства на Новочеркасском электровозостроительном заводе (НЭВЗ) показал, что там была разработана своя производственная система А.С. Родова «План-Поток-Ритм», которая в первую очередь ориентирована на творческое поведение людей на основе особенной промышленной культуры, способствующей проявлению инициатив [1].

ГК «Росатом», стремясь к мировому лидерству в области атомной энергетики, создал и постоянно совершенствует свою производственную систему ПСР. Производственная система «Росатома» нацелена на стратегические цели Госкорпорации, а отраслевые ПСР-проекты направлены на рост производительности, снижение себестоимости и повышение качества продукции. Знание и умение применять инструменты ПСР является обязательным условием для профессионального и карьерного роста сотрудников атомной отрасли.

Системное развертывание ПСР, посредством декомпозиции целей предприятия и каскадирования задач до уровня начальников участков, оптимизации производственных потоков, реализации ПСР-проектов началось в 2015 году. На десяти пилотных предприятиях госкорпорации были вовлечены в этот процесс все сотрудники через программы обучения философии бережливого производства и разработку программ мотивации персонала на поиск внутренних резервов для повышения эффективности производственно-хозяйственных процессов. На оптимизацию потоков на предприятиях развертывания ПСР были направлены наибольшие усилия. Первыми достижениями внедрения БП стала существенная экономия ресурсов, снижение затрат на производство продукции, снижение уровня товарных запасов, сокращение длительности производственного цикла и сроков планово-предупредительных ремонтов.

К 2017 году в программе системного развертывания ПСР уже принимало участие 23 предприятия корпорации. Для получения статуса ПСР-предприятия, участникам необходимо было выполнить ряд целевых показателей-индикаторов развертывания ПСР. Индикаторы развертывания были установлены для трех уровней: Лидер ПСР, Кандидат ПСР, Резерв ПСР.

Наиболее высокий статус «Лидер ПСР» присваивается при выполнении следующих трех условий: достижение поставленных бизнес-целей, оценка качественных показателей развертывания ПСР в рамках развивающих партнерских проверок качества (РППК) и достижение определенного уровня вовлеченности персонала в ПСР. Мотивацией предприятий-лидеров ПСР стал пакет привилегий, которые включают в себя сертификаты на прохождения обучения в Корпоративной академии Росатом, предоставление возможности поездок работников на зарубежные и российские передовые предприятия с целью обмена опытом, приезды бизнес-тренера на предприятие, поощрение работников семейными путевками.

Среди предприятий 2017 г. развертывания лидерами ПСР стали ФГУП «ПО Маяк», АО «Хиагда», АО «ОКБ «Гидропресс». Из предприятий волны 2015-2016 гг. – ФГУП «Радон», АО «СХК», ФГУП «ПО «Старт», Ленинградская АЭС, филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгоград, АО «ПО ЭХЗ», ПАО «НЗХК», ПАО «МСЗ», Балаковская АЭС, АО «ОКБМ Африкантов», ПАО «КМЗ», АО «ЧМЗ», Смоленская АЭС, АО «УЭХК», первое место в рейтинге заняло АО «ЦКБМ». За вклад в развитие ПСР в 2017 году руководством госкорпорации были отмечены ФГУП «ГХК», ПАО «ЗИО-Подольск», ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор», ФГУП «НИИ НПО «Луч» и АО «ИРМ» [7]. В таблице 1 представлены предприятия ГК «Росатом», входящие в периметр системного развертывания ПСР в 2018 году [8].

Таблица 1 – Периметр предприятий системного развертывания ПСР в 2018 году [Perimeter of the RPS system deployment enterprises in 2018]

Год начала развертывания ПСР	ЛИДЕРЫ	КАНДИДАТЫ
2015 год	АО «ЦКБМ», АО «УЭХК», Смоленская АЭС, ПАО «КМЗ», АО «ОКБМ Африкантов», Балаковская АЭС, ПАО «МСЗ», ФГУП «ПО «Старт»	АО «ИРМ»
2016 год	ПАО «НЭХК», АО «ЧМЗ», АО «ПО ЭХЗ», Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск, Ленинградская АЭС, АО «СХК», ФГУП «Радон»	ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор», ФГУП «НИИ НПО «Луч»,
2017 год	АО «ОКБ «Гидропресс», АО «Хиагда», ФГУП «ПО Маяк»	ФГУП «ГХК», ПАО «ЗИО-Подольск»
2018 год	–	Курская АЭС, Кольская АЭС, АО «АЭХК», ФГУП «ПСЗ»

В основе комплексной оптимизации производства предприятий атомной отрасли лежат пять основных задач, пять стратегических направлений развития ПСР (рис. 5).



Рисунок 1 – Направления развертывания ПСР [RPS deployment directions]

Первое направление связано с сокращением сроков сооружения АЭС, которые в свою очередь зависят от повышения производительности труда на стадии проектирования АЭС, работы ПСР-специалистов в режиме МЧС и работы с ПСР-подрядчиками. Планируемый рост объемов строительства АЭС за рубежом постоянно требует от Госкорпорации «Росатом» повышения производительности труда не только на своих предприятиях, но и на предприятиях-поставщиках и подрядчиках Госкорпорации. Четыре компании, являющиеся основными подрядчиками Госкорпорации, вошли в «первую волну» развития ПСР-подрядчиков. ГК «Росатом» обязуется в рамках соглашения обеспечивать заказами ПСР-подрядчиков на основе принципа приоритетности, оперативно решать возникающие проблемы, оказывать бесплатную методологическую помощь при внедрении ПСР, обучении и повышение

квалификации сотрудников предприятий-подрядчиков. От подрядных организаций Госкорпорация, в свою очередь, ожидает повышение производительности труда с самого начала работ не менее чем на 30% от нормативного значения, сдачу ключевых объектов в срок, увеличение числа обученных ПСР и выполнение стандартов ПСР-инжиниринга. В рамках проекта Сотрудники филиала АО АСЭ, руководители и специалисты подрядных организаций «MEFA», «MILTASH» в Турецкой республике прошли обучение по программе ПСР-инжиниринга [9].

Второе направление развития ПСР связано с созданием на ПСР-предприятиях образцов культуры ПСР, на которых будет проводиться обучение не только работников предприятия, но и внешних специалистов.

Третье направление продвижения ПСР-культуры связано с вовлечением в бережливые процессы ключевых поставщиков, которые перенесут основные достижения ПСР на другие предприятия-поставщики через обучение ПСР-инструментам, и в частности применению инструмента JIT, поставки точно вовремя. Такая работа уже начата в 2017 г. на отраслевой площадке ПАО «КМЗ», где была проведена учеба руководителей двух крупнейших предприятий-поставщиков для атомной отрасли ООО «УЗОЛА» и ПАО «Русполимет» по федеральной программе повышения производительности труда. Эти нижегородские предприятия-поставщики Росатома, вошли в «первую волну» и теперь уже на своих производственных площадках будут проводить обучение методикам бережливых процессов руководителей и специалистов других поставщиков, вошедших во «вторую волну» ПСР-поставщиков.

В апреле 2018 г. началась работа с предприятиями-поставщиками Ростовской области, где в качестве пилотных площадок были отобраны предприятия-поставщики теплообменного и другого оборудования для атомной энергетики. В их состав вошли АО «Атоммашэкспорт», ООО «Атомспецсервис», ООО «Полесье» и АО «ВЗМЭО». Специалисты ПСР ГК «Росатом» запустили на этих предприятиях проекты по повышению производительности труда. В мае 2018 года к программе присоединились предприятия Санкт-Петербурга и Московской области. В Санкт-Петербурге в первую волну вошли два предприятия-поставщика – АО «Армалит» и АО «НПП «Компенсатор». В Московской области эксперты ПСР отобрали также два предприятия первой волны – ЗАО «Энергомаш (Чехов) – ЧЗЭМ» и ФГУП «ЭЗАН» [10]. Целью внедрения ПСР-технологий в условиях предприятий-поставщиков является рост производительности труда с коэффициентом не менее 1,2 и сокращение времени протекания процессов и запасов не менее чем в 2 раза. Результатом станут качественные и своевременные поставки оборудования и комплектующих для ГК «Росатом».

Четвертое направление должно быть отдано площадочному обучению ПСР-культуре с использованием ПСР-образцов.

И пятое направление – это выполнение социального заказа ФМБА и атомных городов, реализация программ социального партнерства. В 2017 г. было реализовано 43 проекта [11] создания «бережливых» поликлиник в атомных городах, в 2018 г. – уже 60 проектов.

Это направление разворачивания ПСР в первую очередь отражается на населении городов присутствия ГК «Росатом». Особая значимость внедрения БП-культуры и бережливых инструментов в организациях социальной сферы связана не с коммерческим, а с социальным эффектом, отражающим уровень удовлетворенности населения качеством оказываемых услуг.

Как и для любого предприятия непромышленной сферы, оказывающего услуги непромышленного характера, предприятия социальной сферы в центре своих

интересов должны ставить интересы клиента, пациента или другого пользователя услуг.

Производственные предприятия, активно внедряющие принципы бережливого производства, развивающие свои производственные lean-системы, не могут не нести социальную ответственность перед обществом. На сегодняшний день ГК «Росатом» стала ведущим концерном, распространяющим передовой опыт внедрения lean-технологий, lean-инструментов, lean-мышления на социальную сферу. Госкорпорация, на основе собственных достижений в области повышения эффективности производства, снижения потерь и роста удовлетворенности своих потребителей, направила свои усилия на улучшение качества жизни людей, через проекты распространения бережливых технологий в организации здравоохранения.

При поддержке и непосредственном участии ГК «Росатом» департаментом медицинского образования и кадровой политики в здравоохранении Министерства здравоохранения РФ в мае 2018 г. была организована и проведена «Школа лидеров бережливых технологий в здравоохранении». Для повышения реалистичности проведения «фабрики процессов» были выбраны актуальные сценарии из деятельности конкретных лечебно-профилактических заведений. По результатам аттестации «Школы» 26 человек из девяти медицинских вузов России получили удостоверение, дающее право на продвижение бережливых технологий в своем региональном сегменте [12].

Необходимость подготовки лидеров в продвижении бережливых технологий в здравоохранении стала очевидной, когда был проанализирован опыт реализации проекта ГК «Росатом» «Бережливая поликлиника» в пилотных регионах, в городах присутствия предприятий атомной отрасли. Одним из таких городов стал г. Волгодонск Ростовской области, город-спутник Ростовской АЭС. Инициативные группы подробно изучали потоки пациентов с целью их правильного распределения и возможности поликлинических отделений для максимальной оптимизации работы. Были разработаны ключевые задачи по внедрению бережливых технологий и определены пути их решения.

Таблица 2 – Сводный перечень ключевых задач по внедрению бережливых технологий и их решение [A consolidated list of key tasks for the implementation of lean technologies and their solution]

Наименование ключевых задач	Пути решения
Сокращение очереди в регистратуру для записи на прием к врачу и уменьшения времени ожидания при получении талонов.	1. Увеличить штат сотрудников регистратуры; 2. Перераспределение обязанностей мед. регистраторов; 3. Организация работы coll-центра; 4. Организация рабочих мест по системе 5с; 5. Подготовка сметной документации на проведение капремонта регистратуры; 6. Организация записи на повторный прием и консультацию к врачу с рабочего места врача.
Увеличение востребованности дистанционной записи (через интернет, инфомат и телефон).	1. Популяризация возможности записи через интернет (листочки-памятки) 2. Помощь администратора при записи через инфомат. 3. ТВ-репортаж о возможностях дистанционной записи 4. Подготовка информационного стенда о возможностях дистанционной записи
Повышение компетентности медицинских регистраторов: 1. при информировании пациентов по вопросам организации работы поликлиники 2. при возникновении конфликтных ситуаций	1. Разработка алгоритмов действия медицинских регистраторов в различных ситуациях. 2. Организация учебных тренингов с медрегистраторами.

Продолжение таблицы 2

Наименование ключевых задач	Пути решения
Сокращение времени при прохождении диспансеризации и профилактических осмотров.	1. Разработка маршрутного листа. 2. Подготовка информационного стенда по «Диспансеризации»
Сокращение времени ожидания в КДЛ при сдаче анализов.	1. Внедрение талонной системы для сдачи анализов крови в КДЛ. 2. Перераспределение потоков пациентов при сдаче анализа крови в КДЛ 3. Организация записи на лабораторные обследования с рабочего места врача через систему ЕГИСЗ
Сокращение времени при получении талонов на рентгенологическое обследование	Организация записи на рентгенологическое обследование в кабинете врача через систему РС ЕГИСЗ
Сокращение времени ожидания при получении талонов на УЗИ исследования и функциональные обследования	1. Анализ временных затрат при проведении различных видов обследований, контроль за количеством выданных талонов с учетом потребностей лечебных подразделений. 2. Организация записи на УЗИ и функциональные обследования в кабинете врача через систему РС ЕГИСЗ

Внедрение проекта «Бережливая поликлиника» превратился в общегородской и общеобластной проект. Специалисты со всей области и ПСР-служба Ростовской АЭС организовали обучение бережливым технологиям работников медучреждений г. Волгодонска. В поликлиниках создавались зоны комфортного ожидания, игровые зоны маленьким пациентам. Для оптимизации работы городских поликлиник, в условиях кадрового дефицита, рассматривалась возможность вариант слияния нескольких медучреждений в одно и создания объединенной «мегаполиклиники» на базе существующих поликлиник. Кадровый дефицит, по-прежнему, является одной из основных проблем медицины небольших городов РФ. Ощущается серьезный «провал» в укомплектованности медперсоналом возрастной группы 35-55 лет, которые в 90-е годы из-за нестабильности экономики были вынуждены искать средства к существованию в других коммерческих сферах деятельности. Несмотря на программы привлечения кадров в учреждения здравоохранения проблема пока не решена. Например, укомплектованность первичного звена медучреждений в г. Волгодонске составляет 57%. Последствиями имеющегося дефицита кадров являются очереди в поликлиниках. В объединении медучреждений есть одно несомненное преимущество – это гораздо более эффективное использование того небольшого кадрового потенциала, который на сегодняшний день есть в поликлиниках. Координация работы первичного звена под единым руководством позволит эффективнее использовать имеющийся кадровый ресурс и улучшит оказание медицинской помощи населению. Новое реорганизованное объединенное учреждение позволит решить сразу две задачи: первая – сделать равной помощь для всего населения города взрослого возраста, вторая – изыскать возможность для экономии средств, которые будут направлены на улучшение условий оказания медицинской помощи.

Анализ результатов внедрения бережливых инструментов и принципов ПСР в лечебно-профилактические учреждения показал, что бережливые подходы позволили выявить недостатки в работе медицинских организаций, требующие модернизации работы системы с целью оптимизации использования имеющихся ресурсов и повышения эффективности ее функционирования. Проект повышения производительности труда получил статус федерального, а значит, может транслироваться на всю страну с помощью подготовленных лидеров, несущих идеологию бережливых подходов в каждом секторе экономики.

Перед лидерами внедрения бережливых технологий ставиться задача, сформировать вокруг себя команды единомышленников, которые будут вовлекать в

бережливые процессы всех без исключения сотрудников организации. Коллективы медучреждений, поставившие задачу повышения производительности труда, получения максимального результата, будут стремиться к улучшению показателя удовлетворенности населения полученными медицинскими услугами, что приведет к увеличению пропускной способности поликлиник без снижения показателя качества оказания услуг, а значит, повысит отдачу от использования имеющихся ресурсов.

ГК «Росатом», начиная с 2017 г., осуществляет реализацию новых компетенций Производственной системы Росатом, которые позволили ПСР выйти за пределы отрасли и транслировать свои бережливые технологии на атомные города, поликлиники этих городов-спутников АЭС и по полному праву может быть признана общенациональной программой повышения производительности труда в РФ [11].

Госкорпорация первой обратила внимание на возможность переноса положительного опыта применения инструментов ПСР в социальной сфере, который позволит вывести на качественно новый уровень обслуживание пациентов. Однако принципы эффективного функционирования и других существующих производственных систем различных российских предприятий могут быть положены в основу создания Новых Производственных Систем России (НПСР), создания и развития социального партнерства бизнеса и общества. Возможности НПСР переведут на новый качественный уровень деятельность предприятий не только в производственной, но и непроизводственной сферах.

Целью внедрения успехов передовых производственных систем в непроизводственную сферу является сделать удобными и комфортными для населения России не только поликлиники, стационары, но и целые города по проекту «Бережливый муниципалитет», где реализовывались бы результаты партнерской работы эффективных Производственных систем и предприятий социальной сферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпова, Н. П. Российский путь бережливого производства / Н. П. Карпова // Экономика и современный менеджмент: теория и практика : сборник статей по материалам XLVI Международной научно-практической конференции № 2(46). – Новосибирск : СибАК, 2015.
2. Лыскова, И. Е. Модель бережливого производства как основа системы экологической и социальной безопасности современной организации (на примере Госкорпорации «Росатом») / И. Е. Лыскова // Безопасность ядерной энергетики: тезисы XV-й Научно-практической конференции. – Волгоград, 2019. – С. 117-119. – URL : <https://elibrary.ru/item.asp?id=39209882>.
3. Николаева, А. Б. Оценка эффективности внедрения бережливого производства на промышленных предприятиях / А. Б. Николаева // Вестник экономики, права и социологии. – 2016. – № 4. – С. 69-72.
4. Баранов, А. Бережливое производство и балансировка менеджмента / А. Баранов // Генеральный директор. Управление промышленным предприятием. – 2012. – № 9. – 48 с.
5. Ухалина, И. А. Ключевые показатели эффективности как инструмент экономической безопасности предприятий ГК «Росатом» / И. А. Ухалина, Н. А. Ефименко, С. П. Агапова // Глобальная ядерная безопасность. – 2017. – № 1(22). – С. 102-112.
6. Руденко, В. А. Опыт и перспективы подготовки lean-специалистов на основе эффективного взаимодействия вуза и предприятий ГК «Росатом» / В. А. Руденко, М. В. Головкин, И. А. Ухалина, С. П. Агапова, А. В. Анцибор, Н. А. Ефименко // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 1 (26). – С. 114-122.
7. По итогам 2017 года 18 предприятий получили статус «Лидер ПСР» // Производственная система Росатом: Официальный сайт. – URL : <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/100-po-itogam-2017-goda-18-predpriyatij-poluchili-status-lider-psr> (дата обращения: 12.11.2019).
8. ПСР-предприятия // Производственная система Росатом: Официальный сайт. – URL : <http://www.ps-rosatom.ru/deyatelnost/psr-predpriyatiya> (дата обращения: 12.11.2019).
9. Применение ПСР-инструментов позволило завершить работы по монтажу арматуры и устройству опалубки на строящемся энергоблоке №1 АЭС «Аккую» в срок // Производственная система Росатом: Официальный сайт. – URL : <http://www.ps->

- rosatom.ru/about/novosti/101-primenenie-psr-instrumentov-pozvolilo-zavershit-raboty-po-montazhu-armatury-i-ustrojstvu-opalubki-na-stroyashchemsya-energobloke-1-aes-akkuyu-v-srok (дата обращения: 12.11.2019).
10. Три субъекта РФ вошли в программу повышения производительности труда на предприятиях-поставщиках «Росатома» // Производственная система Росатом: Официальный сайт. – URL : <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/102-tri-sub-ekta-rf-voshli-v-programmu-povysheniya-proizvoditelnosti-truda-na-predpriyatiyakh-postavshchikakh-rosatoma> (дата обращения: 23.11.2019).
 11. Подведены итоги развертывания Производственной системы Росатома в 2017 году // Производственная система Росатом: Официальный сайт. – URL : <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/99-podvedeny-itogi-razvertyvaniya-proizvodstvennoj-sistemy-rosatoma-v-2017-godu> (дата обращения: 12.11.2019).
 12. Росатом помог подготовить лидеров бережливых технологий в здравоохранении // Производственная система Росатом : Официальный сайт. – URL : <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/103-rosatom-pomog-podgotovit-liderov-berezhlivykh-tehnologij-v-zdravookhranenii> (дата обращения: 12.11.2019).

REFERENCES

- [1] Karpova N.P. Rossiiskii put berezhlivogo proizvodstva [The Russian Way of Lean Production] // *Ekonomika i sovremennyyi menedzhment: teoriia i praktika: sbornik statej po materialam XLVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Economics and Modern Management: Theory and Practice: a Collection of Articles Based on Materials from the XLVI International Scientific and Practical Conference]. № 2(46). Novosibirsk. SibAK. 2015 (in Russian).
- [2] Lyskova I.E. Model berezhlivogo proizvodstva kak osnova sistemy ekologicheskoi i sotsialnoi bezopasnosti sovremennoi organizatsii (na primere Goskorporatsii «Rosatom») [Lean Manufacturing Model as the Basis of the Environmental and Social Security System of Modern Organization (on the example of the State Atomic Energy Corporation Rosatom)]. *Bezopasnost iadernoi energetiki: tezisy XV-i Nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Nuclear Safety: Abstracts of the XVth Scientific and Practical Conference.]. Volgogradsk, 2019. P. 117-119. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=39209882> (in Russian).
- [3] Nikolaeva A.B. Otsenka effektivnosti vnedreniya berezhlivogo proizvodstva na promyshlennyykh predpriyatiyakh [Evaluation of Lean Production Effectiveness in Industrial Enterprises]. *Vestnik ekonomiki, prava i sotsiologii* [Bulletin of Economics, Law and Sociology]. 2016. № 4. P. 69-72 (in Russian).
- [4] Baranov A. Berezhlivoe proizvodstvo i balansirovka menedzhmenta [Lean Manufacturing and Balancing Management]. General'nyj direktor. Upravlenie promyshlennym predpriyatiem [General manager. Industrial Management]. 2012. № 9. P. 48 (in Russian).
- [5] Ukhalina I.A., Efimenko N.A., Agapova S.P. Kliuchevye pokazateli effektivnosti kak instrument ekonomicheskoi bezopasnosti predpriatii GK «Rosatom» [Key Performance Indicators as an Instrument of Economic Security for Enterprises of Rosatom State Corporation]. *Globalnaia iadernaia bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2017. № 1(22). P. 102-112.
- [6] Rudenko V.A., Golovko M.V., Ukhalina I.A., Agapova S.P., Antsibor A.V., Efimenko N.A. Opyt i perspektivy podgotovki lean-spetsialistov na osnove effektivnogo vzaimodeystviia vuza i predpriatii GK «Rosatom» [Experience and Prospects of Training Lean Specialists on the Basis of Effective Interaction between the University and the Enterprises of Rosatom State Corporation]. *Globalnaia iadernaia bezopasnost* [Global Nuclear Safety]. 2018. № 1 (26). P. 114-122.
- [7] Po itogam 2017 goda 18 predpriatii poluchili status «Lider PSR» [Following the Results of 2017, 18 Enterprises Received the Status of “RPS Leader”]. *Proizvodstvennaia sistema Rosatom : Ofitsialnyi sait* [Rosatom production system: Official site]. URL: <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/100-po-itogam-2017-goda-18-predpriyatij-poluchili-status-lider-psr> (data obrashcheniia: 12.11.2019).
- [8] PSR-predpriatiia [RPS Enterprises]. *Proizvodstvennaia sistema Rosatom: Ofitsialnyi sait* [Rosatom production system: Official site]. URL: <http://www.ps-rosatom.ru/deyatelnost/psr-predpriatiya> (data obrashcheniia: 12.11.2019).
- [9] Primenenie PSR-instrumentov pozvolilo zavershit raboty po montazhu armatury i ustroystvu opalubki na stroiashchemsya energobloke №1 AES «Akkuiu» v srok [The Use of RPS Tools Allowed to Complete the Installation of Fittings and Formwork at the Power Unit No. 1 of Akkuyu NPP under Construction on Time]. *Proizvodstvennaia sistema Rosatom: Ofitsialnyi sait* [Rosatom production system: Official site]. URL: <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/101-primenenie-psr-instrumentov-pozvolilo-zavershit-raboty-po-montazhu-armatury-i-ustrojstvu-opalubki-na-stroyashchemsya-energobloke-1-aes-akkuyu-v-srok> (data obrashcheniia: 12.11.2019).

- [10] Tri subieekta RF voshli v programmu povysheniia proizvoditelnosti truda na predpriiatiakh-postavshchikakh «Rosatoma» [Three Constituent Entities of the Russian Federation are Included in the Program for Increasing Labor Productivity at the Suppliers of Rosatom]. Proizvodstvennaia sistema Rosatom: Ofitsialnyi sait [Rosatom production system: Official site]. URL: <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/102-tri-sub-ekta-rf-voshli-v-programmu-povysheniya-proizvoditelnosti-truda-na-predpriyatiakh-postavshchikakh-rosatoma> (data obrashcheniia: 23.11.2019).
- [11] Podvedeny itogi razvertyvaniia Proizvodstvennoi sistemy Rosatoma v 2017 godu [The Results of the Deployment of the Rosatom Production System in 2017 were Summed up.]. Proizvodstvennaia sistema Rosatom: Ofitsialnyi sait [Rosatom production system: Official site]. URL: <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/99-podvedeny-itogi-razvertyvaniya-proizvodstvennoj-sistemy-rosatoma-v-2017-godu> (data obrashcheniia: 12.11.2019).
- [12] Rosatom pomog podgotovit liderov berezhlivykh tekhnologii v zdravookhranenii [Rosatom Helped Train Leaders in Lean Healthcare Technologies]. Proizvodstvennaia sistema Rosatom: Ofitsialnyi sait [Rosatom production system: Official site]. URL: <http://www.ps-rosatom.ru/about/novosti/103-rosatom-pomog-podgotovit-liderov-berezhlivykh-tekhnologij-v-zdravookhranenii> (data obrashcheniia: 12.11.2019).

Evaluation of the Deployment Results of the Rosatom Production System and the Opportunity to Extrapolate Lean Technologies to the Social Sphere

I.A. Ukhalina¹, S.P. Agapova², N.A. Efimenko³

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

¹ORCID iD: 0000-0002-1928-7510

WoS Researcher ID: E-3153-2017

e-mail: uhalina@yandex.ru

²ORCID iD: 0000-0002-8484-2912

WoS Researcher ID: E-4842-2017

e-mail: svetlana-1164@mail.ru

³ORCID iD: 0000-0001-8113-6759

WoS Researcher ID: E-3439-2017

e-mail: NAEfimenko@mephi.ru

Abstract – The purpose of this study is to evaluate the results of the system deployment of the Rosatom Production System in five main areas and the possibility of transferring lean approaches and technologies used at Rosatom enterprises to the organization of the social sphere. In the process of studying the stated problem, such research methods as analysis and synthesis, the method of economic modeling are used. To assess the possibility of using lean technologies in social organizations, the method of extrapolating the resulting positive effect from the use of lean manufacturing at Rosatom enterprises to healthcare facilities is used. The article provides an assessment of the results of fulfilling the social order of nuclear cities through the implementation of social partnership programs for the Lean Polyclinic project. Based on the analysis of the results of using lean approaches in medical institutions in the pilot regions and to improve the quality of public services, it is proposed to introduce lean technologies in various non-manufacturing enterprises. The paper concludes that as a result of the partnership of effective Production systems and social enterprises, not only clinics, hospitals, but entire cities can be made convenient and comfortable.

Keywords: Lean manufacturing, Rosatom production system (RPS), lean technologies, social partnership, lean polyclinic.

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

УДК 378.4 : 316.65

**К ВОПРОСУ ОБ ИННОВАЦИОННОМ ПОТЕНЦИАЛЕ СТУДЕНТОВ
ОТРАСЛЕВЫХ ВУЗОВ – ПАРТНЕРОВ ГК «РОСАТОМ»**

© 2020 Н.И. Лобковская, А.В. Железнякова, А.Н. Недорубов

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

В статье представлено исследование уровня заинтересованности студентов ВИТИ НИЯУ МИФИ в развитии инновационного потенциала. Рассматривается формальная сторона вовлеченности молодежи в реализацию научно-исследовательских проектов и совершенствование интеллектуальных сил. Проведенный социологический опрос показал достаточно высокий уровень инновационного заряда студентов. Отмечены трудности использования инновационного ресурса, сформулированы возможные причины проблем самореализации в данном направлении. Обнаружено отсутствие устойчивой мотивации к раскрытию собственного инновационного потенциала, объясняющееся повышенной сложностью и трудоемкостью данного направления развития личности. Отмечена проблема формальной и неформальной занятости студентов, выявлены ее причины. Приводимые данные говорят о значимости развития научно-исследовательских навыков, и подтверждает мысль о том, что проблема неэффективного использования инновационного потенциала достаточно весома, охватывает значительную часть студенческой молодежи и требует дальнейшего изучения и системного мониторинга.

Ключевые слова: инновация, инновационный потенциал, инновационное развитие, научно-исследовательская деятельность, студенческая молодежь, мотивация, жизненные ориентиры, развитие, самореализация, социологический опрос.

Поступила в редакцию 09.12.2019

После доработки 23.12.2019

Принята к публикации 10.01.2020

Одной из интегральных характеристик лидерской позиции российской атомной энергетики является динамика развития инновационных процессов, протекающих в отрасли. Данный параметр имеет значение с точки зрения обеспечения восприятия и реализации новшеств, то есть получения инновации. Инновационный потенциал определяется совокупностью научно-исследовательских, технологических, инфраструктурных, финансовых, социокультурных, правовых возможностей, которые, в свою очередь, являются ключевыми позициями при разработке стратегических программ развития отрасли.

Стратегические направления Госкорпорации «Росатом» отражены в «Программе инновационного развития и технологической модернизации на период до 2030 года». Согласно данной Программе особую значимость приобретает задача реализации комплексных проектов по развитию инновационной инфраструктуры – экспериментальной базы, интеллектуальной собственности и активизации работы по взаимодействию с вузами в области подготовки кадров для атомной отрасли [1].

Таким образом, Госкорпорация «Росатом» создала консорциум опорных вузов и активно развивает сотрудничество с российскими научными центрами и высшими школами по реализации совместных инновационных проектов, имеющих важное практическое значение для отечественной атомной промышленности. В связи с этим

возникает необходимость поиска новых подходов и методов, которые позволили бы сделать эффективным образование студентов в области научно-исследовательской и инновационной деятельности в рамках их обучения в вузе и активной подготовке к профессиональной деятельности на предприятиях ГК «Росатом».

Научно-исследовательская деятельность студентов занимает особое место в образовательных программах российских вузов. Общеизвестно, что содержание данного направления инновационной деятельности помогает молодому поколению ощутить степень ответственности за конечный результат своей работы, заложить осознание необходимости и важности целерациональных усилий в формировании инновационных компетенций. Данный подход к образованию прямо ведет к ориентации не на учебник, а на принципиально иной способ мышления будущего специалиста, способного нестандартно, оригинально действовать и предлагать что-то уникальное.

Важной предпосылкой вовлечения молодёжи в инновационную деятельность является мотивация студентов к ней. Первым условием для достижения этой цели является возникновение интереса. Интерес к научной деятельности порождается интересом к преподавателю, его личности и его личностным позициям, или интересом к проблеме, грамотно сформулированной, что делает её решение посильной для начинающего исследователя.

Вторым условием становится достижение научно-исследовательской удачи, несмотря на то, что она достигнута при начальной помощи учебного пособия или научного руководителя. Этот успех «окрыляет» молодого исследователя и в дальнейшем он способен на решение более сложных комплексных задач. А неудачи, в содружестве с научным руководителем (вчерашним преподавателем), помогают воспринять реальность таковой, как она есть, и найти пути преодоления трудностей.

Третьим условием является изучение необходимой литературы, поиск в интернете, проведение экспериментов, моделирование ситуаций, при которых усваивается настолько большой объем информации, что всякая последующая деятельность становится узнаваемой. Студент выходит на более высокий уровень научного мышления, связанный уже с его личностным участием и осознанием, что он способен охватить большой материал и создать из него, что-то новое. Растет личностная оценка молодого человека и его авторитет среди окружающих, что немаловажно в сегодняшней среде, когда подростки стремятся выделиться из «толпы».

Наконец, четвертым условием научно-исследовательской работы следует считать написание собственных исследований на актуальные темы, так как научная работа требует грамотного оформления и доступных способов донесения её до слушателя в форме доклада, публикации научной статьи, презентации перед большой аудиторией, внедрения в практическое применение.

Таким образом, в контексте образовательных проблем считаем важным, при реализации курса дисциплин активное внедрение передовых методик и интерактивных технологий, представляющих собой моделирование инновационной деятельности будущего выпускника. Обращение к социологическому словарю показывает, что «инновация» – латинское «*innovatio*», английское и немецкое «*innovation*» – нововведение, процесс изменения, связанный с созданием, признанием или внедрением новых элементов/моделей материальной или нематериальной культур в определенной социальной системе [2]. Данный иностранный термин в настоящее время является одним из самых употребляемых, так как понимание необходимости перемен и перехода к инновационной модели развития приходит ко всё большему числу лидеров разных уровней и направлений. В основе новой экономики лежит инновационная активность людей. В России особое внимание обращено на интенсивное развитие инновационного потенциала молодежи.

В мае 2018 г. Президент РФ В.В. Путин подписал указ, определяющий национальные цели развития страны на шестилетний период, где главной задачей является рост благосостояния людей [3]. Еще раз об этом генеральном направлении Президент заявил на большой пресс-конференции 19 декабря 2019 года. Научно-технический рывок может обеспечить достижение поставленной цели. Кроме того, инновационное развитие как основа конкурентоспособности государства представляется прорывным в научно-техническом и технологическом плане [4]. Ставка в этом вопросе обоснованно делается на молодежь и ее возрастную энергию. Более того, анализ научной литературы и ситуации в экономике указывают на имеющийся инновационный заряд, а внимание власти и предлагаемые поддерживающие проекты свидетельствует о его стимулировании и поощрении на государственном уровне. Однако, проблема по-прежнему заключается в ментальной инертности и недостаточно эффективной реализации инновационного заряда [5].

Для рассмотрения и предметного анализа обозначенной тенденции в 2019 г. было принято решение начать исследование инновационного потенциала студентов Волгодонского инженерно-технического института – филиала – Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (далее – ВИТИ НИЯУ МИФИ) как части молодежного студенческого сообщества нашей страны. В рамках данного социологического проекта разработана анкета с подбором ранжированных ответов, позволяющая оценить уровень развития инновационного потенциала респондентов. Генеральная совокупность исследуемых составила 714 человек – это студенты очной формы обучения. В выборку включены студенты с 1 по 5 курс очной формы обучения в количестве 183 человек (около четверти генеральной совокупности). Репрезентативность обеспечена пропорциональным отбором респондентов по направлениям/специальностям и курсам.

Понятийная грамотность – знание терминов и умение их точно употреблять – инструмент компетентного специалиста и одно из главных требований к профессионалу, поскольку является фундаментом передачи знаний. Владение терминологией обеспечивает создание инновационного продукта, поэтому первые вопросы были связаны с пониманием таких терминов как «инновация» и «инновационный потенциал». Первое определение не вызвало никаких затруднений у абсолютного большинства молодых людей, тогда как второе оказалось менее прозрачным – только 67% студентов смогли дать более или менее точное определение. В среднем же, 80% опрошенных знакомы с данными понятиями и достаточно хорошо разбираются в их значении.

Для непрерывного развития государства и общества в целом необходимо постоянное стремление людей к самосовершенствованию и раскрытию своего инновационного потенциала. В целях изучения намерений студентов был задан вопрос о видах на инновационную деятельность после завершения обучения в институте (рис. 1).

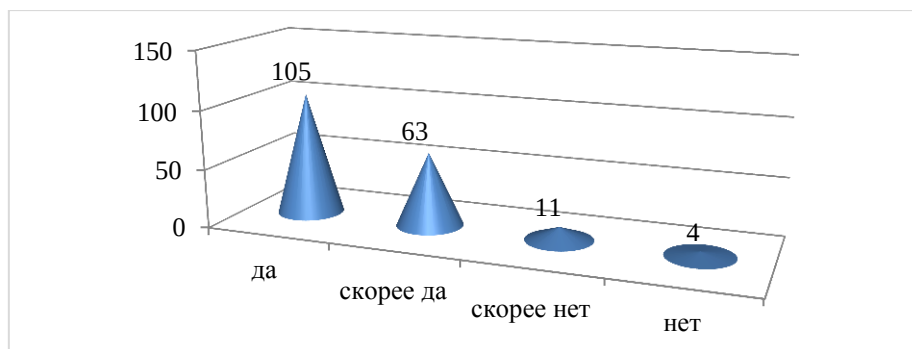


Рисунок 1 – Намерение студентов заниматься в будущем инновационной деятельностью; чел [The intention of students to do innovative activities in the future]

94% респондентов ответили утвердительно, что, как нам кажется, связано с пониманием специфики выбранной профессиональной деятельности – инженерное образование нацеливает на решение нестандартных изобретательских задач, а также карьерными амбициями. Молодые люди осознают, что новаторская деятельность поможет им раскрыть таланты, заявить о себе как о перспективном сотруднике, расширить границы возможного. Для всестороннего развития студентов институт предлагает множество мероприятий различной направленности. В связи с обозначенной специалистами проблемой неэффективного использования инновационного потенциала [5] был сформулирован следующий вопрос. Он помог определить, что же более интересно студентам и привлекает ли их инновационная деятельность в целом. Последняя привлекает 21% респондентов (еще 23% отдали предпочтение интеллектуально развивающим викторинам, дебатам, встречам, оставшаяся часть отдала предпочтение волонтерским, спортивным и культурно-массовым мероприятиям). На вытекающий из этого вопрос об участии в мероприятиях инновационного характера (научно-практические конференции, исследовательские проекты, научные задачи и т.д.) лишь седьмая часть опрошенных подтвердили, что участвуют в них постоянно, а 86% респондентов включаются в такую работу редко, из них треть (почти все – бакалавры) – вовсе ею не озадачиваются (рис. 2).

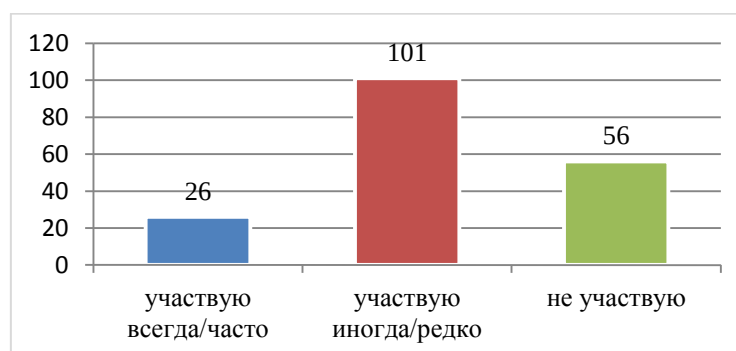


Рисунок 2 – Показатели участия в мероприятиях инновационного характера; чел. [Indicators of participation in innovative events]

По последнему пункту были заданы дополнительные вопросы, помогающие определить причины невысокого показателя участия. Одной из наиболее выраженных причин является незаинтересованность студента, что требует более подробного изучения, так как в предварительном опросе 94% студентов показали уверенность в связанности инновационной и научно-исследовательской деятельности (рис. 3)

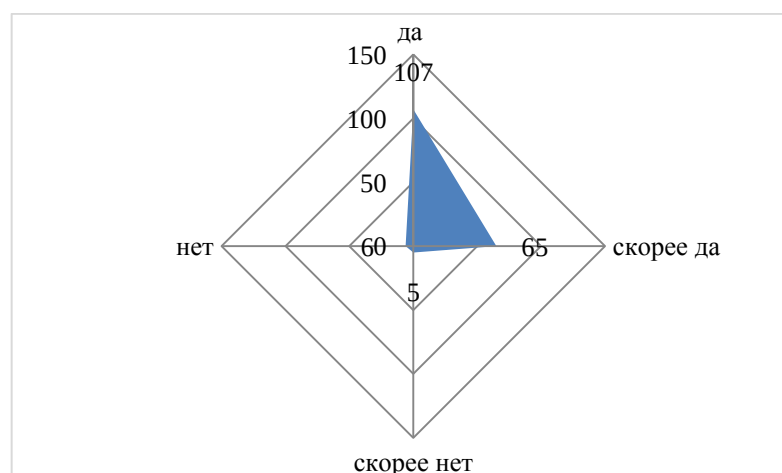


Рисунок 3 – Мнение студентов о связанности инновационной и научно-исследовательской деятельности; чел. [Students' opinion on the connectivity of innovation and research]

Более того, 82% опрошенных планируют карьеру руководителя, а 92% считают, что руководитель обязан обеспечить инновационное развитие предприятия. Можно сделать вывод, что на момент опроса желание студента стать руководителем является мнимым, так как реализовать подобные карьерные планы возможно только при четкой заинтересованности и глубокой вовлеченности в научно-исследовательскую работу, которая является содержательной частью инновационной деятельности.

Как считают специалисты, занимающиеся подобными исследованиями, внешней причиной часто оказывается отсутствие условий для научной работы, ограниченность предоставляемых образовательной организацией возможностей, «научно-исследовательская деятельность осуществляется преимущественно посредством таких сложившихся традиционных форм, как участие в научных конференциях, научная работа при кафедре, участие в предметных олимпиадах и прочее» [6]. В нашем случае явными «виновниками» неучастия в мероприятиях научно-исследовательского характера стали нехватка времени, отсутствие сформированного интереса (поверхностные представления о научно-исследовательской работе), недостаточность специальных знаний, большая трудоемкость без гарантированного результата и его низкая значимость (рис. 4).

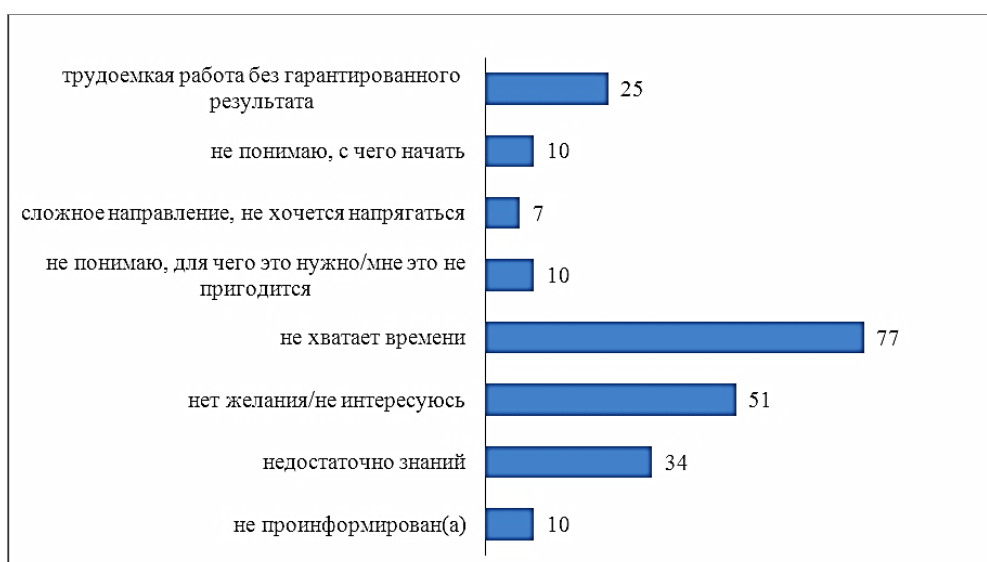


Рисунок 4 – Причины, по которым студенты не участвуют в мероприятиях научно-исследовательского и инновационного характера [Reasons why students do not participate in research and innovation activities]

Нехватка времени, по мнению студентов, связана с большой академической загруженностью (почти 50% студентов), а на подготовку к научно-практической конференции, например, требуется несколько месяцев напряженной работы, поэтому студенты выбирают другие, менее трудоемкие виды деятельности. Таким образом, эффективность продвижения к карьерным целям замедляется уже сейчас, на этапе получения профессионального образования.

В рамках самоанализа студентам было предложено оценить по традиционной 5-балльной шкале свое инновационное мышление. В среднем, инновационный потенциал опрошенных оказался на уровне 4-х баллов, что может свидетельствовать о высоком уровне притязаний творческо-интеллектуальных притязаний и говорит о конструктивном показателе уверенности в собственных силах. В дополнение к этому, 72% респондентов уверены, что не нуждаются в помощи при реализации инновационного потенциала. Одновременно студентам были предложены блиц-кейсы, решение которых позволило объективно оценить их инновационное мышление.

Показательно, что личная и кейсовая оценки совпали, а это свидетельствует о достаточно высоком уровне инновационного заряда, который, тем не менее, не используется в полной мере. Причиной данного феномена может являться текущая демотивация студентов, исходящая из внутренних побуждений и переживаний, вызывающих конфликт между ожидаемым результатом и боязнью неудачи. Незаинтересованность студентов обусловлена и тем, что жизненные ориентиры еще четко не определены и представление о будущем крайне туманно [7]. Молодежи необходимо получать удовлетворение от самого процесса инновационной деятельности, иметь желание находить и решать проблемы, но в силу занятости и незаинтересованности это осуществить достаточно сложно [8].

Институт как социальная организация полагает, что студент «в соответствии со своими ожиданиями должен получить возможность максимально развить свой потенциал и самоактуализироваться. Иными словами, способности, которыми студент обладает, должны быть выявлены и профессионально развиты» [9]. При анализе полученных данных мы исходили из предположения, что инновационные ориентации, запечатленные в сознании молодых людей и выявленные в процессе исследования, дают представление о мотивации к реализации в выбранной профессии и определяют установки на инновационную деятельность [10-12].

В целом, студенты ВИТИ НИЯУ МИФИ заинтересованы темой саморазвития, но только небольшая часть готова раскрывать инновационный потенциал, что объясняется трудоемкостью научно-исследовательской деятельности и высокой степенью ответственности за качество и результат. Они заявляют достаточно высокий уровень инновационного потенциала, понимают значимость и проблемность обнаруженного противоречия, но, в большинстве своём, не участвуют в мероприятиях научно-исследовательского характера. Они осознают связь между построением карьеры руководителя и инновационной деятельностью, знают, что инновации основываются на научных разработках.

В связи с этим в институте ведется работа по повышению эффективности формирования инновационной компетенции у студентов посредством реализации соответствующих мероприятий и проектов (табл. 2).

Таблица 1 – Мероприятия, направленные на формирование инновационной компетенции у студентов ВИТИ НИЯУ МИФИ [Events aimed at the formation of innovative competence among students of VETI NRNU MEPhI]

ВНЕШНИЕ	
1	Регулярное участие в Молодежном научно-инновационном конкурсе «У.М.Н.И.К.», проводимой в Ростовской области под эгидой Фонда содействия инновациям
2	Ежегодное участие студентов в масштабном проекте ГК «Росатом» и Академии Росатом – Турнире молодых профессионалов «ТеМП»
3	Участие в конференциях вузов-партнеров в Обнинске, Балаково, Таганроге, Новочеркасске, Ростове-на-Дону, Санкт-Петербург, Москва, Казань...
ВНУТРЕННИЕ	
4	Выполнение научно-исследовательских работ на кафедре в рамках существующих научно-практических школ под руководством наставников и преподавателей
5	Представление результатов на ежегодно проводимой научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая научная весна – 2020»
6	Защита научно-исследовательских проектов по стипендиальной программе В. Потанина.
7	Представление результатов научных исследований в рамках постерной сессии студенческих докладов на МНПК «Безопасность ядерной энергетики».

Перспективы роста подразумевают творческую и социальную мобильность – важный ресурс для успешного формирования и использования инновационного потенциала. Инновационный потенциал молодого поколения обуславливает

возможность адекватно отвечать на стремительные изменения информационных технологий и обеспечивает положительную динамику новой экономики. Таким образом, проблема неэффективного использования инновационного потенциала достаточно весома, захватывает значительную часть студенческой молодежи, обучающихся на первой ступени высшего образования (речь идет о бакалаврах), и требует дальнейшего изучения [13-16]. Цель в том, чтобы, не поддаваясь модным общественным трендам, укреплять фундаментальные опоры общественной солидарности и гражданской ответственности, чувство национального достоинства с продвижением идей стабильности и преемственности научных традиций нашей страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паспорт программы инновационного развития и технологической модернизации Госкорпорации «Росатом» на период до 2030 года (в гражданской части) [Электронный ресурс]. – Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». – Москва, 2016. – URL : <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/5e1/5e130b6e7fba0fb511f400defad83aca> (дата обращения: 23.11.2019).
2. *Социологический энциклопедический словарь*. На русском, английском, немецком, французском и чешском языках. Редактор-координатор – академик РАН Г.В. Осипов. – Москва: НОРМА, 2000. – 488 с. – URL : <http://politics.ellib.org.ua/encyclopedia-term-2709.html> (дата обращения: 25.11.2019).
3. Указ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 07.05.2018. – URL: <http://kremlin.ru/catalog/keywords/125/events> (дата обращения: 29.11.2019).
4. АНО «Корпоративная Академия Росатома». – URL : <http://rosatom-academy.ru/> (дата обращения: 29.11.2019).
5. Агабеков, С. И. Инновации в России: системно-институциональный анализ / С. И. Агабеков, Д. И. Кокурин, К. Н. Назин. – Москва : ТрансЛит, 2019 – 376 с.
6. Грасс, Т. П. Проблемы организации научно-исследовательской деятельности студентов как составляющей механизма формирования готовности к профессиональной мобильности / Т. П. Грасс, А. А. Алексейцева // Менеджмент социальных и экономических систем. – 2016. – №4-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-organizatsii-nauchno-issledovatel'skoy-deyatelnosti-studentov-kak-sostavlyayushchey-mehanizma-formirovaniya-gotovnosti-k> (дата обращения: 25.11.2019).
7. Балашов, В. В. Проблема мотивации научной деятельности студентов вуза / В. В. Балашов, А. В. Пацула, Р. В. Леньков, Е. А. Гайдукова // Социологические исследования. – 2016. – № 4. – С. 127-130.
8. Bailey T., Phillips L. The Influence of Motivation and Adaptation on Students' Subjective Well-being, Meaning in Life and Academic Performance // Higher Education Research & Development. 2016. Vol. 35. № 2. P. 201-216.
9. Андреев, А. Л. Исследование мотивации научной деятельности в университете как корпорации в рамках институционального подхода / А. Л. Андреев, И. М. Новохатько, А. С. Осипова // Социологическая наука и социальная практика. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 27-45.
10. Лобковская, Н. И. Профессиональное целеполагание как составляющая культуры безопасности будущего специалиста-атомщика / Н. И. Лобковская, Ю. А. Евдошкина // Современное образование. – 2017. – № 1. – С. 32-38. – URL : http://enotabene.ru/pp/article_22498.html (дата обращения: 14.11.2019).
11. Константиновский, Д. Л. Российская молодежь в формировании и использовании интеллектуального потенциала / Д. Л. Константиновский // Социологическая наука и социальная практика. – 2017. – Т. 5. – № 4. – С. 46-64.
12. Шапиева, А. В. Инновационный потенциал молодежи как фактор обеспечения экономического роста / А. В. Шапиева // Вестник забайкальского университета. – 2018. – № 7. – С. 139-144. – URL : <http://zabvestnik.com/wp-content/uploads/051118011151-Shapieva.pdf> (дата обращения: 25.11.2019)
13. Бортник, Б. И. Управление инновационным потенциалом студентов: проблемные аспекты / Б. И. Бортник, Н. Ю. Стожко, В. А. Чурсина // Вопросы управления. – 2015. – № 3(34) – С. 136-144. – URL : <http://vestnik.uapa.ru/ru/issue/2015/03/18/> (дата обращения: 29.11.2019)
14. Факторы и вектор стратегического развития вуза в контексте реализации инновационного потенциала региона / В. А. Руденко, С. П. Агапова, С. А. Томилини,

- И. А. Ухалина, О. Ф. Цуверкалова, М. В. Головкин, Н. А. Ефименко // Современное образование. – 2017. – № 1. – С. 19-31.
15. Rosa M. J., Teixeira P. Policy Reforms, Trojan Horses, and Imaginary Friends: The Role of External Stakeholders in Internal Quality Assurance Systems. *Higher Education Policy*. 2014. Vol. 27. No 2. P. 219-237.
 16. Симоньянц, Р. П. Проблемы инженерного образования и их решение с участием промышленности / Р. П. Симоньянц // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2014. – № 3. – URL : <http://technomag.bmstu.ru/index.html> (дата обращения 29.11.2019 г.)

REFERENCES

- [1] Pasport programmy` innovacionnogo razvitiya i texnologicheskoy modernizacii Goskorporacii «Rosatom» na period do 2030 goda (v grazhdanskoj chasti) [Passport of the Innovation Development and Technological Modernization Program of ROSATOM for the period until 2030 (in the civilian part)]. Gosudarstvennaya korporaciya po atomnoj e`nergii «Rosatom» [State Atomic Energy Corporation «Rosatom»]. Moskva [Moscow]. 2016. URL: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/5e1/5e130b6e7fba0fb511f400defad83aca> (access date: 23.11.2019) (in Russian).
- [2] Sociologicheskij e`nciklopedicheskij slovar`. Na russkom, anglijskom, nemeczkom, francuzskom i cheshskom yazy`kah [Sociological Encyclopedic Dictionary. In Russian, English, German, French and Czech]. Redaktor-koordinator – akademik RAN G.V. Osipov [Editor-coordinator - academician of the Russian Academy of Sciences G.V. Osipov]. Moskva [Moscow]: NORMA, 2000. 488 p. URL: <http://politics.ellib.org.ua/encyclopedia-term-2709.html> (access date: 25.11.2019) (in Russian).
- [3] Ukaz «O nacional`ny`x celyax i strategicheskix zadachax razvitiya Rossijskoj Federacii na period do 2024 goda» ot 07.05.2018 [Decree «On National Goals and Strategic Objectives of the Development of the Russian Federation for the period up to 2024. 07.05.2018]. URL: <http://kremlin.ru/catalog/keywords/125/events> (access date: 29.11.2019) (in Russian).
- [4] ANO «Korporativnaya Akademiya Rosatoma» [ANO «Corporate Academy of Rosatom»]. URL: <http://rosatom-academy.ru/> (access date: 29.11.2019) (in Russian).
- [5] Agabekov S.I., Kokurin D.I., Nazin K.N. Innovacii v Rossii: sistemno-institucional`ny`j analiz [Innovations in Russia: System-Institutional Analysis]. Moskva [Moscow]: TransLit, 2019. 376 p. (in Russian).
- [6] Grass T.P., Aleksejceva A.A. Problemy` organizacii nauchno-issledovatel`skoj deyatel`nosti studentov kak sostavlyayushhej mexanizma formirovaniya gotovnosti k professional`noj mobil`nosti [Problems of Organization of Research Activities of Students as a Component of the Mechanism of Formation of Readiness for Professional Mobility]. Menedzhment social`ny`x i e`konomicheskix system [Management of Social and Economic Systems]. 2016. №4-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-organizatsii-nauchno-issledovatel'skoy-deyatelnosti-studentov-kak-sostavlyayuschej-mehanizma-formirovaniya-gotovnosti-k> (access date: 25.11.2019) (in Russian).
- [7] Balashov V.V., Paczula A.V., Len`kov R.V., Gajdukova E.A. Problema motivacii nauchnoj deyatel`nosti studentov vuza [The Problem of Motivation of Scientific Activity of University students]. Sociologicheskie issledovaniya [Sociological Research]. 2016. № 4. P. 127-130 (in Russian).
- [8] Bailey T., Phillips L. The Influence of Motivation and Adaptation on Students' Subjective Well-being, Meaning in Life and Academic Performance. *Higher Education Research & Development*. 2016. Vol. 35. № 2. P. 201-216.
- [9] Andreev A.L., Novoxat`ko I.M., Osipova A.S. Issledovanie motivacii nauchnoj deyatel`nosti v universitete kak korporacii v ramkax institucional`nogo podxoda [Research of Motivation of Scientific Activity at the University as a Corporation within the Framework of an Institutional Approach]. Sociologicheskaya nauka i social'naya praktika [Sociological Science and Social Practice]. 2017. T. 5. № 4. P. 27-45 (in Russian).
- [10] 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 the Future Nuclear Specialist]. *Sovremennoe obrazovanie* [Modern education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (access date: 14.11.2019) (in Russian).
- [11] Konstantinovskij D.L. Rossijskaya molodyozh` v formirovanii i ispol`zovanii intellektual`nogo potentsiala [Russian Youth in the Formation and Use of Intellectual Potential]. *Sociologicheskaya*

- nauka i social'naya praktika [Sociological Science and Social Practice]. 2017. T. 5. № 4. P. 46-64 (in Russian).
- [12] Shapieva A.V. Innovacionny`j potencial molodezhi kak faktor obespecheniya e`konomicheskogo rosta [The Innovative Potential of Youth as a Factor in Ensuring Economic Growth]. Vestnik zabajkal'skogo universiteta [Bulletin of the Transbaikal University]. 2018. №7. P. 139-144. URL: <http://zabvestnik.com/wp-content/uploads/051118011151-Shapieva.pdf> (access date: 25.11.2019) (in Russian).
- [13] Bortnik B.I., Stozhko N.Yu., Chursina V.A. Bortnik B.I. Upravlenie innovacionny`m potencialom studentov: problemny`e aspekty` [Management of Innovative Potential of Students: Problematic Aspects]. Voprosy` upravleniya [Questions of Management]. 2015. №3(34). P. 136-144. URL: <http://vestnik.uapa.ru/ru/issue/2015/03/18/> (access date: 29.11.2019) (in Russian).
- [14] Rudenko V.A., Agapova S.P., Tomilin S.A., Ukhulina I.A., Tsuverkalova O.F., Golovko M.V., Efimenko N.A. Faktory` i vektor strategicheskogo razvitiya vuza v kontekste realizacii innovacionnogo potenciala regiona [Factors and Vector of University Strategic Development in the Context of the Region Innovative Potential Implementation]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. №1. P. 19-31 (in Russian).
- [15] Rosa M. J., Teixeira P. Policy Reforms, Trojan Horses, and Imaginary Friends: The Role of External Stakeholders in Internal Quality Assurance Systems. Higher Education Policy. 2014. Vol. 27. No 2. P. 219-237.
- [16] Simonyants R.P. Problemy` inzhenerного obrazovaniya i ix reshenie s uchastiem promy`shlennosti [Problems of engineering education and their solution with the participation of industry]. Nauka i obrazovanie: e`lektronnoe nauchno-texnicheskoe izdanie [Science and Education: Electronic Scientific and Technical Issue]. 2014. №3. URL: <http://technomag.bmstu.ru/index.html> (access date: 29.11.2019) (in Russian).

Issue of Innovative Potential of Students of Industrial Universities – «Rosatom» State Corporation Partners

N.I. Lobkovskaya¹, A.V. Zheleznyakova², A.N. Nedorubov³

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

¹ ORCID iD: 0000-0002-0297-5800

WoS Researcher ID: O-3879-2018

e-mail: NILobkovskaya@mephi.ru

² ORCID: 0000-0003-3511-2734

WoS Researcher ID: K-2597-2017

e-mail: AVZheleznyakova@mephi.ru

³ ORCID: 0000-0002-3413-7449

e-mail: batrakan@rambler.ru

Abstract – The paper presents a study of the student interest level at VETI NRNU MEPhI in the development of their own innovative potential. It considers the formal side of youth involvement in the implementation of research projects and the improvement of their own intellectual forces. A sociological survey showed a fairly high level of students' innovative charge noted the difficulties of using an innovative resource, and formulated possible causes of problems of self-realization in this direction. It is found that most of the young people surveyed do not have a steady motivation to reveal their own innovative potential explaining this by increased complexity and laboriousness. The problem of formal and informal employment of students is noted, its causes are revealed. The given data indicate the importance of the development of scientific research skills and confirms the idea that the problem of inefficient use of innovative potential is quite significant, covers a significant part of students and requires further study and system monitoring.

Keywords: innovation, innovative potential, innovative development, research, students, motivation, life guidelines, development, self-realization, sociological survey.

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

УДК 378:[51:004]:621.039

**ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБУЧЕНИЯ В
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ,
ОРИЕНТИРОВАННЫХ НА РАБОТУ В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

© 2020 Василенко Н.П., Чабанова Н.И.

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

Представлена разработанная и апробированная авторами технология электронного обучения студентов в вузе. Приведены практические примеры по организации образовательного процесса в соответствии с данной технологией в математической подготовке студентов. Показана значимость данного подхода для математической подготовки студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли в связи с цифровизацией всех процессов в отрасли. Результативность применения данной технологии в учебном процессе подтверждена исследованиями по уровню подготовки студентов по математике, их удовлетворенностью организацией образовательного процесса и динамике математического интеллекта студентов.

Ключевые слова: электронное обучение, математическая подготовка, кадры атомной отрасли, технология обучения.

Поступила в редакцию 14.10.2019

После доработки 23.12.2019

Принята к публикации 11.01.2020

Амбиционные программы АО «Концерн «Росэнергоатом», как отмечает первый заместитель генерального директора Д. Ткебучава, всегда реализовывались силами нескольких поколений, поэтому важнейшим приоритетом в кадровой работе Концерна является «грамотная, выверенная молодежная политика», следовательно, большое внимание уделяется профориентационной работе и подготовке будущих специалистов в вузах. Особое значение этому придается в настоящее время, когда «Росатом в целом и Концерн интегрированы в общенациональную задачу по созданию цифровой экономики, и новые навыки настройки, программирования, обслуживания новых устройств и технологий лягут на плечи следующих поколений, и готовиться можно и нужно уже сегодня». Кроме того, как он отмечает, «важное новое явление, которое пришло в нашу жизнь и напрямую связано с новыми навыками нашего поколения, – это инструменты дистанционного обучения» [1].

Начальник отдела оценки и развития персонала АО «Концерн Росэнергоатом» Р. Михайлов отмечает важность инновации в деятельности по развитию персонала – запуск мобильного приложения «Рекорд Мобайл» для обучения сотрудников, которое «предоставляет широкие возможности для работника: в любое время и в любом месте, можно проходить обучение через мобильное устройство с планшета или смартфона» [2].

Ответом на новые тенденции в отрасли является «совместная разработка требований к выпускникам и участие экспертов Госкорпорации в образовательном процессе и контроле качества выпускников», как отмечает проректор по учебно-

методической работе НИЯУ МИФИ Е. Весна, что и определяет основные направления развития НИЯУ МИФИ и его филиалов в подготовке специалистов для атомной отрасли [3].

И действительно, в настоящее время много профессиональных конкурсов для инженеров проводится онлайн, в различных онлайн-программах или очно, со знанием и умением работать в данных программах. Так, по направлению «Цифровой атом» студенческой лиги VIII Международного инженерного чемпионата «CASE-IN» проводится международная система соревнований по решению инженерных кейсов, посвященных реальным производственным проблемам и разработанным по материалам отраслевых предприятий, для студентов и молодых специалистов топливно-энергетического комплекса [4].

Кроме того, в настоящее время созданы и функционируют международные научно-методические центры для распространения лучших практик подготовки продвинутых кадров цифровой экономики в области математики, информатики и технологий. В рамках работы данных центров, проводятся интенсивы команды разработчиков образовательных программ «Востребованные компетенции инженера. Вызовы цифровизации».

Чему учить и как учить студентов в современном мире – основной вопрос, по которому пытаются дать рекомендации ученые всех направлений, педагоги, политики. Так, Т. Черниговская, известный ученый в области нейронауки и психолингвистики, высказывает свое мнение о том, «так ли мы учим детей, и зачем учить то, что за всю свою жизнь может никогда не повстречаться, а если встретится, то пальцем ткну и скажу: «О'к, Гугл!» [5].

Среди 10 самых востребованных компетенций будущего выделяют [5]:

- умение решать сложные задачи, потребность в обладателях такой компетенции возрастет на 52%;
- критическое мышление, отмечая, что данная компетенция входит в число ключевых и в прогнозах на 10-15 лет, так как практически любую информацию можно найти в свободном доступе, но «чтобы понять, что в этом потоке является действительно ценным и внушающим доверия, необходимы навыки отбора»;
- креативность, как способность найти нестандартный подход, именно это умение станет необходимым из-за усложнения процессов в целом и цениться будут люди, способные «выдать» то, чего не знает поисковик.

Все перечисленное выше заставляет вузы искать более продуктивные для современного студента методы и формы обучения. Цифровые технологии в вузах стали основой для перераспределения учебного времени учебных занятий в пользу «реальной практической и проектной деятельности студентов-очников, глубоко ориентированной в учебный процесс» [6].

Все эти изменения касаются всей педагогической науки и практики. Так, еще более 10 лет назад мы уже рассматривали вопросы электронной педагогики и электронного рабочего места студента [7]. В настоящее же время уже говорим о «ПАДагогическом колесе» (педагогическое колесо), которое представляет собой «отличный инструмент для планирования образовательной деятельности, соединивший в себе необходимые качества выпускника 21 века, таксономию Блума и современные информационные технологии». Именно эта технология рассматривается как «способ взглянуть на образование цифрового века, который соединяет возможности мобильных приложений, трансформацию обучения, мотивацию, развитие познавательных навыков и перспективные цели образования» [8].

Соединение этих технологий и позволило нам разработать и апробировать в течение 4 лет актуальную (как видно из всего вышесказанного) технологию

электронного обучения в математической подготовке студентов, ориентированных на работу в атомной отрасли. Так как «чтобы оставаться конкурентоспособным, необходимо выработать «цифровой образ мышления» и постоянно меняться для решения новых задач» [9].

Одной из результативных форм данной технологии является личный электронный учебный кабинет студента, который открыт на сайте Научно-исследовательского института качества образования (i-exam.ru). Работа в личном кабинете ведется студентами на протяжении всего периода обучения: входной контроль – диагностическое тестирование по математике; диагностическое тестирование готовности к обучению; тренажеры по всем математическим дисциплинам с медиа-лекциями по темам различных разделов математики; интернет-экзамены по итогам семестра, интернет-экзамен по итогам второго курса по математике, как дисциплине, относящейся к базовой части программы бакалавриата по направлениям; участие в математических олимпиадах.

Результаты учебной работы студента в личном кабинете по всем видам (перечисленным выше) накапливаются за весь период обучения, образуя электронное учебное портфолио студента, доступ к которому имеется из любой точки, где есть доступ к интернету и с любого устройства: компьютера, планшета, смартфона.

С системой электронного обучения математике в вузе студенты знакомятся еще до начала занятий, на подготовительном модуле, который проводится в августе: знакомятся с правилами и возможностями работы в компьютерных классах вуза и с соответствующими приложениями на смартфонах, получают пароли от личных кабинетов и электронных библиотек, знакомятся с работой сайта вуза и других образовательных порталов, с которыми вузом заключены договоры на ведение образовательной деятельности.

Диагностическое тестирование по математике проводится до начала изучения математики и рассматривается как входной контроль. Данная диагностика уровня знаний, позволяет определить реальный уровень обязательной подготовки студентов-первокурсников по программе математики школьного курса и выявить «проблемные» разделы учебной программы, которым следует уделить больше внимания на занятиях с конкретной группой. На основе полученных результатов диагностического тестирования студентов первого курса по математике институт получает информационно-аналитические материалы по каждой группе в формах, удобных для принятия организационных и методических решений [10].

По форме и положению гистограммы (рис. 1) можно наглядно оценить характер распределения результатов тестирования, учитывать расслоение студентов по уровню подготовки в группе и по группам.

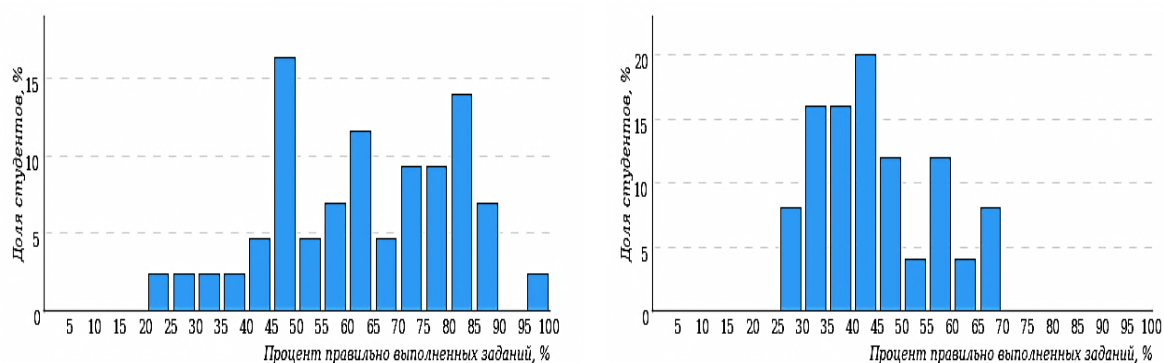


Рисунок 1 – Гистограмма плотности распределения результатов тестирования групп №1 и №2 [The histogram of the distribution density of the test results of groups No. 1 and No. 2]

Карта коэффициентов решаемости заданий в каждой группе дает возможность выявить отдельные темы математики, освоенные первокурсниками на низком уровне, и оперативно устранить пробелы в знаниях, умениях и навыках, что весьма целесообразно для успешного освоения дисциплины «Математика» в вузе.

Например, для группы № 3 карта коэффициентов решаемости заданий показывает, что студенты данной выборки на невысоком уровне выполнили задания по 5 темам, а на низком уровне выполнили задания лишь по теме №14 «Область определения функции», но данная тема очень важна при изучении тем математического анализа. А по группе №4 совсем иной результат: карта коэффициентов решаемости заданий показывает, что студенты данной выборки на невысоком уровне выполнили задания по 2 темам, на низком уровне выполнили задания по 9 темам (рис. 2).

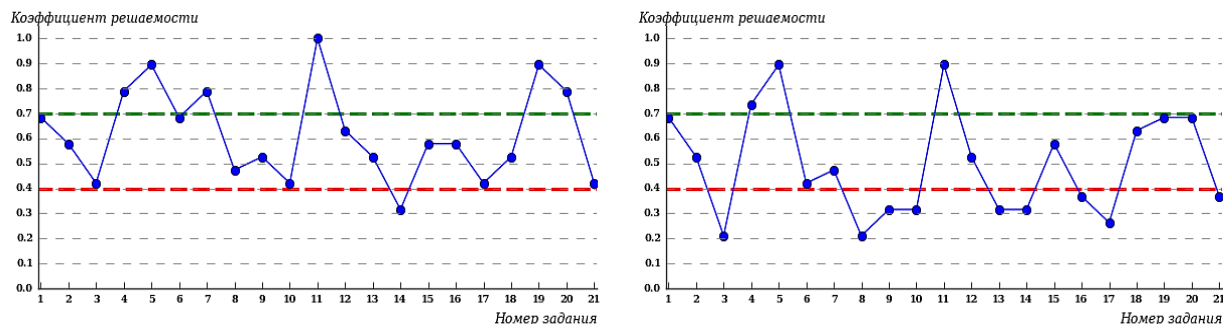


Рисунок 2 – Карта коэффициентов решаемости заданий групп №3 и №4 [Map of solvability coefficients for assignments of groups No. 3 and No. 4]

Кроме того, сравнительная карта коэффициентов решаемости заданий, которая проводится ежегодно за каждые последние три года, позволяет выделить общие для всей выборки студентов темы низкого уровня усвоения, обратить на них внимание школьных педагогов, студентов во время занятий подготовительного модуля, педагогов кафедры для планирования форм и содержания в изучении программного материала по математическим дисциплинам (см. рис. 3).

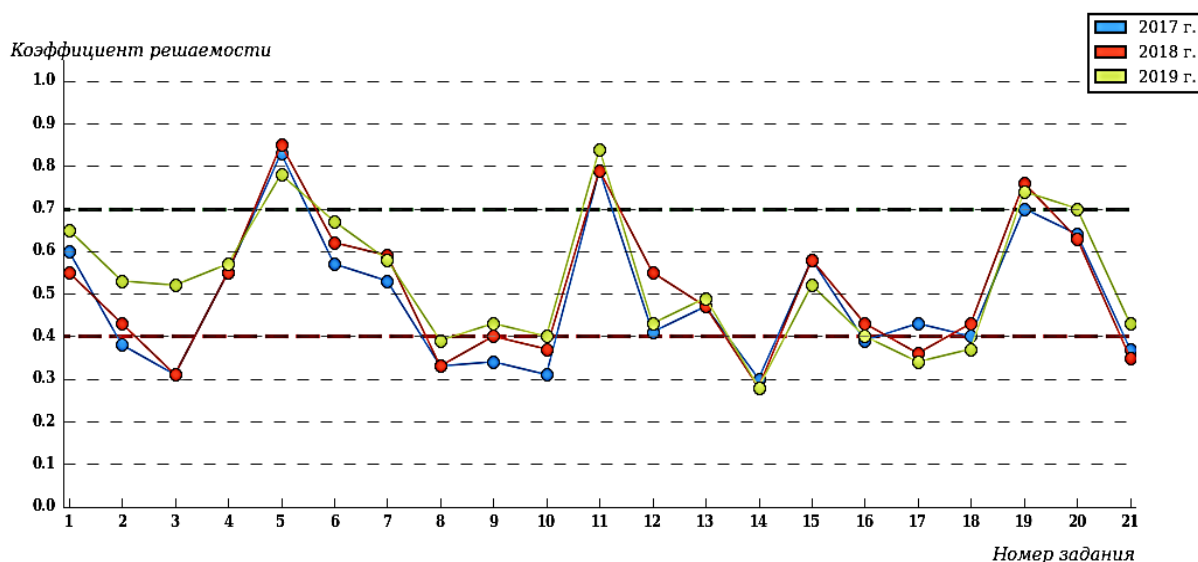


Рисунок 3 – сравнительная карта коэффициентов решаемости заданий [Comparison chart of solvability factors]

Рейтинг-листы в виде списков студентов, упорядоченных по проценту правильно выполненных заданий педагогических измерителей по математике, позволяют

преподавателям кафедры рекомендовать студентам занятия в группах олимпиадного движения или в группах дополнительных занятий на повышение уровня подготовки (табл. 1).

Таблица 1 – Рейтинг-листы групп [Group Rating Lists]

№ п/п	ФИО студента	Кол-во выполненных заданий	Кол-во правильно выполненных заданий	Процент правильно выполненных заданий	Начальная рекомендуемая группа
1	Ф.И.О	21 из 21	21	100%	олимпиады
...	...	...	...	...	...
15	Ф.И.О	21 из 21	14	66%	по желанию
...	...	...	...	...	...
25	Ф.И.О	21 из 21	7	33%	дополнительных занятий

Входным контролем к математике можно считать и результаты Диагностики готовности первокурсников к продолжению обучения в вузе, которая предполагает изучение психологических особенностей студента как субъекта учебно-профессиональной деятельности и включает диагностику когнитивного компонента с помощью теста интеллекта (вербальный, математический и пространственный интеллект). В результате чего, мы видим уровень развития математического интеллекта по каждой группе первокурсников. Повторное, аналогичное тестирование, которое проводится ежегодно еще и на третьем курсе, позволяет анализировать динамику уровня развития математического интеллекта студентов, который включает комплекс интеллектуальных способностей, связанных с количественным моделированием явлений, основанным на оперировании математическими символами и числами по каждой учебной группе (рис. 4).

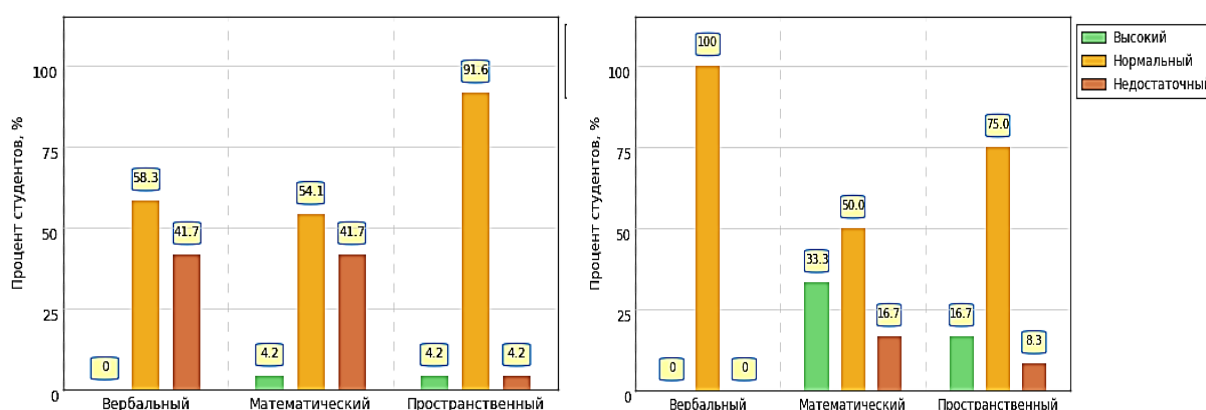


Рисунок 4 – Сравнительные диаграмма уровня развития интеллекта групп 1 и 3 курсов [Comparative diagram of the level of development of intelligence of groups 1 and 3 courses]

Кроме того, индивидуальные характеристики уровня развития математического интеллекта по конкретным индикаторам: уровень развития способностей к математическому анализу, синтезу, абстракции, обобщению, к установлению логических умозаключений; ориентация в условии задачи (способность выделять различные элементы в ее структуре, давать им различную оценку, систематизировать, определять их иерархию, объединять элементы в комплексы, находить математические отношения и функциональные зависимости между ними); уровень развития операции сравнения, аналитико-синтетических математических способностей позволяют

преподавателям выбирать необходимые задания для внеаудиторных, конкурсных мероприятий, способствующие развитию математического интеллекта студентов.

Следующим значимым элементом в системе электронного обучения в вузе являются онлайн-тренажеры по всем математическим дисциплинам, представленные в личном кабинете студентов. Система «Интернет-тренажеры в сфере образования» представляет собой программный комплекс, предназначенный для подготовки к процедурам внутренней и внешней независимой оценки качества образования, в основу которого положена целенаправленная тренировка обучающихся в процессе многократного решения тестовых заданий в рамках образовательного процесса в вузе.

Интернет-тренажеры предусматривают проведение тестирования студентов, обучающихся по образовательным программам, реализуемым в рамках ФГОС. При этом различными категориями пользователей предусмотрено использование различных режимов тестирования: обучение и самоконтроль. Кроме того, в систему интернет-тренажеров включены медиа-лекции по темам.

Данный ресурс позволяет педагогам кафедры, в рамках рассматриваемой технологии, разрабатывать различные мини-технологии по его использованию на лекциях, практических занятиях, смешанных занятиях, в организации самостоятельной работы студентов.

Так медиа-лекции используются:

- в начале лекции, как обзор того, что будет изучено на занятии;
- в конце лекции как обобщение изученного материала на занятии;
- в процессе лекции как демонстрация отдельных элементов занятия или практических примеров;
- в самостоятельной работе как повторение и подготовка к практическому занятию;
- в самостоятельной работе как подготовка к обсуждению материала на лекции, по технологии «перевернутый класс»;
- в самостоятельной работе студентов, пропустивших занятие.

Ресурс интернет-тренажеров так же является некой методической лабораторией преподавателя по подготовке и организации проведения занятий по математике. Использовать данный ресурс преподаватель может как в контактной работе со студентами во время проведения практических занятий в режимах обучения, самоконтроля и контроля знаний, так и в организации самостоятельной работы студентов.

Учитывая значимость внешней независимой оценки результатов обучения студентов в рамках требований ФГОС, особое значение уделяется участию вуза в проекте «Федеральный интернет-экзамен в сфере профессионального образования (ФЭПО)», который позволяет реализовать технологию внешнего оценивания результатов обучения математике в процессе освоения содержания программ обучения. Поэтапный анализ достижений обучающихся фокусирует внимание на результатах каждого отдельного студента (студентоцентрированная технология), что особенно важно при реализации компетентностного подхода, основанного на формировании и развитии компетенций [11].

Не менее значимым в данной технологии обучения математики является использование электронных ресурсов вуза. Такими ресурсами для наших студентов в обучении математике являются: образовательный ресурс НИЯУ МИФИ, образовательный ресурс ВИТИ НИЯУ МИФИ и образовательный ресурс кафедры математики.

Образовательный ресурс НИЯУ МИФИ (рис. 5) дает возможность изучения математических дисциплин дистанционно, представленных в открытых образовательных ресурсах НИЯУ МИФИ и на других образовательных платформах.



Рисунок 5 – Образовательный портал Нияу МИФИ [Educational portal of NRNU MEPhI]

Образовательный ресурс онлайн-обучения по математическим дисциплинам вуза представлен соответствующими онлайн-курсами, разработанными преподавателями кафедры математики. Технологии дистанционного обучения студентов ВИТИ Нияу МИФИ реализованы с помощью системы управления обучением (LMS) Moodle. Данная платформа развернута на собственном веб-сервере по адресу <http://online.viti-mephi.ru/> (рис. 6).

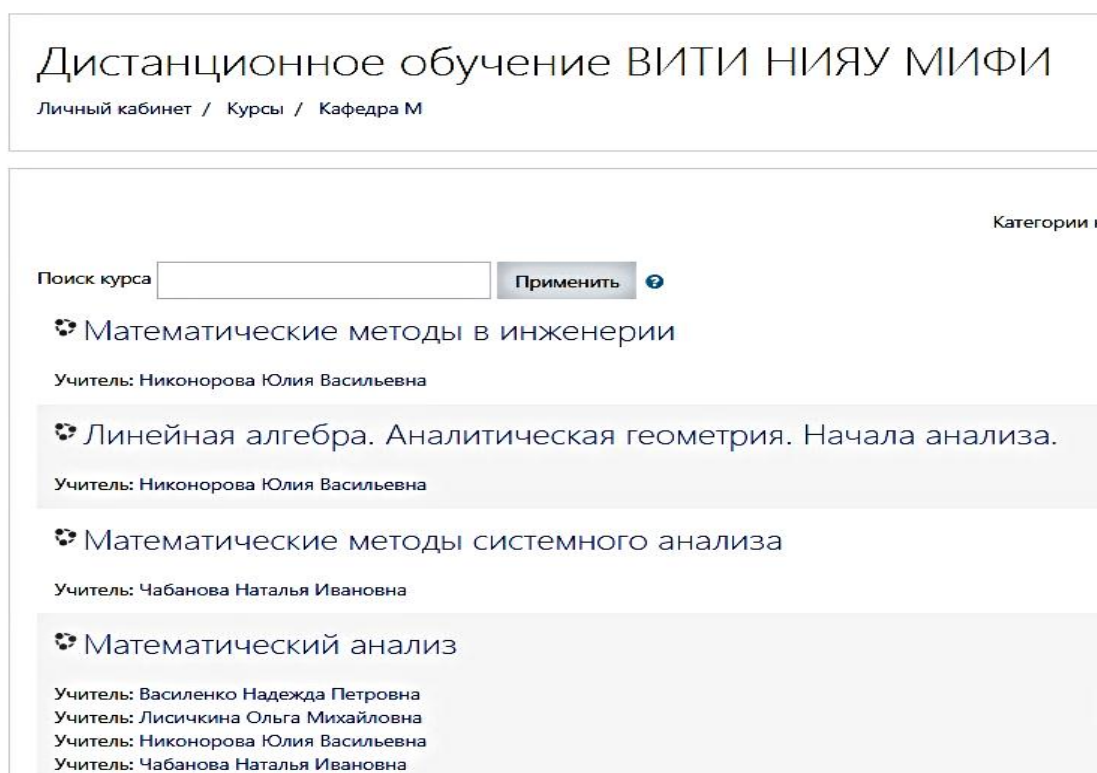


Рисунок 6 – Образовательный портал ВИТИ Нияу МИФИ [Educational portal of NRNU MEPhI]

Ранее авторами использовался такой ресурс как «авторское электронное учебное пособие» [12]. Но данная современная система управления обучением предполагает

использование средств не только предоставления знаний студентам, но и инструменты взаимодействия: чаты, анкетирование, опросы, форумы. Результаты выполнения заданий, интерактивных лекций с опросом могут быть оценены с использованием гибкой системы оценивания. Ведется журнал оценивания студентов группы каждой попытки ответа студента на задания различных типов, что является основой для рейтинговой системы в вузе. Задания в зависимости от дисциплины могут выдаваться в разной форме: тестирование, задание в виде файла. Ответ может быть оценен автоматически системой, например, для теста или опроса, а может быть оценен преподавателем по результатам проверки задания, прикрепленного в файле (чертеж, схема, контрольная или курсовая работа).

Важным элементом является система оповещения студентов (электронная почта, мобильное приложение), разработка графика изучения по каждой теме и выполнению заданий этой темы, что позволяет организовать активное онлайн-взаимодействие преподавателя со студентами группы.

Платформа LMS Moodle может быть органично интегрирована в кредитно-модульную систему образовательного процесса, так как позволяет представлять курс в виде наборов модулей, по каждому из которых вести учет рейтинга. Студент всегда информирован о своих результатах обучения, что также нацелено на повышение его заинтересованности в обучении, повышении его результативности.

Кроме того, на образовательном ресурсе кафедры размещены видео-занятия по практике решения типовых заданий по темам математических дисциплин.

Как уже отмечалось выше, в образовательном процессе в настоящее время, как при обучении студентов [7], так и работников атомной отрасли [2], широко используются приложения для смартфонов. Применение компьютерных технологий через приложения дает возможность преподавателю на любом этапе занятия моделировать различные ситуации, увеличить объём предлагаемого материала, повторять пройденный материал, обеспечить индивидуальный подход, в режиме онлайн провести контроль с моментальным получением результатов и их анализа.

Переход от традиционных форм контроля и оценивания знаний к тестированию вызывает споры и нарекания. Тестирование стало стандартным методом оценки знаний студентов, позволяющим выявить пробелы в текущей подготовке и сформировать индивидуальный темп обучения.

Проводить тестирование с помощью интернет сервисов легко и удобно. Онлайн-сервисы дают возможность за несколько минут самостоятельно создавать тесты и викторины в сети Интернет; проводить тестирование студентов в онлайн или офлайн режиме; опубликовать/пересылать ссылку на созданный тест или викторину студентам с помощью электронной почты, разместить на сайте, форуме, в блоге.

Перед обычным «бумажным» опросом у электронных форм есть главное преимущество – они позволяют сэкономить время на сборе, обработке данных и дают возможность обратиться к результатам опроса, когда вам необходимо.

В нашей технологии на занятиях используется сервис «Kahoot!» – это сравнительно новый сервис для создания викторин, тестов и опросов. Студенты могут отвечать на созданные преподавателем тесты с планшетов, ноутбуков, смартфонов, то есть с любого устройства, имеющего доступ к Интернету.

Применение данного электронного инструментария в процессе занятий по математике имеет свой алгоритм:

- 1) преподаватель на сайте сервиса создаёт тест с возможным использованием медиа файлов;
- 2) генерируется номер виртуальной комнаты;
- 3) студенты со своих мобильных устройств через приложение подключаются к виртуальной комнате по номеру;

- 4) преподаватель начинает тест, на экране проектора демонстрируется вопрос с ограничением времени ответа;
- 5) студенты на экранах своих устройств выбирают правильный ответ;
- 6) после каждого вопроса выводится на экран статистика по ответам на этот вопрос, а после всего теста – статистика по всему тесту и определяется рейтинг результатов ответов студентов.

Преподаватель использует сервис Kahoot не только как инструмент контроля, студентам предлагается самим создать тест по какой-либо пройденной теме или теме, запланированной на самостоятельное изучение. При составлении тестовых заданий студент, должен сам решить предложенные задачи и придумать неверные варианты ответов, продумав возможные ошибки при решении задания. Такая работа стимулирует познавательную активность студента и позволяет более осмысленно подходить к изучаемому материалу.

Особая роль применения данного инструментария в проведении входного и выходного контроля в процессе проведения занятия, позволяющих определить одномоментно уровень готовности студентов к занятию или уровень усвоения материала по итогам занятия.

Сервис Kahoot позволяет проводить опрос в форме соревнования между командами. Это способствует формированию коллективных форм взаимодействия студентов. Формируются навыки действенного общения, умения слушать мнения других участников команды, разрешать конфликтные ситуации, отстаивать свою точку зрения в принятии общего решения.

Данная технология, в постоянном своем совершенствовании, была ориентирована на современные тенденции, а области высоких технологий, которые изменяют методы обучения в вузе:

1. Цифровой класс, когда цифровое обучение разрушает границы традиционной аудитории, когда доступ к онлайн-информации трансформирует опыт обучения.
2. Глобальное онлайн-сотрудничество, когда обучающие онлайн-платформы соединяют аудитории по всей планете посредством видео-конференций, онлайн-чатов.
3. Рабочая сила будущего, когда необходимо ориентироваться на развитие навыков, соответствующих меняющемуся характеру рабочей силы и появлению новых отраслей.
4. Виртуальная и расширенная реальность, которые «революционируют опыт обучения, способствуют ускоренному обучению, удержанию знаний и совершенствованию процесса принятия решений».
5. «Большие данные», которые помогут определить, какие методы лучше всего работают для масс и для индивидуумов, ориентироваться на группы и индивидуальности для улучшения результатов образовательного процесса [13].

Продуктивность применения данной технологии электронного обучения математике подтверждается:

- 1) повышением качества обучения студентов, которое они демонстрируют в процессе экзаменационной сессии, в том числе и на интернет-экзаменах;
- 2) высокими оценками удовлетворенности образовательным процессом и качеством преподавания математических дисциплин в опросах «преподаватель глазами студентов»;
- 3) открытостью к изменениям и совершенствованию в соответствии с появлением новых электронных инструментов и современных методов обучения, новых тенденций в развитии образования, актуальных требований работодателей в соответствии с развитием атомной отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ткебучава, Д.* Здравствуй, племя молодое. Вопросы и задачи молодежного призыва / Д. Ткебучава // РЭА. – 2019. – № 11. – С. 4-7.
2. *Михайлов, Р.* Развитие: новые инструменты (развивающий смартфон) / Р. Михайлов // РЭА. – 2019. – № 11. – С. 20-23.
3. *Весна, Е.* Гарантировать подготовку специалистов / Е. Весна // РЭА. – 2019. – № 11. – С. 28-24.
4. Цифровой атом. – URL : <http://case-in.ru/league/16/>.
5. 10 самых востребованных компетенций будущего. Какие навыки развивать, чтобы не остаться без работы. – URL : <https://proforientator.ru/publications/articles/10-samykh-vostrebovannykh-kompetentsiy-budushchego.html>.
6. *Криштал, М. М.* От «лоскутной» автоматизации к цифровому университету/ М. М. Криштал // Аккредитация в образовании. – 2019. – № 6. – С. 56-59.
7. *Василенко, Н. П.* Информационная папка учебной дисциплины как направление внедрения информационно-коммуникационных технологий в учебный процесс вуза / Н. П. Василенко // Материалы научно-практической конференции «Современные информационные технологии: Южный Федеральный округ». – Ростов-на-Дону, 2006. – С. 71-73.
8. ПАДагогическое колесо (или педагогическое колесо) / Новые информационные технологии для тебя. – URL : <https://nitforyou.com/pedkoleso/>.
9. Может ли обучение изменить поведение. – URL : <https://sberbank-university.ru>.
10. Диагностика знаний студентов Волгодонского инженерно-технического института – филиала «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» / Информационно-аналитические материалы Научно-исследовательского института мониторинга качества образования. – Йошкар-Ола, 2019.
11. Проект «Федеральный интернет-экзамен в сфере профессионального образования (ФЭПО). – URL : <https://fepo.i-exam.ru/node/68>.
12. *Руденко, В. А.* Авторское электронное учебное пособие как современный информационно-образовательный ресурс – электронное «портфолио» учебной дисциплины / В. А. Руденко, Н. П. Василенко // Сборник научных трудов ХУ конференции «Телекоммуникации и новые информационные технологии в образовании». – Москва, 2011. – С. 156-157.
13. 5 трендов в области высоких технологий, которые изменят методы обучения // Аккредитация в образовании. – 2017. – №7. – С. 46-47.

REFERENCES

- [1] Tkebuchav D. Zdravstvuj, plemya molodoe. Voprosy`i zadachi molodezhnogo prizy`va [Hello, Young Tribe. Questions and Objectives of Youth]. RE`A [REA]. 2019. № 11. P. 4-7 (in Russian).
- [2] Mikhailov P. Razvitie: novy`e instrumenty` (razvivayushhij smartfon) [Development: New Tools (Developing Smartphone)]. RE`A [REA]. 2019. № 11. P. 20-23 (in Russian).
- [3] Vesna E. Garantirovat` podgotovku specialistov [Ensure Specialist Training]. РЭА [REA]. 2019. № 11. P. 28-24 (in Russian).
- [4] Cifrovoj atom [Digital Atom]. URL: <http://case-in.ru/league/16/> (in Russian).
- [5] 10 samy`x vostrebovanny`x kompetencij budushhego. Kakie navy`ki razvivat`, chtoby` ne ostat`sya bez raboty` [10 of the Most Sought-After Competencies of the Future. What Skills to Develop in Order not to be Left without Work]. URL: <https://proforientator.ru/publications/articles/10-samykh-vostrebovannykh-kompetentsiy-budushchego.html> (in Russian).
- [6] Krishtal M.M. Ot «loskutnoj» avtomatizacii k cifrovomu universitetu [From Patchwork Automation to Digital University]. Akkreditaciya v obrazovanii [Accreditation in Education]. 2019. № 6. P. 56-59 (in Russian).
- [7] Vasilenko N.P. Informacionnaya papka uchebnoj discipliny` kak napravlenie vnedreniya informacionno-kommunikacionny`x tehnologij v uchebny`j process vuza [The Information Folder of the Discipline as Direction for the Implementation of Information and Communication Technologies in the Educational Process of a University]. Materialy` nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremenny`e informacionny`e tehnologii: Yuzhny`j Federal`ny`j okrug» [Materials of Scientific-Practical Conference «Modern Information Technologies: Southern Federal District»]. Rostov-na-Donu [Rostov-on-Don], 2006. P. 71-73 (in Russian).
- [8] PADagogicheskoe koleso (ili pedagogicheskoe koleso). Novy`e informacionny`e tehnologii dlya tebya [PAD Pedagogical Wheel (or Pedagogical Wheel). New Information Technologies for You]. URL: <https://nitforyou.com/pedkoleso/> (in Russian).
- [9] Mozhet li obuchenie izmenit` povedenie [Can Learning Change Behavior?]. – URL: <https://sberbank-university.ru> (in Russian).
- [10] Diagnostika znanij studentov Volgodonskogo inzhenerno-texnicheskogo instituta – filiala

- «Nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI» [Diagnosis of Students' Knowledge of Volgodonsk Engineering Technical Institute, a branch of the National Research Nuclear University MEPHI]. Informacionno-analiticheskie materialy` Nauchno-issledovatel'skogo instituta monitoringa kachestva obrazovaniya [Information and Analytical Materials of the Research Institute for Monitoring the Quality of Education]. Yoshkar-Ola [Yoshkar-Ola]. 2019 (in Russian).
- [11] Proekt «Federal'nyj internet-e`kzamen v sfere professional'nogo obrazovaniya (FE`PO) [Project «Federal Internet Examination in the Field of Professional Education» (FEPO)]. URL: <https://fepo.i-exam.ru/node/68> (in Russian).
- [12] Rudenko V.A. Avtorskoe e`lektronnoe uchebnoe posobie kak sovremennyj informacionno-obrazovatel'nyj resurs – e`lektronnoe «portfolio» uchebnoj discipliny` [Author's Electronic Textbook as a Modern Educational Information Resource – an Electronic «Portfolio» of Academic Discipline]. Sbornik nauchnyx trudov XY konferencii «Telekommunikacii i novye informacionny`e tehnologii v obrazovanii» [Collection of Scientific Papers of the XY Conference «Telecommunications and New Information Technologies in Education»]. Moskva [Moscow], 2011. P. 156-157 (in Russian).
- [13] 5 trendov v oblasti vy`sokix tehnologij, kotorye izmenyat metody` obucheniya [5 High-Tech Trends That Will Change Teaching Methods]. Akkreditaciya v obrazovanii [Accreditation in Education]. 2017. №7. P. 46-47 (in Russian).

Electronic Training Technology on Mathematics of Students Oriented to Work in Nuclear Industry

N.P. Vasilenko¹, N.I. Chabanova²

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

²ORCID iD: 0000-0001-7054-1302

WoS Researcher ID: G-4963-2017

e-mail: NPVasilenko@mephi.ru

²ORCID: 0000-0002-5738-6069

e-mail: nich@inbox.ru

Abstract – The article presents the developed and tested technology of e-learning for students at the university. It gives practical examples on the organization of the educational process in accordance with this technology in the mathematical preparation of students. The significance of this approach for the mathematical preparation of students oriented to work in the nuclear industry in connection with the digitalization of all processes in the industry is shown. The effectiveness of the use of this technology in the educational process is confirmed by studies on the level of preparation of students in mathematics, their satisfaction with the organization of the educational process and the dynamics of the students' mathematical intelligence.

Keywords: e-learning, mathematical training, personnel of the nuclear industry, learning technology.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ НОМЕРА

Агапова С.П.	107
Альхагаиш И.А.	17
Амер Д.А.	62
Баран С.А.	56
Бекетов В.Г.	81
Василенко Н.П.	125
Герасимов С.И.	26
Герасимова Р.В.	26
Глухов А.А.	26
Головко М.В.	98
Гончарук А.В.	90
Григоренко В.П.	38
Губеладзе А.Р.	7
Губеладзе О.А.	7
Дубнов С.А.	38
Ерофеев В.И.	26
Ефименко Н.А.	107
Железнякова А.В.	116
Землянский А.А.	38
Землянский К.А.	38
Зубенко Н.С.	48
Ишигов И.О.	81
Кикеев В.А.	26
Костин В.И.	26
Кривин В.В.	81
Кривошеев О.В.	26
Лобковская Н.И.	116
Наугольников В.А.	73
Недорубов А.Н.	116
Никонов С.П.	62
Одзерихо И.А.	26
Пимшин И.Ю.	73
Пимшин Ю.И.	73
Пирожков Р.В.	48
Писецкий В.В.	26
Руденко В.А.	98
Сахаров В.К.	17
Сметанкин Г.П.	56
Смирнов В.В.	17
Толстов В.А.	81
Томилин С.А.	98
Ухалина И.А.	107
Цвелик Е.А.	48
Цуверкалова О.Ф.	98
Чабанова Н.И.	125
Шпицер В.Я.	81

AUTHOR INDEX OF VOL. 1, 2020

Agapova S.P.	107
Alhagaish I.K.	17
Amer D.A.	62
Baran S.A.	56
Beketov V.G.	81
Chabanova N.I.	125
Dubnov S.A.	38
Efimenko N.A.	107
Erofeev V.I.	26
Gerasimov S.I.	26
Gerasimova R.V.	26
Glukhov A.A.	26
Golovko M.V.	98
Goncharuk A.V.	90
Grigorenko V.P.	38
Gubeladze A.R.	7
Gubeladze O.A.	7
Ishigov I.O.	81
Kikeev V.A.	26
Kostin V.I.	26
Krivin V.V.	81
Krivosheev O.V.	26
Lobkovskaya N.I.	116
Naugolnov V.A.	73
Nedorubov A.N.	116
Nikonov S.P.	62
Odzeriho I.A.	26
Pimshin I.Yu.	73
Pimshin Yu.I.	73
Pirozhkov R.V.	48
Pisetskiy V.V.	26
Rudenko V.A.	98
Sakharov V.K.	17
Shpicer V.Ya.	81
Smetankin G.P.	56
Smirnov V.V.	17
Tolstov V.A.	81
Tomilin S.A.	98
Tsuverkalova O.F.	98
Tselik E.A.	48
Ukhalina I.A.	107
Vasilenko N.P.	125
Zemlyanskij A.A.	38
Zemlyanskij K.A.	38
Zheleznyakova A.V.	116
Zubenko N.S.	48

NOTES FOR AUTHORS

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

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

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

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

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

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

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

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

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

THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH

For journals:

- [1] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie sredy deystviya v sisteme proektirovaniya tehnologii demontazha oborudovaniya pri vyvode iz ekspluatatsii bloka AES [The analysis and representation of the action environment in system of technology design of equipment dismantle during NPP unit taking out of operation] [Global nuclear safety]. 2014. № 1(10). P. 25-31 (in Russian).
- [2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul'tury` bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of a Future Nuclear Specialist]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).

For books:

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

For web-resources:

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

For foreign references:

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

For materials of conferences:

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

For materials of conferences (foreign references):

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

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

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

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

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

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

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

Для принятия статьи в номер журнала необходимо предоставить следующие материалы:

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

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Для книг с одним автором:

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

Для книг с двумя и более авторами:

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

Для журналов с одним автором:

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

Для журналов с двумя и более авторами:

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

Для диссертаций:

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

Для депонированных работ:

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

Описание архивных материалов:

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

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

Материалы конференций:

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

Шишков, Ю. Россия и мировой рынок: структурный аспект / Ю. Шишков // Социальные приоритеты и механизмы преобразований в России : материалы международной конференции, Москва, 12-13 мая 1998 г. – Москва : Мagma, 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 (для отправки печатной корреспонденции):
347360, Россия, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Ленина, 73/94
Редакция журнала «Глобальная ядерная безопасность»
E-mail: oni-viti@mephi.ru
Тел.: +79281883628

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2020, 1(34)

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

Сдано в набор 10.03.2020 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 16.03.2020 г.

Бумага «SvetoCopy» 80 г/м². Объем 9,04. печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ