

NATIONAL RESEARCH NUCLEAR UNIVERSITY MEPhI

GLOBAL NUCLEAR SAFETY

2021, 4(41)

Founded in November, 2011

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

Quarterly

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

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

Editor-in-Chief:

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

Editorial Staff:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

V.P. Povarov, Doctor of Technical sciences (*Russia*)

Founder:

National Research Nuclear University MEPhI

Editorial address:

Kashirskoe shosse 31, Moscow, 115409, Russia
Lenin Street, 73/94, Rostov region, Volgodonsk, 347360, Russia
telephone: (8639)222717, e-mail: oni-viti@mephi.ru

Press address:

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

Moscow

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2021, 4(41)

Журнал основан в ноябре 2011 г.
Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» – 10647
Выходит 4 раза в год, ISSN 2305-414X
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-47155 от 3.11.2011 г.
Журнал включен в перечень ВАК РФ (№ 759)
Группы научных специальностей:
05.14.00 – Энергетика;
05.26.00 – Безопасность деятельности человека;
05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление.

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

Главный редактор:

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

Редакционная коллегия:

М.Н. Стриханов, главный редактор, д-р физ.-мат. наук, проф. (Россия)
В.А. Руденко, заместитель главного редактора, д-р соц. наук, проф. (Россия)
Дэнис Флори, заместитель генерального директора МАГАТЭ (Австрия)
Лю Дамин, проф. Китайского института ядерной энергетики (Китай)
Нэнси Фрагояннис, старший советник Комиссии по ядерному регулированию США (США)
Абдель-Монем Мохамед Эл-Батахи, д-р техн. наук, проф. (Египет)
Бухач Анджей, д-р техн. наук, проф. (Польша)
М.К. Скаков, д-р физ.-мат. наук, проф. (Казахстан)
А.Д. Маляренко, д-р техн. наук, проф. (Беларусь)
С.Э. Гоок, к-т техн. наук (Германия)
П.Д. Кравченко, д-р техн. наук, проф. (Россия)
А.П. Елохин, д-р техн. наук, проф. (Россия)
А.В. Чернов, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Ю.И. Пимишин, 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, д-р техн. наук (Россия)

Учредитель:

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

Москва

CONTENTS

2021, 4(41)

THE PROBLEMS OF NUCLEAR, RADIATION AND ECOLOGICAL SAFETY

Stoichiometric Mixture of Acetylene and Oxygen in Modeling of Gas Dynamic Instability Development

S.I. Gerasimov, I.A. Kanygin, N.V. Nevmerzhitsky.....6

Calculation and Measurement Method of Evaluating the Leakage of Radioactive Nitrogen $^{16}\text{N}_7$ in Steam Generators of Nuclear Reactors of KLT-40 Type

A.P. Elokhin, S.N. Fedorchenko.....16

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

Density and Coefficient of Thermal Expansion of 12X18H10T Steel in the Temperature Range from 100-850 °C for WWER Reactors

A.Z. Alhmoud, A.B. Kruglov.....31

NUCLEAR FACILITIES EXPLOITATION

Operational Experience of Stationary Technical Diagnostics Systems at Novovoronezh NPP

G.V. Arkadov, V.I. Pavelko, V.P. Povarov, M.T. Slepov.....36

The Predictive Diagnosis Based on Hurst Indicator and Logistics Trends

V.Ya. Shpicer, V.V. Krivin, V.A. Tolstov.....47

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

Issue of Compliance Control Efficiency at Nuclear Industry Enterprises in Economic Crisis Conditions

M.V. Golovko, A.A. Lapkis, S.A. Myasoedov.....56

Social and Economic Aspects of Tourism Marketing in the Chernobyl Exclusion Zone

T.S. Popova.....66

Management Commitment to the Goals of Production Safety as a Formation Factor of Integrated Safety of Industrial Enterprise Management System

I.E. Lyskova.....73

Author Index of vol. 4, 202192

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4(41), 2021

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Стехиометрическая смесь ацетилена с кислородом в моделировании развития газодинамической неустойчивости

С.И. Герасимов, И.А. Каныгин, Н.В. Невмержицкий..... 6

Расчетно-измерительный метод оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах ядерных реакторах типа КЛТ-40

А.П. Елохин, С.Н. Федорченко..... 16

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

Плотность и коэффициент термического расширения стали 12Х18Н10Т в диапазоне температур от 100-850 °С для реакторов ВВЭР

А.З. Альхмуд, А.Б. Круглов..... 31

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

Опыт эксплуатации стационарных систем технического диагностирования на Нововоронежской АЭС

Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, В.П. Поваров, М.Т. Слепов..... 36

Предсказательное диагностирование на основе индикатора Хёрста и логистических трендов

В.Я. Шпицер, В.В. Кривин, В.А. Толстов..... 47

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

Особенности развития уранодобывающей отрасли в условиях турбулентности внешней среды

М.В. Головкин, А.А. Лапкин, С.А. Мясоходов..... 56

Социально-экономические аспекты маркетинга туризма в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС

Т.С. Попова..... 66

Приверженность руководства целям производственной безопасности как фактор формирования интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий

И.Е. Лыскова 73

Авторский указатель номера 4(41), 2021 92

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 532.23

СТЕХИОМЕТРИЧЕСКАЯ СМЕСЬ АЦЕТИЛЕНА С КИСЛОРОДОМ В
МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ

© 2021 С.И. Герасимов^{*,**}, И.А. Каныгин^{*}, Н.В. Невмержицкий^{*}

^{*}Саровский физико-технический институт – филиал Национального Исследовательского ядерного университета «МИФИ» Саров, Нижегородская обл., Россия

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

Для моделирования процессов гидродинамической неустойчивости применяются различные схемы ускорения контактных границ разноплотных сред в тех или иных конструкциях ударных труб. В таких опытах возникают свои сложности, например, связанные с влиянием тонких диафрагм, разграничивающих исследуемые среды до начала движения. В этом отношении исключительно перспективными оказываются газозрывчатые смеси с максимальной температурой продуктов реакции, позволяющие как минимизировать время деструкции тонких пленок-диафрагм, так и значительно уменьшить размеры ударных труб для проведения опытов. В работе приведены результаты расчетов термодинамических параметров продуктов взрыва стехиометрической смеси $2C_2H_2+5O_2$ при детонации в моделях идеального взрыва, идеальной детонации, химпика. Приведен пример использования продуктов взрыва этой смесей для исследования неустойчивости Рихтмайера – Мешкова.

Ключевые слова: гидродинамическая неустойчивость, термодинамическое равновесие, стехиометрическая смесь, точка Чепмена-Жуге, внутренняя энергия, детонация.

Поступила в редакцию 01.09.2021

После доработки 08.10.2021

Принята к печати 15.10.2021

Введение

Проблема получения лазерного термоядерного синтеза связана, в том числе, с развитием возмущений на контактной границе термоядерной мишени. Эта мишень – замкнутая сферическая оболочка с газообразным термоядерным горючим, схлопывается под действием лазерного импульса. Этот процесс неустойчив: сначала при ускорении растут возмущения на внешней границе оболочки (ускорение направлено от «легкого» испаренного материала к неиспаренному, а на стадии торможения развиваются возмущения на внутренней границе оболочки (ускорение направлено от «легкого» горючего к «тяжелому» материалу оболочки). Развиваемое давление значительно превосходит прочность оболочки – перемешивание материалов на границе развивается беспрепятственно, препятствуя достижению необходимых для зажигания термоядерного горючего условий. Исследование данного процесса исключительно трудоемкое (размер мишени менее миллиметра, а требуемая плотность энергии сжатия превышает, реализуемую при разлете продуктов детонации бризантного ВВ) и дорогостоящее. Поэтому для моделирования процессов гидродинамической неустойчивости применяют относительно простые и дешевые схемы ускорения контактных границ разноплотных сред в тех или иных конструкциях ударных труб. В таких опытах возникают свои сложности, например, связанные с влиянием тонких диафрагм, разграничивающих исследуемые среды до начала движения. В этом отношении исключительно перспективными оказываются

газовзрывчатые смеси с максимальной температурой продуктов реакции, позволяющие как минимизировать время деструкции тонких пленок-диафрагм, так и значительно уменьшить размеры ударных труб для проведения опытов.

Расчетно-теоретическое исследование детонационных свойств ГВС

Расчетно-теоретическое исследование детонационных свойств смеси $2\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{O}_2$ включает расчеты для идеального взрыва, для детонации по модели Чепмена-Жуге, для детонации по модели Зельдовича-Неймана [1-6].

Исходные предпосылки

Для расчетов необходимо знание термодинамических свойств смеси. Достаточно знать свободную энергию Гельмгольца F как функцию удельного объема V , абсолютной температуры T и молекулярного состава $X(i)$, где индекс i нумерует сорта молекул, которые могут образоваться из исходных атомов C , H , O . Возможны молекулы: H_2O , CO_2 , CO , H_2 , O_2 , OH , C_2H_2 , CH_4 , и т.д., а также и ионы: e (свободный электрон), H^+ , O^+ , H^- и т.д. По известной свободной энергии F вычисляются и остальные термодинамические величины: давление P как частная производная от $-F$ по V , энтропия S как частная производная от $-F$ по T , внутренняя энергия E по формуле $E = F + TS$. Такие вычисления дают правильные величины P , S , E для любого молекулярного состава (равновесного, метастабильного или совсем неустойчивого), то есть для любых значений аргументов $x(i)$.

В строгом термодинамическом равновесии концентрации $x(i)$ определяются из условия минимума свободной энергии F (при неизменности суммарного числа атомов каждого сорта в составе всех молекул), то есть равновесный молекулярный состав зависит только от параметров состояния V, T . Расчет равновесных концентраций (и термодинамических величин P , S , E) проводится на основе информации из справочника Глушко [7] и при заданном наборе сортов молекул, среди которых отыскивается минимум F . В справочниках [7, 8] имеются не все возможные молекулы, которые можно образовать из атомов C , H , O , а только более простые (например, нет большинства углеводородов). Опыт расчетов показывает, что при достаточно высоких температурах заметные концентрации имеют только достаточно простые молекулы, так что более сложные молекулы, отсутствующие в справочниках, все равно дали бы пренебрежимо малый вклад в равновесный состав продуктов взрыва. Например, в [7] имеется 40 молекул и ионов, которые образуются из атомов C , H , O . Однако в интервале температур до 6000 К заметный вклад дают только восемь молекул: H_2O , CO_2 , CO , H_2 , O_2 , OH , O , H . Ионизируются (при 5000-6000 К) не более одной миллионной доли атомов и молекул, количество атомарного углерода, как газообразного, так и в конденсированной фазе (то есть в виде сажи) ничтожно. В примерах, приводимых далее, учитывались молекулы только из приведенного выше набора.

Идеальный взрыв

Взрывом (в отличие от горения) называют процесс очень быстрого химического превращения взрывчатого вещества в продукты взрыва. В предельной ситуации – идеальный взрыв – химическое превращение происходит мгновенно и равномерно в некоторой массе M . В результате идеального взрыва в этой массе мгновенно повысятся температура T и давление P . За одно мгновение теплопроводность не успеет сработать, так что приращение тепла в массе Q равно нулю. Объем V_0 массы M не может измениться мгновенно, так что совершенная массой работа A также равна нулю. По первому началу термодинамики изменение внутренней энергии равно сумме $Q + A$, то есть равно нулю (следовательно внутренняя энергия единицы массы до идеального взрыва и после него одинакова). Это основное условие, определяющее конечное состояние продуктов взрыва (при заданном начальном состоянии). Заметим, что в термодинамике внутренняя энергия E определена с точностью до произвольного слагаемого. Выбор этого слагаемого определяет «начало отчета» E , а точнее –

указывается то состояние в переменных V , T , $X(i)$, в котором полагается $E=0$. Ниже принято такое же начало отсчета энергии, как в [7].

Естественно доопределить идеальный взрыв условием, что конечное состояние продуктов взрыва является термодинамически равновесным. При этом условии расчетное значение температуры и давления будут максимально возможными, так как в более реальных условиях некоторое количество тепла, возможно, во время взрыва успеет перейти в окружающую среду, и тогда давление и температура будет ниже.

Расчет приведен для единственного начального состояния: давление исходной смеси равно 1 атм, температура 300 К, плотность $0,00123 \text{ г/см}^3$. Этому состоянию соответствует внутренняя энергия $2,38 \text{ кДж/г}$. В таблице 1 приводятся состояния на изохоре $0,00123 \text{ г/см}^3$ в интервале температур от наивысшей 6000 К и до 2000 К. В расчете число атомов С, Н, О полагалось равным 2, 2 и 5, соответственно. Концентрации $x(i)$ равны количеству молекул, образованных из этого числа атомов. Поэтому максимально возможное число молекул H_2O равно 1, а для CO_2 оно равно 2. Только эти молекулы присутствуют при $T = 2000 \text{ К}$. В конечном состоянии идеального взрыва, когда внутренняя энергия равна начальной внутренней энергии $E=2,38 \text{ кДж/г}$, получается:

$$T=3990 \text{ К};$$

$$P=17,2 \text{ атм};$$

$$S=11,2 \text{ Дж/г/К}.$$

Таблица 1 – Параметры состояний на изохоре $0,00123 \text{ г/см}^3$ в интервале температур от наивысшей 6000 К и до 2000 К [Parameters of states on the isochore 0.00123 g/cm^3 in the temperature range from the highest 6000 K to 2000 K]

T, К	H_2O	CO_2	CO	O_2	H_2	O	H	OH	P, атм	S, Дж/г/к	E, кДж/г
6000	0,007	0,022	1,978	0,100	0,061	2,591	1,683	0,180	38,3	13,690	14,1132
5800	0,011	0,028	1,972	0,127	0,075	2,486	1,609	0,220	36,5	13,582	13,496
5600	0,018	0,038	1,962	0,162	0,091	2,355	1,517	0,266	34,6	13,452	12,757
5400	0,029	0,051	1,949	0,204	0,109	2,193	1,406	0,319	32,6	13,296	11,895
5200	0,046	0,069	1,931	0,254	0,128	2,000	1,276	0,377	30,5	13,107	10,897
5000	0,072	0,095	1,905	0,311	0,148	1,777	1,126	0,435	28,3	12,883	9,755
4800	0,111	0,130	1,870	0,371	0,165	1,531	0,963	0,486	26,0	12,622	8,477
4600	0,165	0,178	1,822	0,430	0,177	1,272	0,792	0,524	23,8	12,325	7,080
4400	0,237	0,244	1,756	0,483	0,182	1,014	0,623	0,540	21,6	11,995	5,597
4200	0,325	0,332	1,668	0,521	0,177	0,771	0,465	0,531	19,4	11,639	4,064
4000	0,426	0,449	1,551	0,538	0,163	0,556	0,329	0,493	17,4	11,263	2,523
3800	0,533	0,600	1,400	0,530	0,142	0,376	0,218	0,432	15,5	10,874	1,006
3600	0,638	0,784	1,216	0,492	0,117	0,237	0,135	0,355	13,8	10,479	-0,456
3400	0,735	0,998	1,002	0,429	0,090	0,137	0,078	0,272	12,3	10,084	-1,836
3200	0,817	1,225	0,775	0,346	0,066	0,072	0,041	0,193	10,3	9,700	-3,104
3000	0,881	1,445	0,555	0,257	0,045	0,034	0,020	0,126	9,7	9,338	-4,227
2800	0,929	1,637	0,363	0,173	0,029	0,014	0,009	0,075	8,7	9,010	-5,179
2600	0,961	1,786	0,214	0,104	0,018	0,005	0,003	0,040	7,9	8,724	-5,951
2400	0,980	1,889	0,111	0,055	0,010	0,001	0,001	0,019	7,1	8,482	-6,556
2200	0,991	1,950	0,050	0,026	0,005	0,000	0,000	0,008	6,4	8,278	-7,026
2000	0,997	1,981	0,019	0,010	0,002	0,000	0,000	0,003	5,8	8,100	-7,400

Идеальная детонация

Детонация (даже в газах) – сложный химико-газодинамический процесс, требующий в теоретических построениях сначала производства максимальных упрощений, и затем постепенно привнесения тех или иных усложнений. Главным признаком детонации является ударная волна, идущая по исходной взрывчатой смеси, и инициирующая химическую реакцию за фронтом ударной волны. Если детонация распространяется по трубе, то скорость ударного фронта возрастает с увеличением диаметра трубы, и после некоторого предельного диаметра становится постоянной величиной. Эта постоянная скорость D является основной характеристикой взрывчатой смеси. Для смеси $2C_2H_2+5O_2$, что соответствует концентрации ацетилена 28,57%, детонационная скорость оказалась равной $D \sim 2.4 \pm 0.5$ км/с. Сравним это значение с тем, что получается при использовании простейшей модели – модели Чепмена-Жуге (идеальная детонация с мгновенным завершением химических реакций во фронте).

Согласно этой модели фронт УВ рассматривается как математический разрыв, на котором выполняются известные соотношения, вытекающие из законов сохранения массы, импульса и энергии. Третье из этих уравнений имеет вид:

$$E - E_0 = 0.5(P + P_0)(V_0 - V). \quad (1)$$

Здесь индексом отмечено исходное состояние смеси, в нашем конкретном примере $P_0 = 1$ атм, $E_0 = 2.38$ кДж/г. Величины без индекса соответствуют состоянию (искомому) на фронте УВ. Предполагается, что в этом состоянии имеется полное термодинамическое равновесие. Тогда, известная свободная энергия Гельмгольца определяет, в частности, калорическое уравнение состояния, то есть связь между термодинамическими параметрами E , P , V :

$$f(E, P, V) = 0. \quad (2)$$

Два уравнения (1), (2) используются для определения двух величин из E , P , V . Третье уравнение, обоснованное Я.Б. Зельдовичем, сводится к следующему. Если из искомой точки в P, V -плоскости провести адиабату Пуассона, то есть линию, определяемую решением дифференциального уравнения $dE = -PdV$, то прямая, проходящая через искомую точку P , V и исходную P_0 , V_0 , должна касаться адиабаты Пуассона в искомой точке:

$$-dP/dV = (P - P_0)/(V_0 - V). \quad (3)$$

Здесь производная в левой части уравнения берется вдоль адиабаты Пуассона. Три уравнения определяют три величины E , P , V на фронте ударной (детонационной) волны. Найденное состояние называют точкой Чепмена-Жуге.

Помимо калорического уравнения состояния (2) свободная энергия также определяет температуру T , энтропию S и равновесный молекулярный состав $x(i)$. Так что в процессе вычисления величин E , P , V из уравнений (1), (2), (3) одновременно вычисляются и T , S , $X(i)$. Одновременно имеются в виду термины, что ударная адиабата, определяемая уравнением (1), и адиабата Пуассона имеют в точке Чепмена-Жуге касание второго порядка, и что адиабата Пуассона одновременно является изэнтропой, то есть на ней $S = \text{const}$. Из законов сохранения следует также, что скорость ударной волны D определяется наклоном (3) прямой, которая называется лучом Рэлея-Михельсона, а именно, этот наклон равен квадрату отношения D/V_0 .

В таблице 2 приводятся расчетные значения в точке Чепмена-Жуге.

Таблица 2 – Расчетные значения в точке Чепмена-Жуге [Calculated values at the Chapman-Jouguet point]

Молекулярный состав в точке Чэмпена-Жуге	
H ₂ O	0,4049
CO ₂	0,4197
CO	1,5803
O ₂	0,5324
H ₂	0,1654
O	0,5904
H	0,3352
ОН	0,5202
Термодинамические величины в точке Чэмпена-Жуге	
T=4217 К	
$\rho_1/\rho_0=1,84$	
P=34,6 атм	
S=11,17 Дж/г/К	
E=3,038 кДж/г	
D=2,426 км/с	

Итак, расчетная скорость детонации 2,426 км/с находится в пределах ошибки измерения экспериментальной скорости.

Химпик

Основное предположение в модели Зельдовича-Неймана прямо противоположно предположению Чэмпена-Жуге. Если в последней предполагается, что на фронте ударной волны химическая реакция происходит мгновенно, то в первой предполагается, что из-за мгновенности нарастания давления во фронте УВ, трактуемом как математический разрыв, реакция совершенно не успевает произойти, так что непосредственно на фронте молекулярный состав такой же, как перед фронтом. И только уже за фронтом за конечное время химическая реакция приведет к конечному равновесному составу молекул, соответствующему точке Чепмена-Жуге на некотором удалении от фронта УВ. Таким образом, в области конечной толщины будет наблюдаться неравновесный химический состав. Эта область называется химзоной, ширина которой может быть порядка нескольких миллиметров.

Другое предположение модели Зельдовича заключается в том, что для установившейся детонации движения химзоны стационарно, то есть в ней все профили (давления, плотности, химсостава и пр.) перемещаются как жесткое целое со скоростью нормальной детонации D . Тогда начальное состояние химзоны определяется как состояние на ударной адиабате газа постоянного (исходного) состава, имеющего скорость ударной волны, равную D . Это состояние называется химпиком. В исследуемом взрывчатом составе расчет дает следующие числа (для $D=2,46$ км/с):

$$P=66,6 \text{ атм}$$

$$E_0=4,81 \text{ кДж/г}$$

$$\rho_1/\rho_0 = 8,65$$

$$T=2300 \text{ К}$$

Температура в химпике достаточно низкая, т.к. на самом фронте УВ химическая реакция еще не началась. Горение происходит позже. температура достигает

максимума в состоянии Чепмена-Жуге, когда все необратимые реакции закончились, далее температура будет падать за счет адиабатического расширения продуктов взрыва.

Эксперименты с использованием ГВС

Ударная труба с газовзрывчатым драйвером

Эксперименты проводились на ударной трубе, схема которой представлена на рисунке 1. Ударная труба состояла из камеры высокого (драйвер) и низкого давлений. Камера высокого давления герметично отделялась от камеры низкого давления мембраной из лавсана толщиной (50÷150) мкм. Камера низкого давления состояла из входного и выходного каналов и оптически прозрачной измерительной секции с внутренним сечением (40×40) мм.

Измерительная секция от входного канала герметично отделялась тонкой (≈ 1 мкм) полимерной пленкой, выходной канал от атмосферной среды – мембраной из лавсана, толщиной 50 мкм.

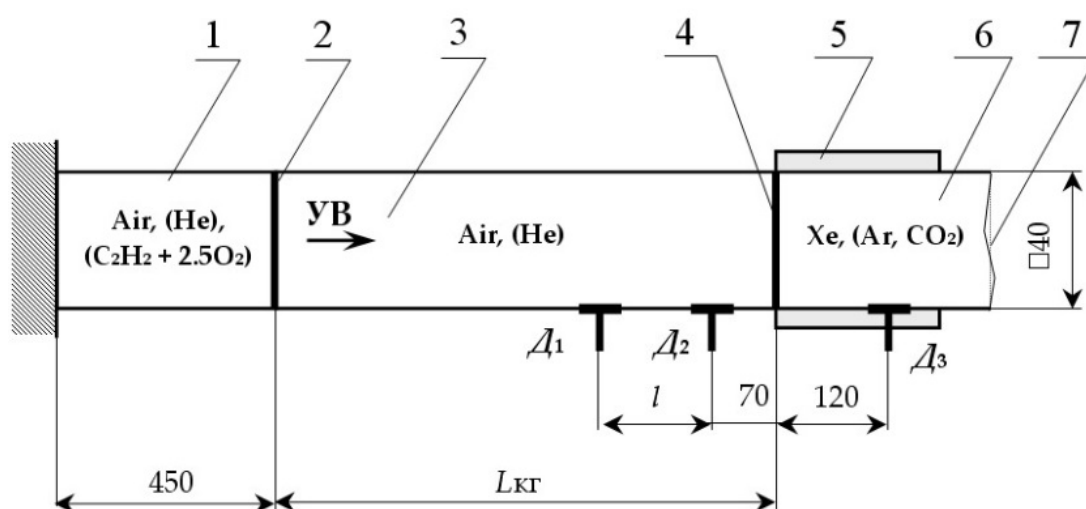


Рисунок 1 – Схема эксперимента: 1 – камера высокого давления; 2 – мембрана; 3 – канал входной; 4 – разделительная пленка (КГ); 5 – измерительная секция; 6 – канал выходной; 7 – мембрана; D_1, D_2, D_3 – датчики давления (размеры в мм) [Experiment scheme: 1 – high pressure chamber; 2 – membrane; 3 – input channel; 4 – separating film (CG); 5 – measuring section; 6 – output channel; 7 – membrane; D_1, D_2, D_3 – pressure sensors (dimensions in mm)]

Измерительная секция и выходной канал заполнялись ксеноном (углекислым газом, аргоном), входной канал камеры низкого давления – воздухом или гелием при атмосферных условиях. Камера высокого давления заполнялась газовой взрывчатой смесью (ГВС) ацетилена и кислорода ($C_2H_2 + 2,5O_2$) или гелием (воздухом) под определенным давлением.

Взрывчатая смесь инициировалась электроискровым разрядом в точке, расположенной по центру крышки камеры высокого давления. При этом по камере высокого давления распространяется детонационная волна. При выходе ее на диафрагму, последняя разрушается, и в «легкий» газ распространяется УВ. При выходе УВ на контактную границу с «тяжелым» газом происходит распад разрыва с образованием ударной волны, уходящей в «тяжелый» газ и отраженной волны, уходящей в «легкий». Разделительная пленка разрушается, граница раздела газов ускоряется, в результате чего на ней возникает неустойчивость Рихтмайера-Мешкова [9-10], приводящая к развитию возмущений и перемешиванию контактирующих газов.

При заполнении драйвера сжатым воздухом или гелием установка работала как обычная ударная труба.

Регистрация течения производилась в покадровом режиме скоростной кинокамерой СФР, сочлененной с теневой установкой ИАБ-451 [11]. При этом во всех опытах применялся теневой метод регистрации (без ножа Фуко [12]). Скорость УВ определялась по временным показаниям датчиков-отметчиков D_1 , D_2 , D_3 и геометрии ударной трубы, а также по кинограммам экспериментов. Датчики D_1 , D_2 , D_3 – пьезокерамические датчики давления АР1710 (полоса пропускания ~20 кГц.) с диаметром чувствительного элемента 10 мм.

В таблице 1 представлены некоторые условия и результаты проведенных экспериментов со следующими обозначениями:

P_0 – начальное полное давление ГВС (*воздуха, гелия*) в камере (погрешность $\pm 0,1$ атм);

t_1 , t_2 , t_3 – время прихода УВ на датчики D_1 , D_2 , D_3 соответственно (погрешность ± 2 мкс);

$t_{кг}$ – время прихода УВ на контактную границу газов (рассчитанное по t_1 , t_2 и геометрии УТ);

$L_{кг}$ – расстояние от диафрагмы до начального положения КГ; l – расстояние между датчиками D_1 и D_2 ;

M_1 – число Маха УВ в *воздухе, гелии*; M_2 – число Маха УВ в газе измерительной секции;

U – скорость контактной границы газов (определена из условия симметричного развития перемешивания относительно КГ);

$A = \frac{Q_T - Q_L}{Q_T + Q_L}$ – число Атвуда (определялось из условия распада-разрыва на КГ, здесь

ρ_T, ρ_L – плотность «тяжелого» и «легкого» газа соответственно).

Отметим, что при заполнении драйвера воздухом или гелием, в «легком» газе образовывалась стационарная ударная волна, при использовании ГВС – нестационарная.

Таблица 3 – Результаты проведенных экспериментов [Results of the experiments]

№ опыта	Вид КГ	Драйвер, P_0 , атм	t_1 , мкс	t_2 , мкс	t_3 , мкс	$t_{кг}$, мкс	$L_{кг}$, мм	A	U , м/с	l , мм	M_1	M_2
520	<i>B-Xe</i>	ГВС, 1	758	1439	-	1517	1275	0,46	278	603	2,58	3,1
526	<i>B-CO₂</i>	ГВС, 1	759	1444	-	1524	1275	0,32	441,3	603	2,55	2,6
527	<i>B-Xe</i>	ГВС, 1	752	1444	-	1524	1275	0,47	282,8	603	2,55	3,1
531	<i>B-Xe</i>	ГВС, 9,5	454	747	-	1517	1275	0,23	940,8	603	6,02	7,8
536	<i>B-Xe</i>	Air 4,5	1150	2380	-	2530	1183	0,6	122,5	603	1,4	≈1,5
539	<i>B-Xe</i>	ГВС, 9,5	450	742	-	776	1275	0,25	1000,8	603	6,04	7,6
540	<i>B-CO₂</i>	ГВС, 9	442	746	-	781	1275	0,4	1314	603	5,8	5,2
578	<i>B-Xe</i>	ГВС, 4	613	893	1073	942	1230	0,37	743	403	4,25	5,4
711	<i>He-Xe</i>	ГВС, 9,5	387	502	609	524	1230	0,9	814	403	3,6	8,3
719	<i>Ar-Xe</i>	<i>He</i> , 31	1247	1726	2013	1809	1258	0,47	395	403	2,6	3,46
720	<i>Ar-Xe</i>	<i>He</i> , 31	1105	1582	1875	1665	1258	0,47	399	403	2,64	3,36
724	<i>Ar-Xe</i>	ГВС, 4	639	925	1105	975	1230	0,43	736	403	4,4	5,4
730	<i>He-Xe</i>	<i>He</i> , 31	775	1040	1348	1086	1258	0,93	218	403	1,6	2,7
732	<i>He-Xe</i>	ГВС, 4	438	570	712	593	1230	0,9	685	403	3,2	5,9

На рисунке 2 представлены кинограммы некоторых экспериментов со следующими обозначениями: УВ – ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; КГ – начальное положение контактной границы; Ф – фрагменты полимерной пленки. Время t отсчитывается от момента прихода УВ на КГ.

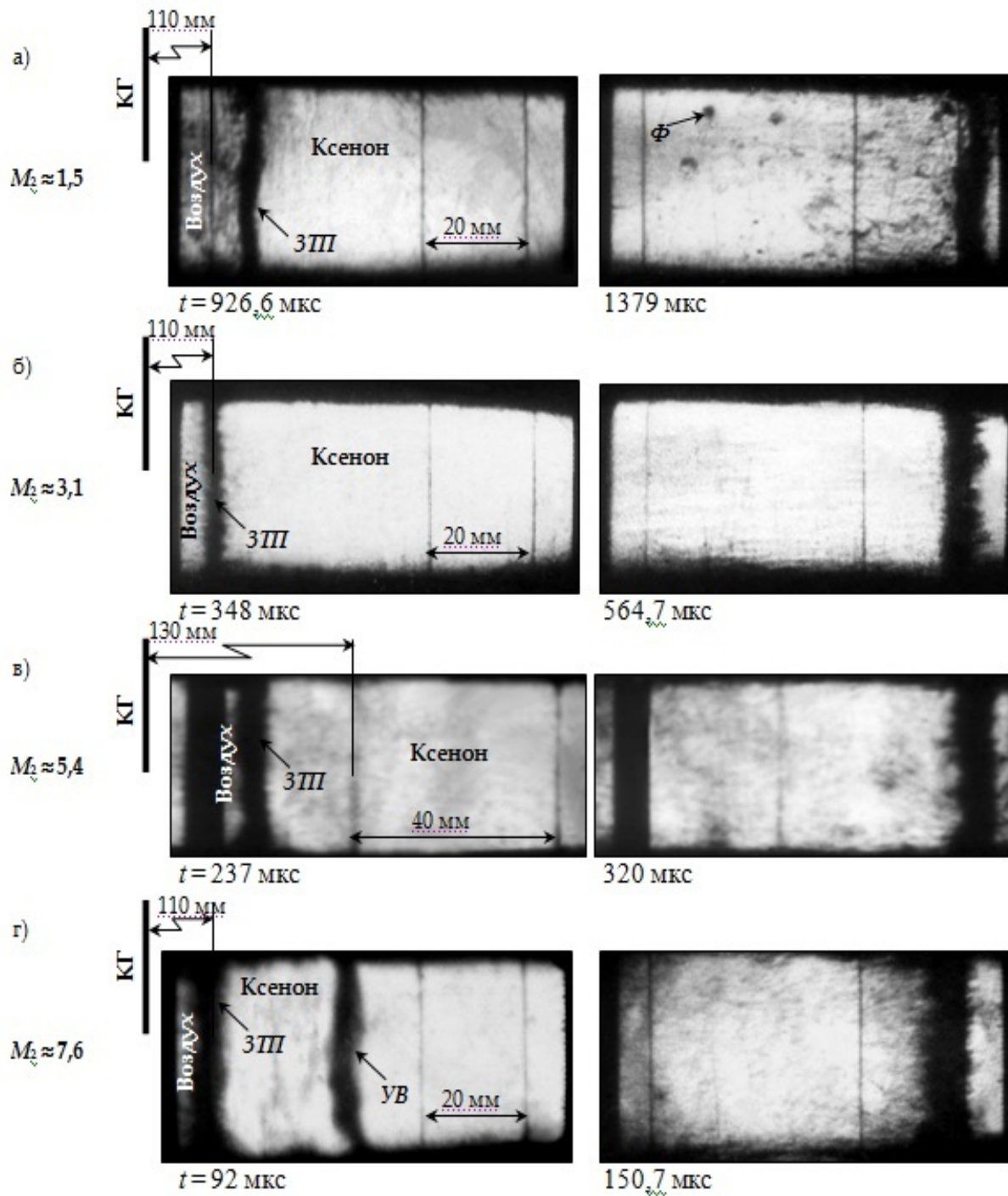


Рисунок 2 – Кинограммы экспериментов по развитию турбулентного перемешивания на границе *воздух – ксенон*: а) опыт № 536; б) опыт №527; в) опыт №578; г) опыт № 539 [Films of experiments on the development of turbulent mixing at the air-xenon interface: а) experiment No. 536; б) experiment No. 527; в) experiment No. 578; г) experiment No. 539]

Зафиксировано, что с увеличением числа Маха ударной волны ширина зоны перемешивания и скорость ее роста увеличиваются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика взрыва : в 2 т. / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум [и др.] ; ред. Л.П. Орленко – Т. 1. – Москва : Физматлит, 2004. – 832 с.
2. Зельдович, Я.Б. Теория детонации / Я.Б. Зельдович, А.С. Компанеец. – Москва : Гостехиздат, 1955. – 268 с.
3. Шаль, Р. Физика детонации Р. Шарль // Физика быстропротекающих процессов; пер. с англ. – Т. 2. – Москва : Мир, 1971. – С. 276-349.
4. Губкин, К.Е. Распространение взрывных волн / К.Е. Губкин // Механика в СССР за 50 лет. – Т. 2. – Москва : Наука, 1970. – 879 с.
5. Физика взрыва / Ф. А. Баум [и др.] ; под ред. К.П. Станюковича. – Москва : Наука, 1975. – 704 с.
6. Калашников, Я.А. Физическая химия веществ при высоких давлениях / Я.А. Калашников. – Москва : Высшая школа, 1987. – 240 с.
7. Термодинамические свойства индивидуальных веществ, в четырех томах : справочник / Отв. ред. В.П. Глушко. – Москва : Наука, 1978-1982.
8. JANAF Thermochemical tables. NSROS-NBS 37. Wash. Gov. print.off., 1971, 114 p.
9. Мешков, Е.Е. Исследование гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах / Е.Е. Мешков. – Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006. – 139 с.
10. Алеханов, Ю.В. Метод исследования взаимодействия диспергированной воды с пламенем / Ю.В. Алеханов, М.В. Близнецов, Ю.А. Власов, С.И. Герасимов, Е.Е. Мешков // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42, № 1. – С. 57.
11. Златин, Н.А. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Н.А. Златин, А.П. Красильщиков, Г.И. Мишин, Н.Н. Попов; под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. – Москва : Наука, 1974. – 344 с.
12. Зацепина, М.Е. Современный количественный теневой метод с применением средств компьютерных технологий / М.Е. Зацепина, В.К. Кирилловский. – Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 2(171). – С. 226-230.

REFERENCES

- [1] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A. Fizika vzryva: v 2 t. [Explosion Physics: in 2 volumes]. Edited by L.P. Orlenko. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit, 2004. 832 p. (in Russian).
- [2] Zel'dovich YA.B. Teoriya detonacii [Detonation Theory]. Moscow: Gostekhizdat, 1955. – 268 p. (in Russian).
- [3] SHal', R. Fizika detonacii [Detonation Physics]. Fizika bystroprotekayushchih processov [Physics of Fast Processes]; translated from English. Vol. 2. Moscow: Mir, 1971. P. 276-349 (in Russian).
- [4] Gubkin K.E. Rasprostranenie vzryvnyh voln [Blast Wave Propagation]. Mekhanika v SSSR za 50 let [Mechanics in the USSR for 50 Years]. Vol. 2. Moscow: Nauka, 1970. 879 p. (in Russian).
- [5] Fizika vzryva [Explosion physics]. Baum F.A. and others; edited by K.P. Stanyukovich. Moscow: Nauka, 1975. 704 p. (in Russian).
- [6] Kalashnikov Ya.A. Fizicheskaya himiya veshchestv pri vysokih davleniyah [Physical Chemistry of Substances at High Pressures]. Moscow: High School, 1987. 240 p. (in Russian).
- [7] Termodinamicheskie svoystva individual'nyh veshchestv, v chetyrekh tomah : spravochnik [Thermodynamic Properties of Individual Substances, in four volumes: a handbook]. Edited by V.P. Glushko. Moscow: Nauka, 1978-1982 (in Russian).
- [8] JANAF Thermochemical Tables. NSROS-NBS 37. Wash. Gov. print.off. 1971. 114 p. (in English).
- [9] Meshkov E.E. Issledovanie gidrodinamicheskikh neustojchivostej v laboratornykh eksperimentah [Study of Hydrodynamic Instabilities in Laboratory Experiments]. Sarov: FSUE RFNC-VNIIEF, 2006. 139 p. (in Russian).
- [10] Alekhanov Yu.V. Metod issledovaniya vzaimodejstviya dispergirovannoj vody s plamenem [Method for Studying the Interaction of Dispersed Water with a Flame]. Fizika goreniya i vzryva [Combustion and Explosion Physics]. 2006. Vol. 42, No. 1. P. 57 (in Russian).
- [11] Zlatin N.A. Ballisticheskie ustanovki i ih primenenie v eksperimental'nyh issledovaniyah [Ballistic Installations and their Application in Experimental Research]. Edited by N.A. Zlatin and G.I. Mishin. Moscow: Nauka, 1974. 344 p. (in Russian).

- [12] Zacepina M.E. Sovremennyy kolichestvennyj tenevoj metod s primeneniem sredstv komp'yuternyh tekhnologij [Modern Quantitative Shadow Method Using Computer Technology]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta [Scientific and Technical Statements of the St. Petersburg State Polytechnic University]. 2013. No. 2(171). P. 226-230 (in Russian).

Stoichiometric Mixture of Acetylene and Oxygen in Modeling of Gas Dynamic Instability Development

S.I. Gerasimov^{*,1}, I.A. Kanygin^{*2}, N.V. Nevmerzhitsky^{*3}**

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

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

¹ORCID iD: 0000-0002-6850-0816

WOS Researcher ID: L-2727-2016

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

²ORCID iD: 0000-0001-8632-2155

e-mail: kanyginiv@yandex.ru

³e-mail: nnevmerzh@gmail.com

Abstract – To simulate the processes of hydrodynamic instability, various schemes for accelerating the contact boundaries of different-density media in various structures of impact pipes are used. Such experiments have their own difficulties, for example, associated with the influence of thin diaphragms that delimit the studied media before the start of movement. In this regard, gas-explosive mixtures with the maximum temperature of the reaction products are extremely promising, allowing both to minimize the destruction time of thin films-diaphragms, and to significantly reduce the size of shock tubes for conducting experiments. The paper presents the results of calculations of the thermodynamic parameters of the explosion products of a stoichiometric mixture of $2C_2H_2+5O_2$ during detonation in the models of an ideal explosion, ideal detonation, chemical peak. An example of using the explosion products of these mixtures to study the Richtmayer – Meshkov instability is given.

Keywords: hydrodynamic instability, thermodynamic equilibrium, stoichiometric mixture, Chapman-Jouget point, internal energy, detonation.

ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621.039.58

**РАСЧЕТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОТЕЧКИ
РАДИОАКТИВНОГО АЗОТА $^{16}\text{N}_7$ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ ТИПА КЛТ-40**

© 2021 А.П. Елохин*, С.Н. Федорченко*

*НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

**АО «СНИИП» г. Москва, Россия

В работе проводится анализ протечки радионуклида азота $^{16}\text{N}_7$, возникающего в 1-ом контуре реактора КЛТ-40, который используется на объектах морского транспорта различного назначения, через парогенератор ядерного реактора во второй контур, в который поступает вода под давлением P_v , с температурой $T_v \gg 100$ °С. Радиоактивный азот распространяется в паровой фазе и по спиральному паропроводу выходит на турбину под высоким давлением P_n , создавая неблагоприятные, с точки зрения радиационной безопасности, условия. Содержание указанного радионуклида в паре можно обнаружить и оценить методами γ -спектрометрии и дозиметрии, измеряя объёмную γ -активности пара и мощность дозы γ -излучения, при выходе пара на турбину. Анализ наблюдаемого эффекта протечки осуществлялся на основе использования несложной физико-математической модели, учитывающей перенос водной, паровой сред и перенос радиоактивного азота в паровой фазе, что позволило указать причину и определить область протечки на спиральном паропроводе, которая определялась из условия равенства давлений пара и воды в паропроводе. В работе указываются основные области конструкции парогенератора, позволяющие провести измерения радиационных характеристик, и необходимое приборное оборудование, учитывающее в своих показаниях физические особенности сред, в которых будет работать это оборудование.

Ключевые слова: энергетический реактор, радионуклид, парогенератор, давление температура, мощность дозы, радиационная безопасность.

Поступила в редакцию 21.10.2021

После доработки 10.12.2021

Принята к печати 13.12.2021

При эксплуатации реакторов серии КЛТ-40* и ряда других водо-водяных ядерных реакторов в соответствии с регламентом по радиационной безопасности ядерных корабельных установок, а именно, в помещении турбогенераторного машинного зала в условиях нормальной эксплуатации контролируемого объекта (турбины) и в условиях повышенной радиационной обстановки, наблюдался эффект выхода радионуклидов из первого контура во второй. Этот эффект, получивший в дальнейшем название «протечки», рассматривался в работах [1-3], в которых была предложена модель и методика диагностики протечки радионуклидов $^{131-135}\text{I}$, ^{24}Na , ^{42}K , $^{16}\text{N}_7$ и др. из теплоносителя первого контура в котловую воду парогенератора АЭС с реакторами ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Физический смысл модели и методики состоит в оценке проникновения указанных радионуклидов в котловую воду парогенератора второго контура и степени их накопления. Модель предусматривает естественную линейную зависимость объёмной активности указанных радионуклидов от мощности реактора. Определение накопленной активности указанных радионуклидов котловой воды

*КЛТ-40 – водо-водяной ядерный реактор, разработанный в ОКБМ имени И. И. Африкантова. Изготавливался на Нижегородском машиностроительном заводе. Указанный тип реакторов широко используется на ледоколах и плавучих энергоблоках (ПЭБ).

парогенератора осуществлялось путем измерения активности фильтров, но радиоактивный газ, например, $^{16}\text{N}_7$ фильтрами не задерживается и выходит с паром, а изотопы йода остаются в воде (более чем на 99%) [1]. Недостаток этого метода состоит в том, что в его рамках удастся лишь констатировать наличие протечки по активности изотопов, осевших на фильтры, и активности радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в помещении машзала при выходе пара на турбину. В лучшем случае можно оценить плотность потока γ -квантов, β -излучения и объемную активность радионуклида, используя показания сцинтилляционных детекторов. В указанном методе отсутствует возможность получения информации об области (на спиральном паропроводе) возникновения протечки, динамики ее развития, которая будет, очевидно, линейно зависеть от изменения мощности реактора, ее размерах и мощности «вброса» азота $^{16}\text{N}_7$ из первого контура во второй. Отсутствие этой информации не дает возможности однозначно ответить на вопрос, по какой причине происходит протечка; провести анализ металла водо-паропровода; его физико-механических свойств и их изменений при воздействии ИИ; изучить особенности способствующие возникновению микротрещин, через которые происходит протечка, с целью предотвращения подобных эффектов; а также прогнозирование величины ингаляционной дозы, которую может получить персонал, обслуживающий парогенератор и турбину, что приводит к нарушению требований нормативных документов [4, гл. 3, п. 3.1.6].

В связи с этим важное значение приобретает разработка метода оценки протечек, в частности, разработка корректной модели, позволяющей найти причины протечки, ее область в парогенераторе и, таким образом, ответить на поставленные вопросы.

В рассматриваемом методе оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенератор реактора КЛТ-40 из первого контура обнаруженный эффект состоял в том, что струя пара парогенератора, поступающего на турбину, содержала радионуклид радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ ($T_{1/2} = 7,11$ с, с энергией γ -излучения $E_{\gamma, \max} = 6,134$ МэВ и квантовым выходом $\nu_{\gamma, \max} = 69\%$; энергиями β -излучения $E_{\beta, 1} = 4,288$ МэВ, и выходом β -частиц $n_{\beta, 1} = 68\%$; $E_{\beta, 2} = 10,419$ МэВ, $n_{\beta, 2} = 26\%$) (см. рис.1), содержание которого в паре свидетельствовало о признаке нарушения герметичности водо-паропровода второго контура парогенератора и определялось путём использования сцинтилляционных детекторов с кристаллом NaJ(Tl), в силу высокой энергии γ - β -излучения, по эффекту образования пар, при выходе пара на турбину [5].

Рассмотрим принципиальную схему парогенератора, располагающегося вертикально на ядерной установке, на рисунке 1 (энергетические характеристики пара и воды приводятся из работ [1, 2]).

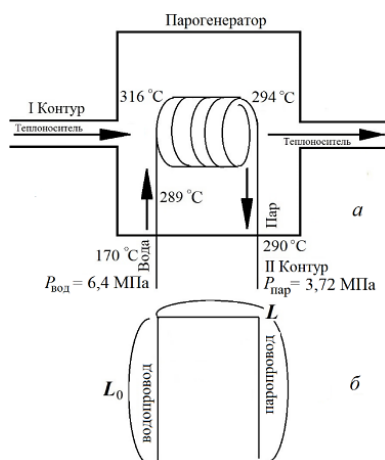


Рисунок 1 – Иллюстрация протечки радионуклида ^{16}N из первого контура в паропровод второго (а). К расчёту плотности пара $\rho_n(x)$ и объёмной активности $Q_N(x, t)$ ^{16}N в паропроводе парогенератора (б); l_{vr} – ширина области протечки [Illustration of the leakage of ^{16}N radionuclide from the first loop into the steam line of the second (a). Calculating the steam density $\rho_n(x)$ and the volumetric activity $Q_N(x, t)$ ^{16}N in the steam line of the steam generator (b); l_{vr} - width of the leak area]

Во второй контур парогенератора по водопроводу поступает вода под давлением P_v (левая область рис. 1 а), с температурой T_v , нагревается с образованием пара, выход которого через N спиральных паропроводов того же внутреннего диаметра осуществляется с температурой T_n под высоким давлением** P_n [6, 7]. В процессе прохождения воды по водопроводу в парогенераторе вода нагревается до температуры насыщения пара при соответствующем давлении, испаряется на внутренней поверхности трубок парогенератора, создавая эффективную пограничную область вода-пар и, наконец, в виде перегретого пара поступает на турбину. Таким образом, на вход турбины подается пар высокого давления, перегретый относительно температуры насыщения. Зависимость температуры кипения воды (парообразования) от её давления приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость температуры [Temperature dependence]

P		$t_k, ^\circ\text{C}$	P		$t_k, ^\circ\text{C}$
<u>кПа.</u>	<u>атм.</u>		<u>кПа.</u>	<u>атм.</u>	
0,981	0,01	6,698	196,1	2,0	119,62
1,961	0,02	17,20	245,2	2,5	126,79
3,923	0,05	28,64	294,2	3,0	132,88
9,807	0,1	45,45	392,3	4,0	142,92
19,61	0,2	59,67	490,3	5,0	151,11
29,42	0,3	68,68	588,4	6,0	158,08
39,23	0,4	75,42	686,5	7,0	164,17
49,03	0,5	80,86	784,5	8,0	169,61
58,84	0,6	85,45	882,6	9,0	174,53
68,65	0,7	89,45	980,7	10,0	179,04
78,45	0,8	92,99	1961	20,0	211,38
88,26	0,9	96,18	2452	25,0	222,90
98,07	1,0	99,09	4903	50,0	262,70
101,3	1,033	100,00	9807	100,0	309,53
147,1	1,5	110,79	-	-	-

Используя свойство воды как несжимаемой жидкости и учитывая, что процесс регулирования паро-водного баланса в водо-паропроводе автоматизирован, путём использования обратной связи, приходим к выводу, что избыток давления пара приведет к некоторому смещению воды относительно равновесного положения в пограничной области вода-пар, в которой температура будет изменяться в соответствии с температурой соответствующей среды.

Автоматическое регулирование процесса подпитки водой парогенератора, которое осуществляется с помощью поступления воды из уравнительной цистерны [6], приведёт к повышению давления воды в водопроводе и обратному смещению воды в первоначальное положение. Этот флуктуационный процесс около некоторого равновесного положения в указанной пограничной области пар-вода будет происходить с некоторой частотой.

Таким образом, в пограничной области на водо-паропроводе будет постоянно

** Такой тип парогенератора характерен для реакторов КЛТ-40 и других водо-водяных ядерных реакторов [6]

изменяться температурный режим. Последнее автоматически приведёт к аналогичному изменению частоты механических напряжений водо-паропровода в этой области, последующей усталости металла и к вероятному появлению микротрещин, через которые из первого контура во второй может проникать радионуклид $^{16}\text{N}_7$, создавая так называемую **протечку**.

Для оценки рассматриваемых величин в условиях стационарного процесса, необходимо знание плотности распределения воды $\rho_{\text{в}}(T)$, поступающей в водопровод парогенератора, как функции температуры при ее переносе вдоль оси x по водопроводу, плотности пара $\rho_{\text{п}}(T)$ как функции температуры или расстояния x при его переносе вдоль оси x по паропроводу (см. рис. 1 б) при спрямлении его спиральной части длиной L с внутренним радиусом $R_0=1,5-2,0$ см ($0 \leq r \leq R_0$). Следует отметить, что характер зависимости плотности воды и пара как функций температуры существенно различается: плотность воды с ростом температуры падает, а плотность пара растёт и, соответствующим образом изменяются давление воды и пара. Если принять, что рост температуры по водо-паропроводу пропорционален расстоянию x , то найдём, что при некотором x_L давление пара и воды может быть уравновешено. Тогда это значение $x_L = L_0$ и определит эффективную длину водопровода, в пограничной области которой будет возникать протечка. Если спираль паропровода представить горизонтальным участком (см. рис. 1 б), а изменение температуры в среде второго контура парогенератора аппроксимировать некоторой линейной функцией, зависящей от x :

$$T(x) = T(0) + b_t x / L_s \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

в которой $T(0) = 170 \text{ } ^\circ\text{C}$, $b_t = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$, а x удовлетворяет неравенству $0 \leq x \leq L_s$. Поскольку $\rho_{\text{в}}(T(x))$ является сложной функцией x , то $d\rho_{\text{в}}/dx = (d\rho_{\text{в}}/dT)(dT/dx) = (d\rho_{\text{в}}/dT)(b_t/L_s)$, а уравнение, описывающее процесс переноса воды в водопроводе после ряда несложных преобразований, можно представить в виде:

$$d\rho_{\text{в}} = \frac{L_s}{b_t} \sqrt{\frac{N\bar{\rho}_{\text{в}}}{2P_{\text{гр}}}} \left\{ \frac{G}{V_{\text{в}}} - u_{\text{п}}(T) \frac{S_{\text{в}}}{V_{\text{в}}} \right\} dT, \quad (2)$$

где, учитывая свойство воды как несжимаемой жидкости, ее скорость в каждой трубке водопровода полагать постоянной величиной $\bar{v}_{\text{в}}$, представляющей собой среднюю скоростью переноса воды по водопроводу, определяемую выражением:

$$\bar{v}_{\text{в}} = \sqrt{2P_{\text{гр}} / \left[(N/L_0) \cdot \int_0^{L_0} \rho_{\text{в}}(T(x)) dx \right]} = \sqrt{2P_{\text{гр}} / N\bar{\rho}_{\text{в}}}, \quad (3)$$

где G – ж генерация воды (нагнетание воды под давлением (см. рис. 1а) $G = \text{const.}$), [кг/с], определяемая в точке $T|_{x=0} = T(0)$ выражением: $G = S \sqrt{2\rho_{\text{в}}(T_0)P_{\text{гр}}}$; $u_{\text{п}}(T)$ – скорость испарения воды или скорость генерации пара, [кг/м²с]; $S_{\text{в}} = 2\pi R_0 L_0$ – площадь испарения воды. При этом температурная зависимость плотности воды в паропроводе $\rho_{\text{в}}(T)$ как функция x , будет определяться формулой (1), начальное условие, определяющее температуру воды при $x = 0$, будет соответствовать температуре её входа в парогенератор (см. рис. 1 а), а её плотность $\rho_{\text{в}}(T)$ в выделенном температурном диапазоне определится зависимостью, представленной на рисунке 2, при температуре T_0 . В формуле (3) $\rho_{\text{в}}(T)$ в диапазоне температур $170 \leq T \leq 290 \text{ } ^\circ\text{C}$ будет определяться зависимостью, приведенной на рисунке 2, которая аппроксимируется параболой $\rho_{\text{в}}(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$, [кг/м³] (a, b, c – коэффициенты соответствующей размерности): с

относительной погрешностью $\delta = 1,16 \%$, а изменение температуры с расстоянием x – формулой (1).

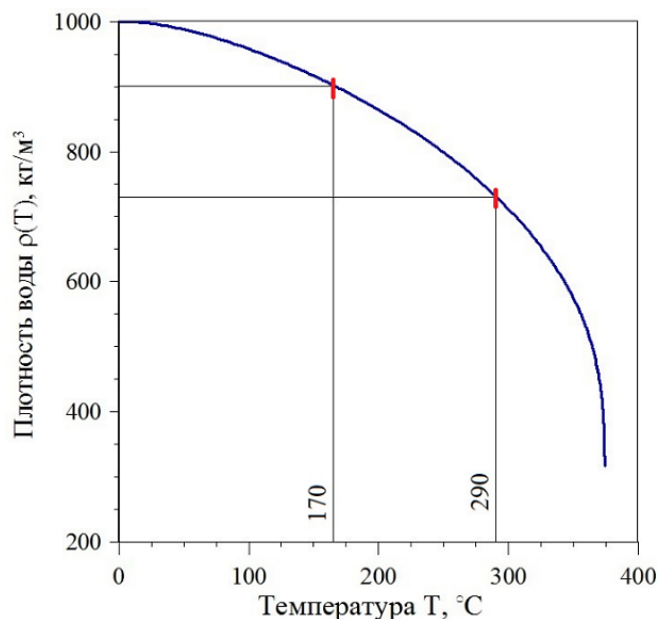


Рисунок 2 – Зависимость плотности воды $\rho(T)$ от температуры. Область кривой между метками аппроксимируется с относительной погрешностью $\delta = 1,16 \cdot 10^{-2} \%$ параболой вида:
 $\rho(T) = -0,002315 \cdot T^2 - 0,39345 \cdot T + 1033,79$ [кг/м³] [Dependence of water density $\rho(T)$ on temperature. The area of the curve between the marks is approximated with a relative error $\delta = 1,16 \cdot 10^{-2} \%$ by a parabola of the form:
 $\rho(T) = -0,002315 \cdot T^2 - 0,39345 \cdot T + 1033,79$ [кг/м³]]

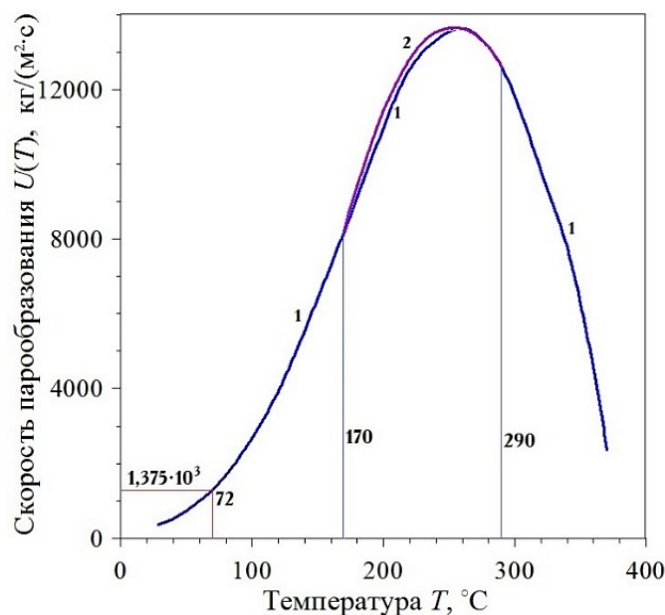


Рисунок 3 – Зависимость скорости испарения водяного пара дистиллированной воды от температуры (1)
 [Dependence of water vapor evaporation rate in distilled water on temperature (1)]

Результаты расчета в области $T \leq 100$ °C хорошо согласуются с данными эксперимента работы [8], (2) аппроксимация выделенной области температур $170 \leq T \leq 290$ °C параболой: $a_n T^2 + b_n T + c_n$ при $a_n = -0,7921$; $b_n = 401,0046$; $c_n = -37083,2407$ [The calculation results in the range of $T \leq 100$ °C are in good agreement with the experimental data of [8]. (2) approximation of the selected temperature range $170 \leq T \leq 290$ °C by a parabola: $a_n T^2 + b_n T + c_n$ при $a_n = -0,7921$; $b_n = 401,0046$; $c_n = -37083,2407$]

Поэтому среднее значение плотности, представленное в знаменателе подкоренного выражения в формуле (3), можно представить в виде:

$$\bar{\rho}_b(L_0) = \frac{1}{L_0} \int_0^{L_0} \rho_b(T(x)) dx = \frac{a}{3} \left[3T_0^2 + 3b_t T_0 \frac{L_0}{L_s} + b_t^2 \frac{L_0^2}{(L_s)^2} \right] + \frac{b}{2} \left[2T_0 + b_t \frac{L_0}{L_s} \right] + c, \quad (4)$$

где $a = -0,002315$; $b = -0,39345$; $c = 1033,79$.

Таблица 2 – Значение удельной теплоты парообразования воды как функция температуры [Specific heat of water vaporization as a function of temperature]

Температура °C	Удельная теплота парообразования $\Lambda(T)$, МДж/кг	Температура °C	Удельная теплота парообразования $\Lambda(T)$, МДж/кг
0	2,45	250	1,71
50	2,38	300	1,38
100	2,26	350	0,88
150	2,12	374	0
200	1,96	-	-

Зависимости скорости испарения как функции температуры $u_s(T)$ кг/м²·с, определяющей в уравнении (1) уменьшение массы воды или её плотности, в диапазоне температур $29 \leq T \leq 100$ °C представлена в работе [8]. В более широком диапазоне зависимость $u_n(T)$ может быть получена по формуле (5) Клапейрона-Клазиуса (рис. 3), согласно которой резкий спад $u_s(T)$ в области высоких температур обусловлен уменьшением удельной теплоты парообразования $\Lambda(T)$, также зависящей от температуры (табл. 2):

$$u_n(T) = u_n(T_0) \cdot \exp \left[-\frac{\Lambda(T)}{R} \left(\frac{T_0 - T}{T T_0} \right) \right], \quad (5)$$

где T_0 – начальная температура. Полная зависимость $\Lambda(T)$ в диапазоне температур $0 \leq T \leq 374$ °C приводится в таблице 2.

Решение уравнения (2) определяется выражением:

$$\rho_b(x, T) = \frac{L_n}{b_t} \sqrt{\frac{N \bar{\rho}_b}{2 P_{\text{гр}}}} \left\{ \frac{G}{V_b} T(x) - \frac{S_b}{V_b} \int_{T(0)}^{T(x)} u_n(T') dT' \right\} + C, \quad (6)$$

где постоянная C определяется через начальное условие, т.е. через значение плотности воды или через параболическую зависимость плотности воды от температуры $\rho_b(T)$:

$$\rho_b(T_0) - \frac{L_s}{b_t} \sqrt{\frac{N \bar{\rho}_b}{2 P_{\text{гр}}}} \frac{G}{V_b} T(0) = C,$$

а давление воды – выражением:

$$P_b[T(x)] = \rho_b[T(x)] \bar{v}_b^2 / 2. \quad (7)$$

Поскольку плотность пара является сложной функцией температуры, обусловленной температурной зависимостью скорости испарения воды $u_n(T)$, (5) и скоростью переноса пара в паропроводе $v_n(T)$, которые, в свою очередь, зависят от координаты x , то при формулировке уравнения переноса пара в трубопроводе поступим аналогичным образом, как и при решении уравнения (2).

В качестве оценки скорости переноса пара можно воспользоваться формулой Сен-Венана, определяющей истечение газа из резервуара в атмосферу как функции его температуры и давления [9, 10].

$$v_n(L) = \sqrt{[2k/(k-1)]RT_n(L)[1 - P_{ат}/P_n]^{k-1}}, \quad (8)$$

где k – постоянная адиабаты водяного пара; R – газовая постоянная (Дж/кг·К); $T_n(L)$ – температура пара на выходе из паропровода (°К); $P_{ат}$ – атмосферное давление; P_n – давление пара на выходе из паропровода, МПа. Тогда, учитывая, что отношение указанных функций $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ также зависит от температуры (см. рис. 4), уравнение переноса пара в трубопроводе можно записать следующим образом:

$$\frac{d\rho_n}{dT} = \varphi(T) \frac{S_n \cdot L_s}{V_n \cdot b_t} - \frac{\rho_n \cdot L_s}{(L_s - L_0) \cdot b_t}, \quad (9)$$

где S_n – площадь парообразования ($S_n \approx 2\pi R_0 L_0$); $\tau_n = L/v_n$ – время «жизни» пара в паропроводе*; L – длина паропровода. Температурная зависимость функций $u_n(T)$, $v_n(T)$ и их отношения $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ в диапазоне $170 \leq T \leq 290$ °С приведена на рисунках 3, 4 соответственно. Начальное условие определяется, исходя из следующих соображений.

Значение плотности пара в пограничной области $\rho_n(L_0)$, т.е. при $x = L_0$, можно найти, используя условия равенства давления воды и пара в этой области при заданной температуре, т.е. $P_w|_{x=L_0} = P_n|_{x=L_0}$. Поскольку давление воды при найденной зависимости плотности воды от температуры и координаты x , определенно выражением (7) то, рассматривая пар как идеальный газ и используя уравнение Клапейрона-Менделеева, найдём, что:

$$\rho_n[T(x)]|_{x=L_0} = \rho_w[T(x)]\bar{v}_w^2/2RT(x)|_{x=L_0}, \quad (10)$$

где $\bar{v}_w = \text{const.}$, определенная формулой (3), зависимость $T(x)$ – выражением (1), а $\rho_w[T(x)]$ – формулой (7). Пренебрегая потерями тепла в металлической трубе паропровода, будем полагать, что температурное распределение в паре паропровода будет определяться распределением вида (1), которое и будет определять температурную зависимость пара.

Функция $\varphi(T)$ также может быть аппроксимирована параболой $\varphi(T) = a_f T^2 + b_f T + c_f$ с относительной погрешностью температурной зависимости в интересующем нас диапазоне не хуже 1% (рис. 4), где $a_f = -0,5524 \cdot 10^{-3}$; $b_f = 0,2717515$; $c_f = -24,13445$.

* При понижении температуры время жизни пара будет определяться временем, которое необходимо для его конденсации, т.е. будет зависеть от температуры среды

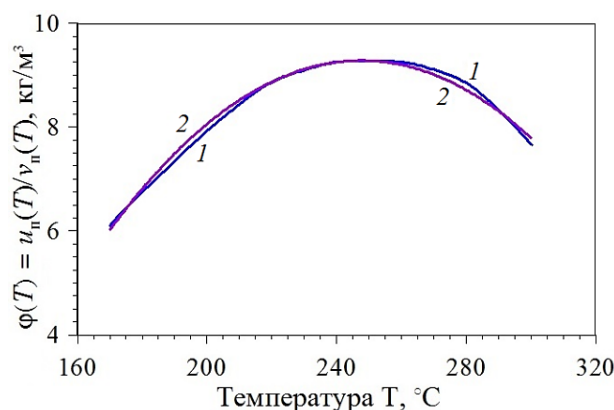


Рисунок 4 – Температурная зависимость отношения функций $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ (1), кг/м³ и аппроксимация отношения параболой (2) [Temperature dependence of the ratio of functions $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ (1), kg / m³ and approximation of the ratio by a parabola (2)]

Подобная процедура позволяет существенно упростить решение уравнения (9) и найти достаточно простое аналитическое выражение для анализа его решения.

$$\rho_n(T) = \frac{2L_0}{R_0(L_s - L_0)} \frac{L_s}{b_t} \left\{ a_f \left[\frac{T^2}{\alpha} - \frac{2T}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha^3} \right] + b_f \left[\frac{T}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right] + \frac{c_f}{\alpha} - a_f \left[\frac{T_0^2}{\alpha} - \frac{2T_0}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha^3} \right] \exp[\alpha(T_0 - T)] - \right. \\ \left. - b_f \left[\frac{T_0}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right] \exp[\alpha(T_0 - T)] - \frac{c_f}{\alpha} \exp[\alpha(T_0 - T)] \right\} + \rho_n(T_0) \exp[\alpha(T_0 - T)], \quad (11)$$

где $\alpha = L_s/[b_t(L_s - L_0)]$, а зависимость $T(x)$ определена формулой (2) и $T_0 \equiv T(x = L_0)$.

Таким образом, для $x = L_0$ в соответствии с формулой (2) и решением уравнения (9) получаем выражение для значения плотности пара $\rho_n(L_0)$ в пограничной области, что позволяет записать окончательное уравнение для граничного условия (10) и, в конечном итоге, найти искомое значение параметра L_0 , определяющего координату x возможной протечки в паропроводе парогенератора.

$$R\rho_n(L_0) \cdot \frac{(T_0 + 273) \cdot L_s + b_t \cdot L_0}{L_s} + \frac{L_s}{R_0 b_t} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{гп}}}{N\bar{\rho}_B}} \cdot \int_{T_0}^{T(L_0)} u_n(T') dT' = \sqrt{\frac{P_{\text{гп}}}{2N\bar{\rho}_B}} \cdot \frac{G}{\pi R_0^2} + \frac{P_{\text{гп}}}{N\bar{\rho}_B} \cdot \rho_n(L_0). \quad (12)$$

Температурная зависимость функций $u_n(T), v_n(T)$ и их отношения $\varphi(T) = u_n(T)/v_n(T)$ в диапазоне $170 \leq T \leq 290$ °C приведены на рисунках 3 и 4 соответственно.

$$\int_{T_0}^{T(L_0)} u_n(T') dT' = b_t \cdot \frac{L_0}{L_s} \cdot \left\{ \frac{a_n}{3} \cdot [T(L_0)^2 + T(L_0) \cdot T_0 + T_0^2] + \frac{b_n}{2} \cdot [T(L_0) + T_0] + c_n \right\}.$$

Решение уравнения (12) находили графическим методом, строя графики зависимостей функций левой $U_l(L_0)$ и правой $U_r(L_0)$ его частей (рис. 5), определяемых соответственно выражениями:

$$U_l(L_0) = \rho_n(L_0) \cdot R \cdot \frac{(T_0 + 273) \cdot L_s + b_t \cdot L_0}{L_s} + \frac{L_s}{R_0 b_t} \cdot \sqrt{\frac{2P_{\text{гп}}}{N\bar{\rho}_B}} \cdot \int_{T_0}^{T(L_0)} u_n(T') dT'$$

$$U_r(L_0) = \sqrt{P_{\text{гр}} / 2N\bar{\rho}_B} \cdot \frac{G}{\pi R_0^2} + \frac{P_{\text{гр}}}{N\bar{\rho}_B} \cdot \rho_B(L_0).$$

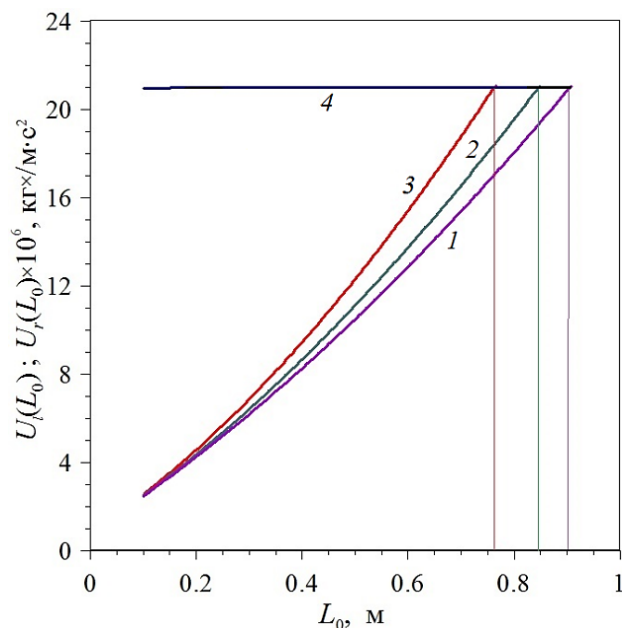


Рисунок 5 – Расчетная длина водного участка в парогенераторе второго контура реактора КЛТ-40. Функции $U_r(L_0)$ для $L_s = 20$ (1), 15 (2), 10 (3) м и $U_r(L_0) = \text{const}$ (4); $P_{\text{гр}} = 6,4$ Мпа [Estimated length of the water section in the second loop steam generator of the KLT-40 reactor. Functions $U_r(L_0)$ for $L_s = 20$ (1), 15 (2), 10 (3) м и $U_r(L_0) = \text{const}$ (4); $P_{\text{гр}} = 6.4$ MPa]

Значение активности радиоактивного азота ^{16}N , содержащегося в паровой фазе и выходящего на турбину $Q_N(L)$, может быть определено путём её измерения на выходе за определённый промежуток времени τ_n , за который определяют и выход пара m_n (воды). Тогда отношение $Q(L)/m_n(L) = \alpha_N$, определит размерный коэффициент α_N (Ки/кг), в области выхода пара на турбину, т.е. при $x = L$. При этом значение объёмной активности радиоактивного азота ^{16}N Q_{V0} (Ки/м³) при его генерации через микротрещины, возникающие в пограничной области вода-пар паропровода, будет определяться объёмной активностью в объёме парогенератора (см. рис. 1). Поскольку величина Q_{V0} тоже неизвестна, то общее произведение мощности «вброса», определяемое формулой:

$$P_B = Q_V \cdot G_N,$$

где G_N – секундный расход «вброса» [м³/с];

Q_V – объёмная активность радиоактивного азота [Ки/м³], будет в общем случае представлять собой искомую постоянную P_B .

В этом случае перенос радиоактивного азота ^{16}N в паропроводе может быть описан уравнением вида:

$$\frac{dQ_N}{dt} = P_B \left\{ \eta \left[x - (L_0 - l_{vr} / 2) \right] - \eta \left[x - (L_0 + l_{vr} / 2) \right] \right\} + \frac{\bar{v}_n V_n \alpha_N}{(L_s - L_0)} \left[\rho_n(T) - \phi(T) \frac{2L_0}{R_0} \right] - \lambda Q_N, \quad (13)$$

где L_0 – длина водопровода.

В уравнении (13) первый член в правой части описывает генерацию радиоактивного азота ^{16}N в пограничной области вода-пар шириной $l_{vr} \ll L_0$;

$\eta(x)$ – единичная функция; второй – убыль радиоактивного азота, содержащегося в паре, за счёт выноса последнего по паропроводу на турбину, третий – убыль радионуклида за счёт радиоактивного распада азота ^{16}N с постоянной распада λ , решение которого при $L_0 \leq x \leq L_s$ принимает вид:

$$Q_N(x, t) = \left\{ P_n \{ \eta[x - (L_0 - l_{vr}/2)] - \eta[x - (L_0 + l_{vr}/2)] \} + \frac{\bar{v}_n V_n \alpha_N}{(L_s - L_0)} \left[\rho_n(T) - \varphi(T) \frac{2L_0}{R_0} \right] \right\} \frac{[1 - \exp(-\lambda t)]}{\lambda} + Q_N(L_0) \exp(-\lambda t), \quad (14)$$

в котором температура зависит от x в соответствии с формулой (2), а постоянная $Q_N(L_0)$ подлежит определению. При найденной функции активности пара $Q_N(x, t)$ и плотности пара, определяемой формулой (11), целесообразно уточнить ранее введённый параметр α_N , который можно получить при выходе пара из паропровода в точке $x = L_s$ ($T_s = T_0 + b_t$ °C), исключая протечку, поскольку $P_n(x) \notin [(L_0 + l_{vr}/2) \leq x \leq L_s]$, в момент времени, соответствующий выходу пара из паропровода* $t = \tau_n = (L_s - L_0)/\bar{v}_n$ при $P_{гр} = 6,4$ МПа, $L_s = 20$ м, $L_0 = 0,9063$ м, $\bar{k} = 1,303$ и

$$\bar{v}_n = \frac{2}{3} \left[\frac{(T(L_s))^{3/2} - (T(L_0))^{3/2}}{T(L_s) - T(L_0)} \right] \cdot \sqrt{\frac{2\bar{k}}{\bar{k} - 1}} \cdot R \cdot \left[1 - \frac{P_{ат}}{P_n} \right]^{\frac{\bar{k}-1}{\bar{k}}} = 1,415 \cdot 10^3 \text{ м/с}. \quad (15)$$

$$\alpha_N = \frac{Q_N[(L_s - L_0), \tau_n]}{m_n(L_s - L_0)} = \frac{\bar{v}_n V_n \alpha_N}{(L_s - L_0)} \frac{\left[\rho_n(T_s) - \varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_0} \right] [1 - \exp(-\lambda \tau_n)]}{V_n \cdot \rho_n(T_s)} + \frac{Q_N(L_0) \exp(1 - \lambda \tau_n)}{V_n \cdot \rho_n(T_s)}, \quad (16)$$

где v_n определена формулой (8), \bar{v}_n – своим средним значением, $\rho_n(T_s)$ – формулой (11), L_0 – решением уравнения (12), а постоянная λ – периодом полураспада азота ^{16}N $\lambda = 0,693/T_{1/2}$. Из формулы (16) находим выражение для параметра α_N [Ки/кг], которое позволяет определить искомое значение активности азота $Q_N(L_0)$ в пограничной области вода-пар паропровода.

$$\alpha_N = Q_N(L_0) \exp(-\lambda \tau_n) / \left\{ V_n \rho_n(T_s) + \frac{\bar{v}_n V_n}{(L_s - L_0)} \left[\varphi(T_s) \frac{2L_0}{R_0} - \rho_n(T_s) \right] \frac{[1 - \exp(-\lambda \tau_n)]}{\lambda} \right\}, \quad (17)$$

Величину параметра α_N можно, например, оценить путем измерения мощности дозы, создаваемой γ -излучением азота ^{16}N , из ее математического выражения найти объемную активность и далее найти указанные параметры. С этой целью найдем мощность дозы γ -излучения азота ^{16}N при выходе пара в воздушную среду с образованием сферического облака диаметром $l = v_0 \cdot \tau_n$, где v_0 – скорость распространения пара в воздухе, которая по данным измерений составляет от 6 до 50 м/с; τ_n – время прохождения пара в паропроводе длиной $L = L_s - L_0$, оценка которого при использовании формулы (15) составляет величину $\tau_n \sim 13 \cdot 10^{-3}$ с. Далее

* Скорость пара при его выходе из паропровода при указанных на рисунке 1 значениях температуры и давления, согласно оценкам, составляет ~1512 м/с. При таких скоростях выхода пара на рабочие лопатки турбины развивалась бы очень высокая радиальная скорость турбины, что повлекло бы значительный рост центробежной силы, которая бы привела к колоссальному росту напряжений в диске турбины и особенно рабочих лопатках, что привело бы к превышению допустимых напряжений указанных конструкций и, как следствие, к их разрушению. Эти возможные эффекты и приводят к необходимости снижению давления и температуры пара, путем использования соответствующих технических решений. Энергетика. ТЭС и АЭС. Паровая турбина Всё о тепловой и атомной энергетике. <https://tesiaes.ru/?p=8414>

воспользуемся формулой мощности дозы от виртуального шарового источника с равномерно распределенными по объему изотропными точечными источниками с удельной активностью $Kи/м^3$ без учета многократного рассеяния при условии $\mu r \ll 1$, μ – коэффициент линейного ослабления γ -излучения; $r = l/2$ – радиус сферы; $D'_{sf} = 2\pi K_\gamma Q_V(L) \cdot l$ [11], где D'_{sf} – измеряемая величина мощности дозы (мЗв/ч) в выделенном сферическом объеме радиоактивного пара $V_{sf} = \pi l^3/6$; $K_\gamma = 14,652$ [мЗв·м²/ч·Ки] – γ -постоянная азота ^{16}N [12], $Q_V(L)$ – виртуальная объемная активность радионуклида ^{16}N (Ки/м³) на выходе из паропровода, возникающая за указанный промежуток времени τ_n , определяемая отношением: $Q_V(L) = D'_{sf} / 2\pi K_\gamma \cdot l$. Используя решение (11), находим значение плотности пара ($\rho_n(L) = 509,87$ кг/м³), а его массу на выходе из паропровода в точке $x = L$ определим как $m_n(L) = V_n \cdot \rho_n(L) = \pi R_0^2 L \cdot \rho_n(L)$, ($m_n(L) = 10,905$ кг). При этом параметр α_N (Ки/кг), оценку которого получили на основе измерений мощности дозы, создаваемой γ -излучением азота ^{16}N , находящимся в облаке пара, принимает вид:

$$\alpha_N = Q_V(L) \cdot V_{sf} / m_n(L) = D'_{sf} \cdot l^2 / (12\pi K_\gamma \cdot R_0^2 \cdot L \cdot \rho_n(L)). \quad (18)$$

Если принять, что в результате протечки, радиоактивный пар, выходящий из паропровода, создает мощность дозы сравнимую с радиационным фоном реактора 500 мкР/ч, то при заданных остальных параметрах и $v_0 = 50$ м/с, величина α_N составит $1,102 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг и линейно будет возрастать или уменьшаться в соответствии с мощностью реактора. Оценку массы пара, выходящего из паропровода, можно получить и из других соображений, определяя эту величину как среднюю массу \bar{m}_n пара со средней плотностью $\bar{\rho}_n$ и объемом $\pi R_0^2 \bar{v}_n \cdot \tau_n$, выходящего из паропровода за время τ_n со средней скоростью $\bar{v}_n = 1415$ м/с. В этом случае масса пара составит 6,976 кг, а величина α_N увеличится до $1,723 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг, т.е. эффективное значение параметра α_N будет находится в диапазоне $1,1 \cdot 10^{-6}$ – $1,7 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг. Таким образом, по определенной формулой (18) величине α_N , из формулы (17) можно найти активность азота ^{16}N в пограничной области паропровода $Q_N(L_0)$, среднее значение которой при заданных параметрах составит $1,728 \cdot 10^{-5}$ Ки, а объемная активность $Q_V(L_0) = Q_N(L_0) / \pi R_0^2 l_{vr} = 0,55$ Ки/м³.

Сравнивая измеренную величину мощности дозы, создаваемой γ -излучением азота ^{16}N в некоторой точке $P(x_0, y_0, z_0)$ на выходе пара на турбину, и, её математическое выражение, определяемое формулой (19), найдем искомую величину протечки P_B :

$$D'_N(L, L/\bar{v}_n) = KE_{\gamma, N} v_N (E_{\gamma, N}) \mu_a \cdot (\bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}}) S_n \int_{L_0 - l_{vr}/2}^{L_s} Q_V(x, t) \frac{\exp[-\mu \cdot (\bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}}) (x - L_0)]}{(x - L_0)^2} dx, \quad (19)$$

где $Q_V(x, t) = Q_N(x, t) / \pi R_0^2 L$, а $Q_N(x, t)$ определена формулой (14), а множитель $(\bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}})$; $\bar{\rho}_{\text{пар}} = \left(\int_0^L \rho_n(x) dx \right) / L$ при коэффициентах линейного ослабления μ и передачи энергии μ_a в формуле (19) учитывает особенности переноса γ -излучения в паре, в момент времени его прохождения по паропроводу $\tau_n = L / \bar{v}_n$.

$$P_B = \left\{ \left[D'_N(L, L/\bar{v}_n) \cdot (L_s - L_0) \right] / \left[KE_{\gamma, N} v_N (E_{\gamma, N}) \mu_a \cdot (\bar{\rho}_{\text{пар}} / \rho_{\text{возд}}) S_n \right] - (B_2 \times A_2 + B_3 \times A_3) \right\} / (B_1 \cdot A_1), \quad (20)$$

$$\text{где } A_1 = \left\{ -\frac{\exp[a(l_{vr}/2)]}{l_{vr}/2} + aEi[a(l_{vr}/2)] - \frac{\exp[-a l_{vr}/2]}{l_{vr}/2} + aE_1[-a l_{vr}/2] \right\};$$

$$A_2 = \left\{ \frac{\exp[(a+b)(l_{vr}/2)]}{-l_{vr}/2} + (a+b) \times Ei[(a+b)(l_{vr}/2)] - \frac{\exp[-(a+b)L]}{L} + (a+b)E_1[(a+b)L] \right\};$$

$$A_3 = \left\{ \frac{\exp[a(l_{vr}/2)]}{-l_{vr}/2} + aEi[a(l_{vr}/2)] - \frac{\exp[-aL]}{L} + aE_1[aL] \right\}; \quad B_1 = \left\{ \frac{1 - \exp(-\lambda L/\bar{v}_n)}{\lambda \cdot \pi R_0^2 L} \right\};$$

$$B_2 = \left\{ \bar{v}_n \alpha_N V_n \frac{[1 - \exp(-\lambda L/\bar{v}_n)]}{\lambda \cdot \pi R_0^2 L (L_s - L_0)} \left[\bar{p}_n(T) - \bar{\varphi}(T) \frac{2L_0}{R_0} \right] \right\}; \quad B_3 = [Q_N(L_0)/\pi R_0^2 L] \cdot \exp(-\lambda \cdot L/\bar{v}).$$

С другой стороны P_B может быть определено формулой [13]:

$$P_B = Q_V \cdot G_N, \quad (21)$$

где $G_N = 2\pi R_0 l_{vr} \cdot U_T$ – секундный расход «вброса» [м³/с];

Q_V – объёмная активность радионуклида, в частности, радиоактивного азота [Ки/м³]. Секундный расход G_N «вброса» радиоактивного азота ^{16}N в паровую фазу в пограничной области вода-пар представляет собой произведение площади пограничной области паропровода $S_{\text{пг}} = 2\pi R_0 l_{vr}$, где $l_{vr} = \Delta L_0$ – ширина пограничной области вода-пар* (water-vapour region) (табл. 3), на скорость выхода радиоактивного азота из трещин U_T , являющейся искомой величиной.

Таблица 3 – Длина водного участка парогенератора L_0 , м [Length of the steam generator water section L_0 , m]

$P_{\text{гр}}$, МПа		6,24	6,4	6.56
L_s , м	10	0,7534	0.7636	0,7739
	20	0,8944	0,9063	0,9124
Максимальная разность «хода» воды в водопаропроводе ΔL_0 , м				
L_s , м	10	0,0205		
	20	0,024		

Из выражения (21) при найденном $Q_V(L_0)$ нетрудно найти значение секундного расхода ($G_N = 2\pi R_0 l_{vr} \cdot U_T$) или скорости «вброса» U_T радиоактивного азота ^{16}N из первого контура в паропровод второго. При вычислении параметра P_B ширину протечки l_{vr} , как указывалось ранее, находят по разности «хода» воды ΔL_0 , используя показания расходомера или манометра (см. результаты расчетов в табл. 3), а начальную объёмную активность $Q_V(L_0)$ азота ^{16}N в области его генерации – по формулам (17), (18) при оценке параметра α_N . Расчетные оценки мощности «вброса» P_B , в рамках рассматриваемой модели дают величину $P_B \approx 2 \cdot 10^{-4}$ Ки/с. Тогда при объёмной активности области протечки $Q_V(L_0)$ равной 0,55 Ки/м³ секундный расход или «вброс» радиоактивного азота в пограничную область парогенератора составит $G_N = P_B/Q_V(L_0) = 3,64 \cdot 10^{-4}$ м³/с, а $U_T = 0,116$ м/с.

Предполагая, аналогично работе [1], линейную зависимость объёмной активности протечки азота ^{16}N от мощности реактора, отметим, что результаты измерений мощности дозы D'_N , создаваемой радиоактивным азотом ^{16}N при его выходе на

* Если водо-паропровод изготовлен в виде спирали радиусом $R_{\text{сп}}$ с шагом $h_{\text{сп}}$, то при длине пограничной области вода-пар равной ΔL_0 , площадь этой области $S_{\text{пг}}$ определится выражением: $S_{\text{пг}} = (\Delta L_0/h_{\text{сп}}) \cdot 4\pi^2 R_{\text{сп}}(R_{\text{ин}} + R_{\text{ек}})/2$, где $R_{\text{ин}}, R_{\text{ек}}$ – внутренний и внешний радиусы трубки водо-паропровода соответственно.

турбину, также будут обладать указанным свойством, а потому этим свойством будет обладать и найденный параметр P_v .

Поскольку измерение мощности дозы D'_N , создаваемой радиоактивным азотом ^{16}N при его выходе на турбину, является одной из ключевых процедур при оценке протечки, эти измерения необходимо проводить, используя детекторы γ -излучения с высоким температурным диапазоном их работы [14], что позволит уменьшить погрешность измерения указанной величины и, в конечном итоге, мощности «вброса» P_v .

Таким образом, проводя измерения мощности дозы при выходе пара на турбину и измеряя в этой точке объёмную активность ^{16}N и массу пара за время прохождения τ_n по паропроводу, определяя ширину пограничной области l_{gr} – по показанию расходомера, а также давление, температуру пара и воды, на основе предложенной модели и метода расчета, можно оценить протечку азота ^{16}N во второй контур из первого, определить величину выброса радиоактивного азота ^{16}N на турбину при любой мощности реактора, минимизировать протечку путём выбора соответствующих сплавов, используемых для паропроводов в парогенераторе, и, наконец, разработать соответствующие меры радиационной безопасности [4]. Результаты расчетов, представленные в работе, могут быть существенно уточнены путем использования реальных результатов измерений, которые, в свою очередь, требуют проведения экспериментальных исследований, затраты на которые полностью себя оправдают, определяя условия работ безопасных с точки зрения специалистов, контролирующих выполнение норм радиационной безопасности (НРБ) на предприятиях и соответствующем транспорте, где используются подобные реакторы. Решение этой сложной задачи авторы видят в объединении усилий специалистов Морфлота, занимающихся непосредственной эксплуатацией реакторов КЛТ-40, специалистов КБ им. И.И. Африкантова, имеющих громадный опыт по разработке такого типа реакторов, и авторов, предлагающих уникальную методику оценки протечки и области ее возникновения на спиральном паропроводе, представленную в виде патента и его дальнейшей реализации.

Результаты работы могут представлять интерес для подразделений, занимающихся проблемами радиационной безопасности на объектах использования атомной энергии, проектных организаций, занимающихся разработкой проектов парогенераторов для АЭС и плавсредств, использующих подобные атомные реакторы. В силу значимости и актуальности работы, обусловленной обновлением ледокольного флота России, авторы находят целесообразным проведения модельных экспериментов, позволяющих уточнить ряд дозиметрических характеристик, определяющих расчетные параметры модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов, Е.А.* Модель накопления радионуклидов в котловой воде парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и -1000 / Е.А. Иванов, И.В. Пырков, Л.П. Хамьянов. – Атомная энергия. – 1994. – Т. 77, вып. 1. – С. 58-63.
2. *Иванов, Е.А.* Методика диагностики протечки теплоносителя первого контура в котловую воду парогенераторов АЭС с ВВЭР-440 и -1000 / Е.А. Иванов, И.В. Пырков, Л.П. Хамьянов. – Атомная энергия. – 1994. – Т. 77, вып. 1. – С. 51-58.
3. Методика расчета протечки теплоносителя первого контура в воду парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000 : (типовая) : РД ЭО 0334-02: руководящий документ / Министерство Российской Федерации по атомной энергии, Концерн «Росэнергоатом». – Москва, 2001.
4. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/902170553>.
5. *Гусев, Н.Г.* Квантовое излучение радиоактивных нуклидов. Справочник / Н.Г. Гусев, П.П. Дмитриев. – Москва : Атомиздат, 1997. – 400 с.

6. Деев, В.И. Основы расчета судовых ЯЭУ / В.И. Деев, Н.В. Щукин, А.Л. Черезов. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. – 256 с.
7. Никитин, А. Плавающие атомные станции / А. Никитин, Л. Андреев. – Доклад объединения Bellona. – 2011. – 48 с.
8. Воробьев, И.Н. Экспериментальные исследования по определению значений скорости испарения и кипения жидкостей / И.Н. Воробьев, А.А. Хашченко. – URL : https://nauchforum.ru/archive/mnf_nature/2.pdf (дата обращения: 16.01.2019).
9. Елохин, А.П. Метод оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40 / А.П. Елохин, С.Н. Федорченко. – Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 3(32). – С. 7-23.
10. Сарданашвили, С.А. Расчётные методы и алгоритмы (трубопроводный транспорт газа) / С.А. Сарданашвили. – Москва : Нефть и газ, 2005. – 577 с.
11. Кимель, Р.Р. Защита от ионизирующих излучений. Справочник / Р.Р. Кимель, В.П. Машкович. – Москва : Атомиздат, 1966. – 311 с.
12. Способ оценки протечки радиоактивного азота $^{16}\text{N}_7$ в парогенераторах, используемых на ядерных реакторах типа КЛТ-40 / А.П. Елохин, С.Н. Федорченко. // Патент №2754755 Бюл. №25 от 07.09.2021. Приоритет от 31.12.2020.
13. Елохин, А.П. Методы и средства систем радиационного контроля окружающей среды : монография / А.П. Елохин. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2014. – 520 с.
14. Елохин, А.П. Метод экспресс-оценки средней энергии спектра γ -излучения радионуклидов в условиях радиационных аварий в помещениях спецкорпуса АЭС / А.П. Елохин, А.И. Ксенофонов, И. Алалем, С.Н. Федорченко. – глобальная ядерная безопасность. – 2018. – №2(27). – С. 7-15.

REFERENCES

- [1] Ivanov E.A., Pyrkov I.V., Khamyanov L.P. Model' nakopleniya radionuklidov v kotlovoj vode parogeneratorov AE'S s VVE'R-440 i -1000 [Model of Radionuclides Accumulation in Boiler Water of Steam Generators of NPP with WVER-440 and -1000]. Atomnaya e'nergiya [Atomic Energy]. 1994. Vol. 77, issue 1. P.58-63 (in Russian).
- [2] Ivanov E.A., Pyrkov I.V., Khamyanov L.P. Metodika diagnostiki protechki teplonositelya pervogo kontura v kotlovuyu vodu parogeneratorov AE'S s VVE'R-440 i -1000 [Diagnostic Technique of the Primary Coolant Leakage into the Boiler Water of Steam Generators of NPPs with WVER-440 and -1000]. Atomnaya e'nergiya [Atomic Energy]. 1994. Vol. 77, issue 1. P.51-58 (in Russian).
- [3] Metodika rascheta protechki teplonositelya pervogo kontura v vodu parogeneratorov AES s VVER-1000: (tipovaya): RD EO 0334-02: rukovodnyashchiy document [Methodology for calculating the leakage of the primary coolant into the water of steam generators of NPPs with VVER-1000: (typical): RD EO 0334-02: guidance document]. Ministerstvo Rossiyskoy Federatsii po atomnoy energii, Kontsern «Rosenergoatom» [Ministry of the Russian Federation for Atomic Energy, Rosenergoatom Concern]. Moskva [Moscow]. 2001 (in Russian).
- [4] Normy' radiacionnoj bezopasnosti NRB-99/2009. Sanitarny'e pravila i normativy' SanPiN 2.6.1.2523-09. [Standards of Radiation Safety NRB-99/2009. Sanitary Rules and Regulations SanPiN 2.6.1.2523-09]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902170553> (in Russian).
- [5] Gusev N.G., Dmitriev P.P. Kvantovoe izluchenie radioaktivny'x nuklidov. Spravochnik [Quantum Radiation of Radioactive Nuclides. Reference Book]. Moskva: Atomizdat [Moscow: Atomizdat]. 1997. 400 p. (in Russian).
- [6] Deev V.I., Shchukin N.V., Tcherzov A.L. Osnovy' rascheta sudovy'x YaE'U [Basics of Calculating Ship Nuclear Power Plants] Moskva: NIYaU MIFI [Moscow: NRNU MEPhI]. 2012. 256 p. (in Russian).
- [7] Nikitin A., Andreev L. Plavuchie atomny'e stancii [Floating nuclear power plants]. Doklad ob'edineniya Bellona [Bellona report]. 2011. 48 p. (in Russian).
- [8] Vorob'yov I.N., Khashchenko A.A. E'ksperimental'ny'e issledovaniya po opredeleniyu znachenij skorosti ispareniiya i kipeniya zhidkostej [Experimental Studies to Determine the Values of the Rate of Evaporation and Boiling of Liquids]. URL: https://nauchforum.ru/archive/mnf_nature/2.pdf (reference date 16.01.2019) (in Russian).
- [9] Eloxin A.P., Fedorchenko S.N. Metod ocenki protechki radioaktivnogo azota $^{16}\text{N}_7$ v parogeneratorax, ispol'zuemy'x na yaderny'x reaktorax tipa KLT-40 [Method of Assessing the Leakage of Radioactive Nitrogen $^{16}\text{N}_7$ in Steam Generators Used in Nuclear Reactors of the KLT-40 type]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2019. №3(32). P.7-23 (in Russian).

- [10] Sardanashvili S.A. Raschyotny'e metody' i algoritmy' (truboprovodny'j transport gaza) [Calculation methods and algorithms (pipeline gas transportation)]. Moskva: Neft' i gaz [Moscow: Oil and Gas]. 2005. 577 p. (in Russian).
- [11] Kimel' R.R. Zashhita ot ioniziruyushhix izluchenij. Spravochnik [Protection against Ionizing Radiation. Reference Book]. Moskva: Atomizdat [Moscow: Atomizdat]. 1966. 311 p. (in Russian).
- [12] Elohin A.P., Fedorchenko S.N. Sposob ocenki protechki radioaktivnogo azota $^{16}\text{N}_7$ v parogeneratorax, ispol'zuemy'x na yaderny'x reaktorax tipa KLT-40 [Method of Assessing the Leakage of Radioactive Nitrogen $^{16}\text{N}_7$ in Steam Generators Used in Nuclear Reactors of the KLT-40 Type]. Patent №2754755 Byul. №25 ot 07.09.2021. Prioritet ot 31.12.2020. [Patent No. 2754755 Bul. No. 25 dated 09/07/2021. Priority 31.12.2020] (in Russian).
- [13] Elohin A.P. Metody' i sredstva sistem radiacionnogo kontrolya okruzhayushhej sredy': monografiya [Methods and Tools of Environmental Radiation Monitoring Systems: monograph]. Moskva: NIYaU MIFI [Moscow: NRNU MEPhI]. 2014. 520 p. (in Russian).
- [14] Elohin A.P., Ksenofontov A.I., Alalom I., Fedorchenko S.N. Metod e'kspress-ocenki srednej e'nergii spektra γ -izlucheniya radionuklidov v usloviyax radiacionny'x avariij v pomeshheniyax speczkorpusa AE'S [A method of Rapid Assessment of the Average Energy of the γ -Radiation Spectrum of Radionuclides in Conditions of Radiation Accidents in the Premises of the NPP Special Building]. Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]. 2018. №2(27). P. 7-15 (in Russian).

Calculation and Measurement Method of Evaluating the Leakage of Radioactive Nitrogen $^{16}\text{N}_7$ in Steam Generators of Nuclear Reactors of KLT-40 Type

A.P. Elokhin^{*1}, S.N. Fedorchenko^{**2}

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

¹ORCID iD: 0000-0001-6251-1736

WoS ResearcherID: S-9359-2019

e-mail: orumokenoll@yahoo.com

²ORCID iD: 0000-0002-7682-8504

WoS Researcher ID: G-9573-2017

e-mail: elokhin@yandex.ru

Abstract – The paper analyzes the leakage of the $^{16}\text{N}_7$ nitrogen radionuclide which occurs in the 1st loop of the KLT-40 reactor which is used at marine transport facilities for various purposes through the steam generator of the nuclear reactor into the second loop into which water is supplied under pressure P_b with a temperature $T_b \gg 100$ °C. Radioactive nitrogen spreads in the vapor phase and goes through a spiral steam line to the turbine under high pressure P_{tr} , creating unfavorable conditions from the point of view of radiation safety. The content of the specified radionuclide in steam can be detected and evaluated by γ -spectrometry and dosimetry methods, by measuring the volumetric γ -activity of steam and the dose rate of γ -radiation when the steam enters the turbine. The analysis of the observed leakage effect was carried out on the basis of using a simple physical and mathematical model that takes into account the transfer of water, vapor media and the transfer of radioactive nitrogen in the vapor phase, which made it possible to indicate the cause and determine the area of leakage on the spiral steam pipeline, which was determined from the condition of vapor equality and water pressures in steam line. The paper specifies the main areas of the steam generator design allowing measurements of radiation characteristics and the necessary instrumental equipment taking into account the physical characteristics of the environments in which this equipment will operate in its readings.

Keywords: power reactor, radionuclide, steam generator, pressure, temperature, dose rate, radiation safety.

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

УДК 669.14.018.44 : 621.039.5

**ПЛОТНОСТЬ И КОЭФФИЦИЕНТ ТЕРМИЧЕСКОГО
РАСШИРЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР
ОТ 100-850 °С ДЛЯ РЕАКТОРОВ ВВЭР**

© 2021 А.З. Альхмуд, А.Б. Круглов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В статье представлены результаты исследования плотности стали 12Х18Н10Т и коэффициента термического расширения ТКЛР (α) в диапазоне температур от 100 до 850 °С. Измерения проводились с помощью dilatометра DIL-405 С. Сталь 12Х18Н10Т заменит традиционные оболочковые материалы ТВЭЛ, которые изготавливаются из циркониевого материала. Оболочка из стали 12Х18Н10Т может использоваться в качестве толерантного топлива. Показано, что теплофизические свойства и точные dilatометрические результаты исследований стали 12Х18Н10Т, делают возможным использование стальных оболочек в ТВС РУ ВВЭР. В статье приведены результаты сравнения с аналогичными данными системы ГСССД.

Ключевые слова: толерантное топливо, плотность, коэффициент термического расширения, dilatометр.

Поступила в редакцию 01.09.2021

После доработки 08.10.2021

Принята к печати 15.10.2021

Введение

После ядерных аварий, произошедших в мире, возникла необходимость в изучении и разработке материалов, используемых на атомных электростанциях как наиболее важный материал для защиты в активной зоне ядерных реакторов из циркониевых материалов в легководных реакторах [1]. Циркониевая оболочка взаимодействует с водой в процессе охлаждения реактора, и при высоких температурах сильно реагирует, в результате чего образуется большое количество атомов водорода [2, 3]. Поэтому изучаются термические свойства материалов, которые могут быть использованы в качестве альтернативы циркониевому сплаву.

Измерения ТКЛР (α) были проведены на dilatометре DIL-402 С. Для обеспечения точности измерения теплофизических свойств и использования новых конструкционных материалов необходимы эталонные материалы – вещества с известными и стабильными свойствами для использования их в экспериментальных методиках и для контроля исправности экспериментального оборудования. Измерения были проведены по рабочему эталону dilatометра из Al_2O_3 [4].

Исследование влияния циклов нагрева и охлаждения на ТКЛР образцов из стали 12Х18Н10Т

Измерения термического расширения на dilatометре проводится в два этапа. На первом в dilatометр устанавливается рабочий эталон термического расширения и в исследуемом диапазоне температур проводится регистрация сигнала датчика перемещения и температуры. На втором этапе, выполняемом по температурному режиму первого, измерения проводятся с исследуемым образцом. Результат двух

измерений анализируются с помощью программы Proteus Thermal Analysis [4, 5]. На рисунке 1 представлено влияние циклов нагрева и охлаждения на ТКЛР образцов из стали 12X18H10T.

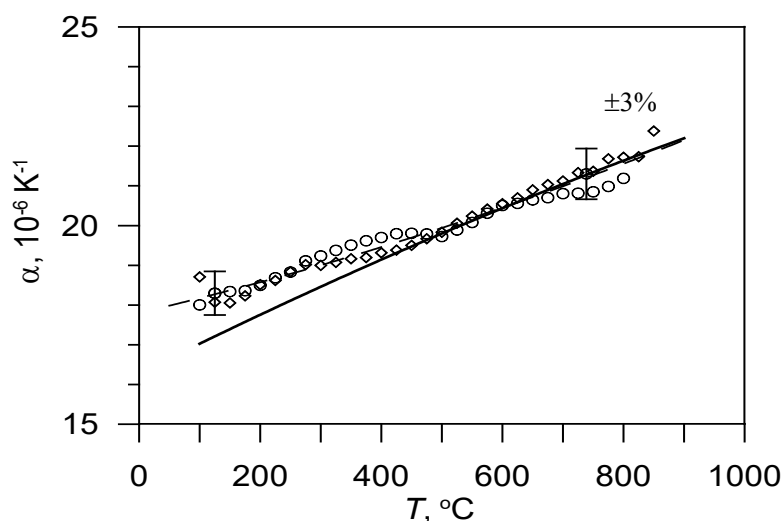


Рисунок 1 – ТКЛР (α) стали 12X18H10T: \circ – один цикл нагрева до $T = 850$ °C; \diamond – 25 циклов нагрева; - - - - - интерполяция результатов измерений; сплошная линия – ТКЛР стали 12X18H10T по данным [6-8] [TEC (α) of steel 12X18H10T: \circ is one heating cycle up to $T = 850$ °C; \diamond is 25 heating cycles; - - - - - is interpolation of measurement results; solid line is TEC of steel 12X18H10T according to [6-8]

На рисунке 2 отражено влияние термоциклирования на ТКЛР стали 12X18H10T.

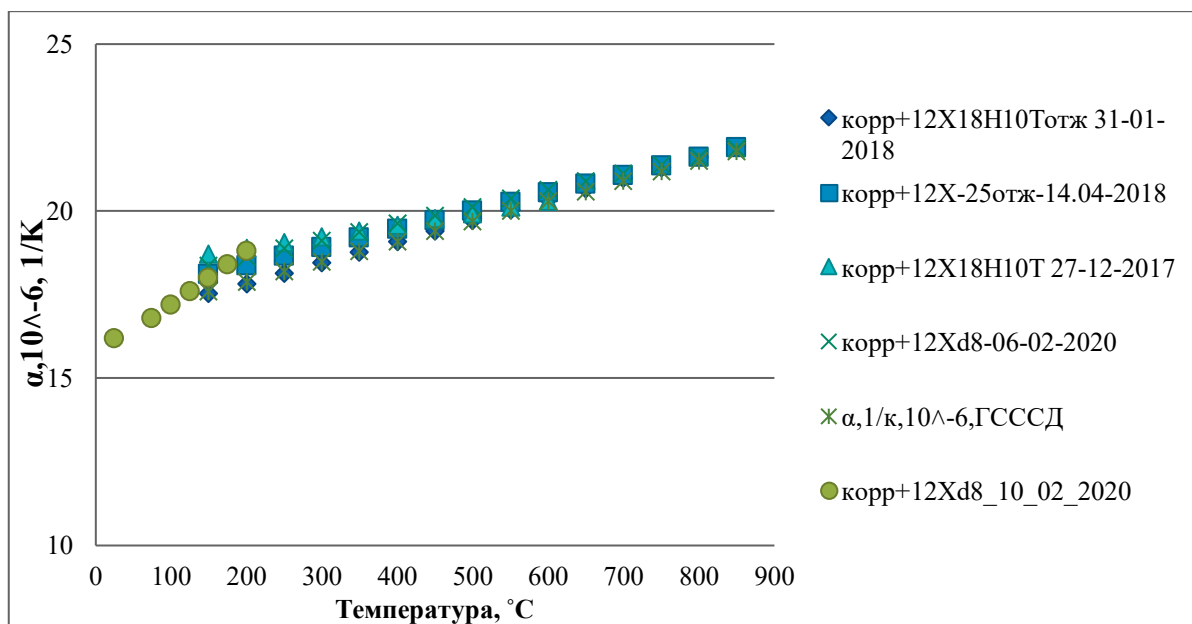


Рисунок 2 – Сравнение данных ТКЛР образца с разницей в год для стали 12X18H10T и данные из ГСССД [Comparison of the TEC data for a sample with a difference in a year for steel 12X18H10T and data from the State Service of Standard Reference Data]

В таблице 1 показана физическая плотность для стали 12X18H10T в интервале температур 100-900 °C. По данным о ТКЛР плотность исследуемого материала рассчитывается по формуле:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \times \left(1 + \int_{T_0}^T \alpha(T) dT\right)^{-3},$$

где $\rho(T_0)=7920 \text{ кг/м}^3$ плотность при температуре $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Таблица 1 – Плотность для стали 12X18H10T в интервале температурах 100-900 °C [Density for steel 12X18H10T in the temperature range 100-900 °C]

Температуры, T °C	Плотность, кг/м ³ , ρ
100	7886
200	7841
300	7796
400	7747
500	7697
600	7646
700	7591
800	7529
900	7471

На рисунке 3 представлена графическая зависимость плотности стали 12X18H10T в интервале температур 100-900 °C.

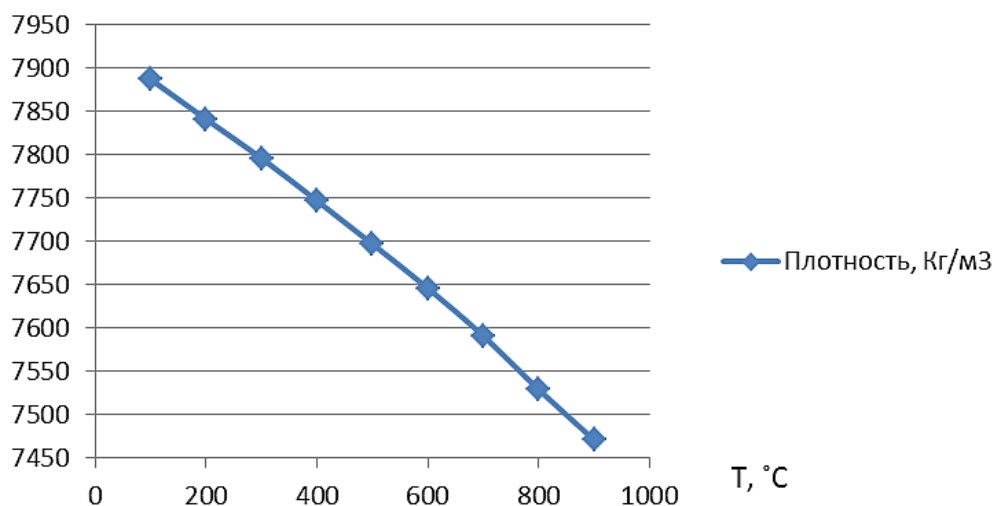


Рисунок 3 – Зависимость плотности стали 12X18H10T в интервале температур 100-900 °C [Dependence of the density of steel 12X18H10T in the temperature range 100-900 °C]

Плотность циркониевого сплава Э-110 составляет $\sim 8000 \text{ кг/м}^3$ [9] при температурах 500°C , а для стали 12X18H10T $\sim 7700 \text{ Кг/м}^3$ при этой же температуре. Эти результаты показывают, что физические свойства материалов близки друг к другу, поэтому они могут быть использованы в ядерных реакторах. Проведен анализ существующих направлений разработки оболочек для толерантного топлива [10-12].

Вывод

Получены новые экспериментальные данные по плотности и коэффициентам термического расширения стали 12X18H10T. Показано хорошее согласие с существующими данными об изменении плотности в исследуемом интервале температур. Испытания стали из 12X18H10T, которые проводились в течение многих лет, показали, что при точных методах измерений, ее коэффициент термического расширения стабилен во времени. Благодаря этому и некоторым другим свойствам

исследованная сталь может быть рекомендована для изготовления и дилатометрии в диапазоне температур 100-850 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов, П.Л. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / П.Л. Кириллов. – Москва : ИздАТ, 2007. – 194 с.
2. Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 116 с.
3. Денисов, В.П. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций / В.П. Денисов, Ю.Г. Драгунов. – Москва : ИздАТ, 2002. – 477 с.
4. Выговский, С.Б. Физические конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, А.А. Семенов, Е.В. Чернов, Л.Н. Богачек. – Москва : НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
5. Походун, А.И. и др. Экспериментальные методы исследований. Измерения теплофизических величин / А.И. Походун, А.В. Шарков. – Санкт-Петербург : СПб ГУ ИТМО, 2006. – 87 с.
6. Группа компаний NETZSCH : официальный сайт www.netzsch.com.
7. Таблицы стандартных справочных данных. Стали 12Х18Н9Т и 12Х18Н10Т. Удельная теплоемкость и удельная энтальпия в диапазоне температур 400-1380К при атмосферном давлении. ГСССД 32-82. – Москва : Издательство Стандартов, 1983.
8. Таблицы стандартных справочных данных. Молибден, монокристаллическая окись алюминия, сталь 12Х18Н10Т. Температурный коэффициент линейного расширения. ГСССД 59-83. – Москва : Издательство Стандартов, 1984.
9. Alhmod A.Z., Kruglov V.B, Internal Report at National Research Nuclear University (MEPhI). – Russia, Moscow, 2019.
10. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., & Kacprzak, L. (1991). Binary Alloy Phase Diagrams (ASM International, Materials Park, OH, 1990), 2983-2986.
11. Savchenko, A.M., Konovalov, Y.V., Laushkin, A.V., & Yuferov, O.I. (2017). Low-Melting Zirconium Alloys. Letters on Materials, 7(3), 229-233.
12. Самойлов, О.Б. Безопасность ядерных энергетических установок / О.Б. Самойлов, Г.Б. Уснин, А.М. Бахметьев. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 280 с.

REFERENCES

- [1] Kirillov, P.L. Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoj tekhniki [Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials]. Moscow: IzdAT, 2007 (in Russian).
- [2] Leskin S.T., Shelegov A.S., Slobodchuk V.I. Fizicheskie osobennosti i konstrukciya reaktora VVER-1000: Uchebnoe posobie. [Physical Features and Design of the WWER-1000 Reactor: Textbook]. Moscow: NRNU MEPhI, 2011. 116 p. (in Russian).
- [3] Denisov V.P., Dragunov Yu.G. Reaktornye ustanovki VVER dlya atomnyh elektrostancij [WWER Reactor Installations for Nuclear Power Plants]. Moscow: IzdAT, 2002 (in Russian).
- [4] Vygovsky S.B., Ryabov N.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek L.N. Fizicheskie konstrukcionnye osobennosti yadernyh energeticheskikh ustanovok s VVER [Physical Design Features of Nuclear Power Plants with VVER]. Moscow: NRNU MEPhI, 2011. 376 p. (in Russian).
- [5] Pokhodun A.I., Sharkov A.V. Eksperimental'nye metody issledovanij. Izmereniya teplofizicheskikh velichin [Experimental research methods. Measurements of Thermophysical Quantities]. St. Petersburg: SPb SU ITMO, 2006. 87 p. (in Russian).
- [6] Gruppa kompanij NETZSCH [NETZSCH Group of Companies]: official website www.netzsch.com.
- [7] Tablicy standartnyh spravocnyh dannyh. Stali 12H18N9T i 12H18N10T. Udel'naya teploemkost' i udel'naya ental'piya v diapazone temperatur 400-1380K pri atmosfernom davlenii. GSSSD 32-82 [Tables of Standard Reference Data. Steel 12X18N9T and 12X18N10T. Specific Heat Capacity and Specific Enthalpy in the Temperature Range 400-1380 K at Atmospheric Pressure. Service of Standard Reference Data 32-82]. Moscow: Publishing House of Standards. 1983 (in Russian).
- [8] Tablicy standartnyh spravocnyh dannyh. Molibden, monokristallicheskaya okis' alyuminiya, stal' 12H18N10T. Temperaturnyj koefficient linejnogo rasshireniya. GSSSD 59-83. [Tables of Standard Reference Data. Molybdenum, Monocrystalline Aluminum Oxide, Steel 12X18H10T. Temperature Coefficient of Linear Expansion. Service of Standard Reference Data 59-83]. Moscow: Publishing House of Standards. 1984 (in Russian).

- [9] Alhmoud A.Z., Kruglov V.B Internal Report at National Research Nuclear University (MEPhI). Russia, Moscow, 2019 (in English).
- [10] Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., & Kacprzak, L. (1991). Binary Alloy Phase Diagrams (ASM International, Materials Park, OH, 1990), 2983-2986 (in English).
- [11] Savchenko, A.M., Kononov, Y.V., Laushkin, A.V., & Yuferov, O.I. (2017). Low-Melting Zirconium Alloys. Letters on Materials, 7(3), 229-233 (in English).
- [12] Samojlov, O.B. i dr. Bezopasnost' yadernyh energeticheskikh ustanovok [Safety of Nuclear Power Plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 280 p. (in Russian).

Density and Coefficient of Thermal Expansion of 12X18H10T Steel in the Temperature Range from 100-850 °C for WWER Reactors

A.Z. Alhmoud¹, A.B. Kruglov²

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

¹*ORCID iD: 0000-0002-8213-1455*

e-mail: ahmad_homoud@yahoo.com

²*e-mail: abkruglov@mephi.ru*

Abstract – The article presents the results of studying the density of steel 12Kh18N10T and the coefficient of thermal expansion TEC (α) in the temperature range from 100 to 850°C. The measurements were carried out using a DIL-405 C dilatometer. Steel 12Kh18N10T will replace traditional TVEL cladding materials, which are made of zirconium material. The cladding made of steel 12X18H10T can be used as a Tolerant fuel. It is shown that the thermophysical properties and accurate dilatometric results of studies of steel 12Kh18N10T make it possible to use steel cladding in fuel assemblies of a WWER reactor. The article presents the results of comparison with similar data from the State Service of Standard Reference Data system.

Keywords: accident tolerant fuel, density, coefficient of thermal expansion, dilatometer.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.4

**ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ
ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ НА
НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС**

© 2021 Г.В. Аркадов*, В.И. Павелко*, В.П. Поваров**, М.Т. Слепов**

* АО «Акционерное общество «Научно-технический центр «Диапром», Обнинск, Калужская обл., Россия

** Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, Нововоронеж,
Воронежская обл., Россия

Техническая диагностика имеет прочные позиции в мировом инженерном сообществе, входит в нормативы и рекомендации как для действующих, так и для проектируемых АЭС. Все зарубежные действующие атомные станции в той или иной мере оснащены средствами технической диагностики реакторных установок либо с момента, либо в ходе модернизаций. Независимо от диагностической архитектуры АСУТП, будь то локальные системы проектов компании Framatom или централизованные системы компании Westinghouse, диагностические алгоритмы носят универсальный характер. Эксплуатирующая организация АО «Концерн Росэнергоатом» уделяет большое внимание развитию стационарных систем технической диагностики. За последние 20 лет ими оснащены практически все российские энергоблоки. Это способствовало как повышению безопасности эксплуатации, так и обеспечению надежности, и продлению ресурса действующих АЭС. В статье представлена классификация систем технической диагностики, особенности их эксплуатации на площадке НВОАЭС за 30-летний период времени. Сложные, наукоемкие системы диагностики с большим затруднением и скепсисом продвигаются в эксплуатационную практику. Системы медленно наполняются диагностическими знаниями, но наш зарубежный взыскательный заказчик, несомненно, их потребует.

Ключевые слова: система технической диагностики, техническое диагностирование, контроль технического состояния, блочный щит управления, блочный пункт управления, аномальное событие, система контроля вибрации, система обнаружения свободных предметов, система контроля течей по влажности, система акустического контроля течей, система комплексного диагностирования, аномалия, искусственный интеллект, пуско-наладочные испытания, система пуско-наладочных измерений, главный циркуляционный контур, акустическая стоячая волна, система контроля, управления и диагностики, программно-технический комплекс.

Поступила в редакцию 01.11.2021

После доработки 12.11.2021

Принята к печати 17.11.2021

Введение

Техническое диагностирование оборудования в отличие от контроля технического состояния, является неформализованной и скорее творческой процедурой, чем отработанной технологией (по крайней мере, на начальном этапе), что в свою очередь создаёт определённые проблемы при практическом использовании систем технической диагностики (далее – СТД) на энергоблоках АЭС. С одной стороны, это вызвано необходимостью кропотливой и длительной работы по обработке больших объёмов информации для формирования критериев и адаптации методик к конкретному оборудованию АЭС. С другой стороны, возрастают требования к квалификации персонала диагностических подразделений АЭС. Для подготовки и обучения специалиста по техническому диагностированию необходимо освоить

большой объем разнородных знаний и навыков. Кроме указанных выше факторов, следует учесть то обстоятельство, что диагностические заключения о состоянии оборудования даются с некоторой вероятностной оценкой, что тоже часто вызывает непонимание не только у административного и ремонтного персонала АЭС, привыкшего оперировать конкретными детерминированными значениями, но и собственно персонала диагностических подразделений. Процессорная мощность и объем хранения информации даже первых промышленных компьютеров позволяли существенно облегчить расчёты по известным алгоритмам, и, казалось, позволит полностью исключить участие человека (оператора) из цепочки обработки. Естественное желание получить законченное диагностическое заключение, что в свою очередь позволит оптимизировать процесс диагностирования до готовых сообщений, передаваемых на блочный щит/пункт управления (БЩУ/БПУ). Однако процесс повседневной эксплуатации СТД выявил серьёзные недостатки как в алгоритмике работы самих систем, так и собственно в организации работ на площадках АЭС.

Контроль технического состояния и техническое диагностирование

Возвращаясь к вопросу практики, необходимо остановиться на некоторых особенностях собственно процессов диагностирования, а также причинах как объективного, так и субъективного характера, препятствующих, а иногда делающих невозможным надёжное и качественное выявление аномального состояния оборудования на ранних стадиях его возникновения. Основной причиной, является непонимание разницы между такими категориями как «контроль технического состояния» и «техническое диагностирование». К сожалению, нормативная база сильно отстаёт в своём развитии от технических средств, поэтому источник [1] остаётся основным документом, определяющим терминологию по техническому диагностированию. Исходя из определений, термин «контроль технического состояния (англ. technical state inspection)» определяется согласно [1] как «проверка соответствия значений параметров объекта требованиям технической документации и определение на этой основе одного из заданных видов технического состояния в данный момент времени. Контроль технического состояния не даёт информацию о причинах выхода из строя или о времени сохранения работоспособного состояния. «Техническое диагностирование (англ. technical diagnosis)» согласно [1] помимо определения собственно технического состояния объекта, требует поиска места и причин неисправности, а также прогноза поведения исследуемого объекта. Целесообразно проиллюстрировать сказанное выше конкретным примером. Одним из ключевых параметров, позволяющих судить о состоянии роторного оборудования, является параметр вибрации (например, виброскорость). К настоящему времени вопрос вибрационного контроля на АЭС (именно контроля, а не диагностирования) полностью отработан. Так, например, ещё к концу прошлого века разработана необходимая нормативная база [2-7] с установленными граничными значениями по абсолютным значениям вибрации, при достижении которых, контролируемое оборудование должно быть остановлено немедленно, эксплуатироваться ограниченное время или без ограничений. По установленным руководящими документами значениям (виброскорость согласно [2-7]) довольно легко выявить как момент выхода оборудования на недопустимый режим работы, так и необходимую технологическую операцию (останов/ограниченная по времени эксплуатации). Данная процедура, согласно [1], является контролем вибрационного состояния и лишь первым шагом собственно к операции технического диагностирования. Именно на этом шаге и происходит подмена понятий «контроль» на «диагностирование». Вибрационный контроль на АЭС может осуществляться как в ручном режиме (обход оборудования подготовленным персоналом), либо специализированной системой вибрационного контроля, при этом сущность процесса остаётся неизменной – измерение текущего

значения виброскорости и ее сравнение с пороговыми значениями, утверждёнными руководящими документами. Долгое время именно эта процедура носила наименование «техническая диагностика» и действительно благодаря некоторым приемам (анализ трендов) была способна предсказывать временные интервалы, когда контролируемое оборудование выйдет за пределы безопасной эксплуатации. Однако подлинный переход к диагностированию осуществляется вслед за требованиями производства:

- точное определение состояния контролируемого оборудования в любой момент времени (по статистике известно, что задолго до момента выхода контролируемых параметров за пределы безопасной эксплуатации, имеется интервал, когда оборудование с начинающимся развиваться дефектом работает относительно длительное время);
- сокращение сроков ремонта (определение конкретного вида неисправности, и как следствие продолжительности безопасной эксплуатации);
- прогнозирование на максимально возможный срок состояния оборудования (актуализация и повышение эффективности ремонтных кампаний);
- планирование закупочных процедур при ремонтах (точное определение номенклатуры закупаемых изделий и запасных частей);
- определение (подтверждение) ресурсных характеристик (соответствие рассчитанных по проекту характеристик реально наблюдаемым на производстве).

Не следует рассматривать представленный выше перечень полным, это всего лишь некоторые факторы, способствующие переходу от «контроля технического состояния» оборудования к «диагностированию». К концу прошлого века известные мировые кампании стали выходить на рынок с полностью готовыми (по заверениям разработчиков) системами технического диагностирования [8, 9]: например, Westinghouse Electric Company дала концептуальное решение ALLY, AG Siemens – серия систем SÜS, KÜS, ALÜS, FAMOS [10]. Собственно, с этого времени следует отсчитывать начало эксплуатации СТД на АЭС.

Эксплуатация различных СТД на площадке Нововоронежской АЭС СТД 1 поколения

В 1992 г. в соответствии со Сводными мероприятиями по повышению надёжности и безопасности действующих АЭС с ВВЭР (СМ-90-ВВЭР) начато оснащение энергоблоков 3, 4 НВОАЭС (ВВЭР-440) и 1, 2 энергоблоков КолАЭС (ВВЭР-440) системами технической диагностики. Ввиду отсутствия в то время готовых к поставке СТД было принято решение использовать импортные системы, но с привязкой их к оборудованию отечественных энергоблоков. Выбор был сделан в пользу решений фирмы «Siemens» ФРГ и в 1992-1993 годах на площадке НВОАЭС были введены в эксплуатации системы:

- SÜS – система контроля вибрации;
- KÜS – система контроля свободных и слабозакреплённых предметов;
- ALÜS – система акустического контроля течей.

Активная эксплуатация СТД выявила как достоинства систем, так и их существенные недостатки, главными из которых являются:

1. Высокая стоимость комплектующих, что затрудняло оперативно осуществлять замену выходящих из строя единиц, усугубленное полным отсутствием предложений на рынке в то время.

2. Разные подходы к эксплуатации, инженерной поддержке эксплуатации, техническому обслуживанию и ремонту оборудования АЭС, принятые на Российских и условно, западных АЭС, не позволяли организовать полноценный информационный обмен как между СТД и эксплуатирующим персоналом, так и между собственно АЭС и

научными организациями, что в конечном итоге нивелировало весь эффект от ввода систем.

3. Полное отсутствие регламентирующих документов и нормативной базы, делающих СТД системами с «непонятным статусом» и, следовательно, «не особенно нужных» при эксплуатации АЭС.

Обмен информацией между системами не предполагался, каждая отдельная СТД оперировала информацией, полученной только по своим каналам и не обменивалась с системами более высокого уровня (рис. 1). В качестве типовых СТД на рисунке 1 представлены:

СКВ – система контроля вибрации;

СОСП – система контроля свободных предметов;

САКТ – система акустического контроля течей;

СКТВ – система контроля течей по влажности.

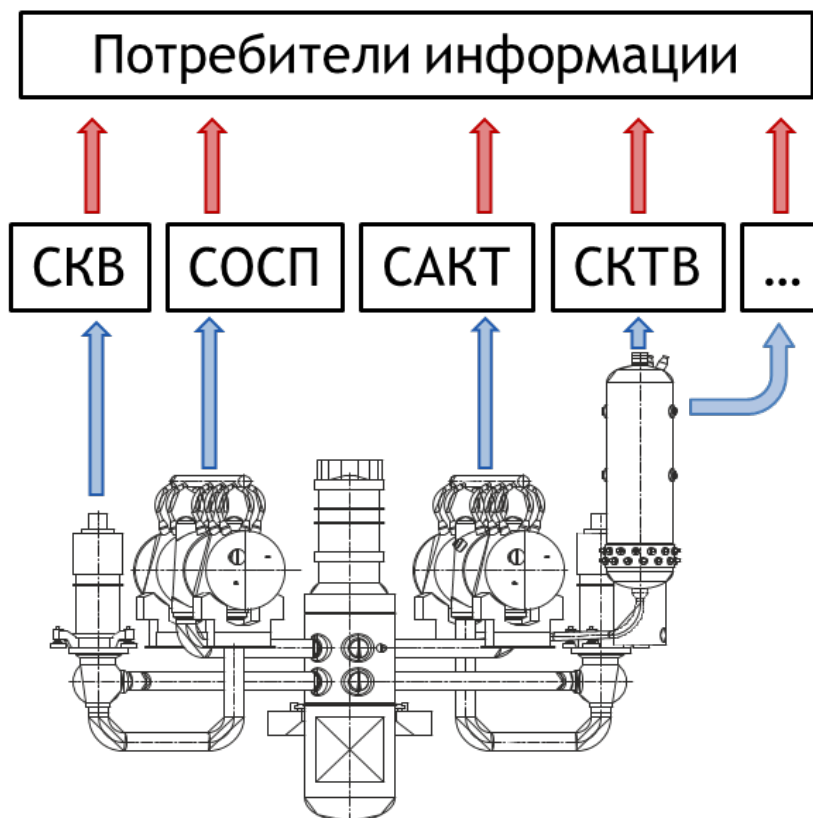


Рисунок 1 – Структурная схема информационных потоков СТД 1 поколения [Block diagram of information flows of 1st generation technical diagnostics systems]

СТД 2 поколения

Не смотря на неоднозначный эффект от эксплуатации СТД первого поколения, в дальнейшем все новые энергоблоки, вводимые в работу, оснащались штатными системами уже на уровне проекта, а уже введенные в эксплуатацию, дооснащались, согласно разработанных мероприятий. По сравнению с предыдущим поколением, СТД второй генерации создавались с учётом выявленных недостатков и ошибочных решений, выявленных при вводе и собственно эксплуатации, что в конечном итоге позволило создать достаточно надёжные программно-технические комплексы. Благодаря согласованным действиям удалось выделить организации, отвечающие за создание и поставку специализированных СТД на АЭС (ЗАО «НТЦД», АО ЦКБМ «Энергонасос» и др.), что практически полностью решило проблему с необходимыми комплектующими и своевременным ремонтом. Аналогично был повышен ресурс

работы технических средств на основе новой элементной базы. Также была разработана и введена необходимая рабочая документация для работы с СТД, определяющая их статус, возможности, алгоритмы действия персонала и др.

В целом, СТД второго поколения, при должном техническом обслуживании и грамотном использовании (наличие квалифицированного персонала на АЭС является главным критерием) показали себя надёжными системами, приносящими определённый профит. В качестве примера следует рассмотреть [9], где представлены случаи регистрации СТД аномальных событий различного типа на энергоблоках ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Особенно показателен пример регистрации аномалии на энергоблоке 1 АЭС «Тяньвань» с разрушением лопасти рабочего колеса ГЦН в 2006 г., когда три независимые друг от друга СТД зарегистрировали данное событие. Главной особенностью СТД 2 поколения следует считать объединение СТД в единый комплекс систем, получивший название система контроля, управления и диагностики (СКУД), где помимо собственно диагностических систем включены другие, например, система внутриреакторного контроля (СВРК). Кроме этого, информация с СТД поступает на АСУТП верхнего уровня (рис. 2).

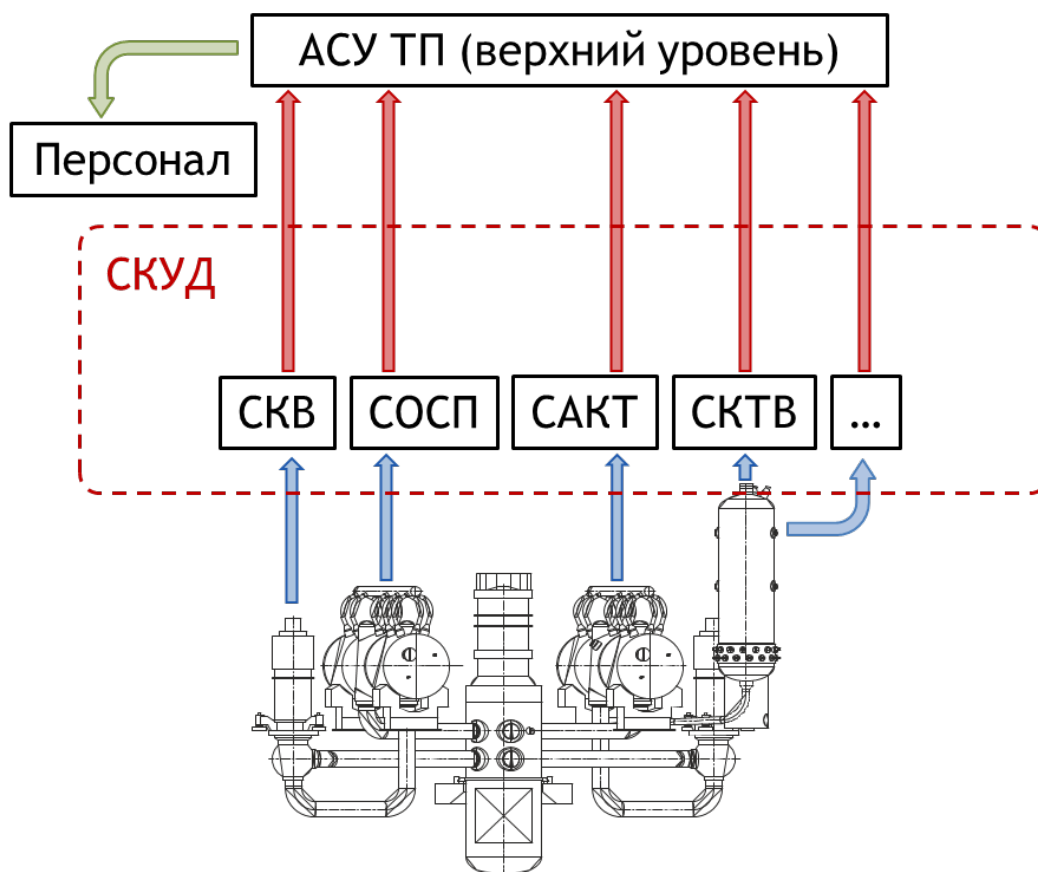


Рисунок 2 – Структурная схема информационных потоков СТД 2 поколения [Block diagram of information flows of 2nd generation technical diagnostics systems]

В дальнейшем развитие СТД шло по пути интеграции локальных систем в единое информационное пространство с включением в него данных от различных блочных информационных систем для оптимизации алгоритмов диагностирования, поэтому на последних введенных в эксплуатацию энергоблоках ВВЭР-1000 появляется новая система контроля, управления и диагностики (СКУД), взамен отдельных (локальных) СТД. СТД 2 поколения на площадке НВОАЭС не эксплуатировались, однако, максимального уровня развития и интеграции СКУД, на настоящее время, удалось достичь на энергоблоке поколения 3+ – ВВЭР-1200.

СТД 3 поколения (на примере РУ ВВЭР-1200 блока 1 НВОАЭС-2)

В задачи данной статьи не входит детальное описание технических и программных средств СТД, входящих в СКУД энергоблока 1 НВОАЭС-2, а только самое общее представление о выполняемых функциях и решаемых с помощью их задачам. На рисунке 3 представлена принципиальная схема организации информационного обмена между отдельными (локальными) СТД, входящих в СКУД.

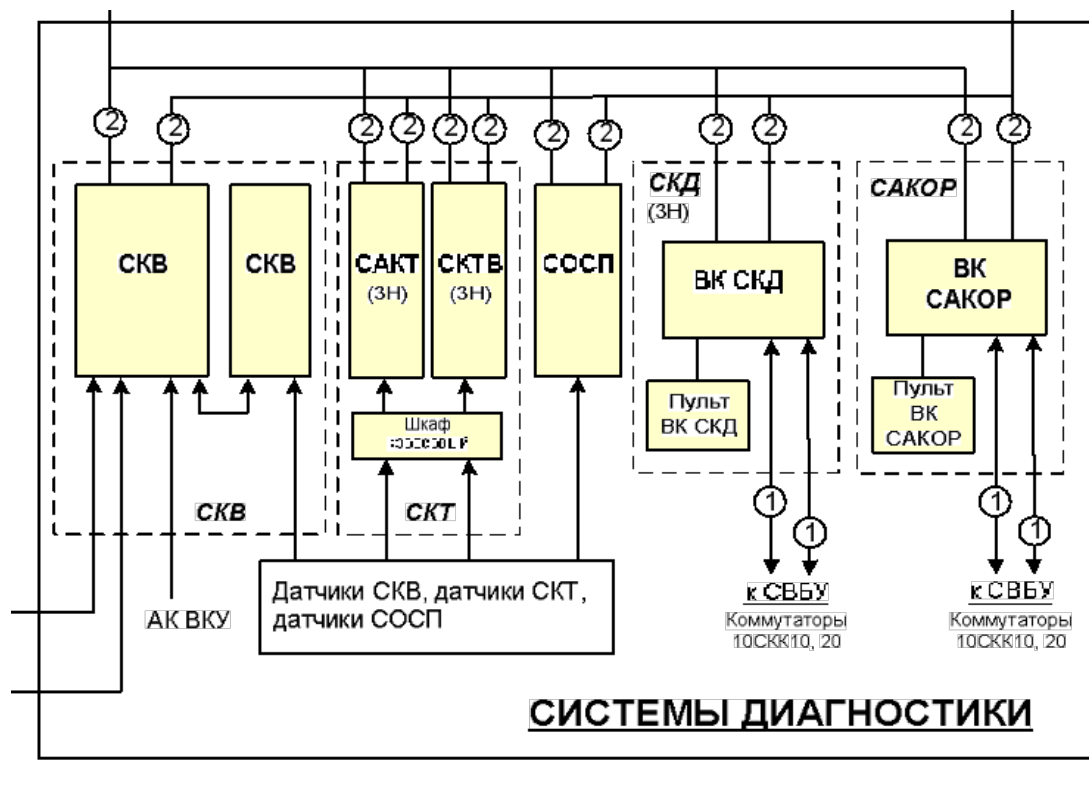


Рисунок 3 – Структурная схема СКУД [Block diagram of the monitoring, control and diagnostic system]

В качестве локальных СТД представлены:

1 СКВ – система контроля вибрации. Контроль вибрационного состояния оборудования главного циркуляционного контура (ГЦК), корпуса РУ, внутрикорпусных устройств (ВКУ) и ТВС. В отличие от СТД поколения 1 и 2 – непрерывный режим работы.

2 САКТ – система акустического контроля течей. Контроль и локализация течей на оборудовании и ГЦК. Режим работы непрерывный.

3 СКТВ – система контроля течей по влажности, предназначена для контроля и локализации течей, основана на другом физическом принципе, чем САКТ. Осуществляет поиск и локализацию течей на оборудовании, ГЦК и частично в помещениях с размещением оборудования 2 контура. Режим работы непрерывный.

4 СОСП – система обнаружения свободных предметов. Главная задача – обнаружение и локализация свободных и слабозакреплённых предметов в пределах 1 контура РУ. Режим работы непрерывный.

5 СКД – система комплексного диагностирования. Является основной системой в контуре диагностики. Главная задача – обработка поступающей от других систем информации, её представление и по мере отработки алгоритмов диагностирования выдача законченных диагностических сообщений. Режим работы непрерывный.

6 САКОР – система автоматизированного контроля остаточного ресурса. Осуществляет оценку остаточного ресурса основного оборудования РУ на основе непрерывного контроля теплотехнических параметров при различных режимах

эксплуатации. Достаточно спорное, с точки зрения авторов, решение проектантов о включении данной системы в контур диагностических систем СКУД, о чём более подробно будет изложено дальше.

Помимо рассмотренных выше СТД, на энергоблоке 1 НВОАЭС-2 эксплуатируются и другие системы, не включённые в состав СКУД, но выполняющие функции диагностирования:

7 СТД ГЦНА – система технической диагностики ГЦНА, предназначена для диагностирования такого важного агрегата как ГЦНА. Поставляется АО ЦКБМ «Энергонасос» совместно с алгоритмами автоматического диагностирования.

8 КСДА – комплексная система диагностики арматуры, пока единственный экземпляр, введенный в промышленную эксплуатацию на энергоблоке 2 НВОАЭС-2. Предназначение – автоматизированное диагностирование электроприводной арматуры, главным образом арматуры систем безопасности.

9 АСВД – автоматизированная система вибрационной диагностики. Основное предназначение – вибрационный контроль турбоагрегата и различного роторного оборудования, также имеет в своём составе программный модуль для автоматического диагностирования.

Как видно из самого общего описания, количество СТД, введенных в эксплуатацию на энергоблоке ВВЭР-1200, является численно самым большим и крайне разнородным по многим параметрам: принятым подходам к диагностированию, по функциональному назначению, используемым алгоритмам обработки информации и др.

Преимущества опережающего ввода в эксплуатацию СТД

На настоящее время энергоблок ВВЭР-1200 обладает самым большим в количественном отношении парком штатных СТД. Правильное и рациональное использование заложенного в системы потенциала является залогом безопасной эксплуатации оборудования всего энергоблока. Однако перед собственно эксплуатацией систем, необходим достаточно длительный и трудоёмкий процесс их последовательного ввода в работу, обычно затягивающийся на 1 или 2 года. Длительность процедуры определяется не столько устранением ошибок при монтаже или заменой выходящих из строя компонент (хотя без этого не обойтись), а тонкой настройкой и адаптацией СТД к оборудованию энергоблока. Даже построенные по одному проекту и на одной площадке энергоблока имеет незначительные отличия, делающие невозможным простое копирование настроек систем и перенос баз данных с системы на систему. Необходимость длительной процедуры настройки, наличие грамотного и подготовленного персонала для данной работы, ограниченные временные интервалы при пуске, а также то, что большинство систем, входящих в СКУД относятся классу 4Н по влиянию на безопасность согласно НП-001-15, часто заставляли переносить ввод в работу СТД на период освоения мощности энергоблоком или уже на этап промышленной эксплуатации. При таком подходе не только теряется крайне нужный в дальнейшем объём информации, что само по себе недопустимо, но и присутствуют уникальные режимы эксплуатации РУ, не повторяемые в дальнейшем никогда при проектной эксплуатации энергоблока.

Идея о вводе в эксплуатацию СТД до ХГО неоднократно поднималась и дискутировалась, например, в [9]. Но впервые такая концепция была успешно реализована при пуске энергоблока 1 НВОАЭС-2. Рамки данной статьи не позволяют подробно рассказать обо всех этапах работы, в [11, 14] представлены схемы коммутации СТД для создания комбинированных измерительных схем, состав технических средств, а также некоторые полученные результаты. В качестве положительной практики следует озвучить только главные моменты:

1. Опережающий ввод систем в работу позволил выявить ошибки, допущенные при монтаже СТД, устранение которых занимало намного меньше времени, по причинам полной доступности оборудования и отсутствия радиационных полей, а также возможность использовать имитационные средства воздействия на первичные преобразователи, что в конечном итоге позволило выполнить качественную калибровку измерительных каналов систем.

2. Доказан практический эффект от использования штатных СТД совместно с системами комплекса пуско-наладочных измерений (СПНИ) при вводе в работу энергоблока. Включение стационарных диагностических систем в штатный состав СПНИ позволило бы с одной стороны уменьшить количество измерительных каналов СПНИ, их функционал могли взять на себя СТД, что в конечном итоге позволило сократить затраты на проведение работ. С другой стороны, полученная в ходе пусковых операций информация позволила бы более точно настроить СТД и существенно ускорить ввод их в эксплуатацию. Полученный опыт, к сожалению, не изучен должным образом и не используется при вводе в эксплуатацию других энергоблоков.

3. Наличие стандартных, унифицированных разъемов с необработанными аналоговыми сигналами, во всех задействованных системах позволяло собирать уникальные измерительные схемы с использованием портативных сборщиков данных, с необходимым количественным и качественным составом измерительных каналов, нацеленных на решение конкретной диагностической задачи [9]. Так, например, получены синхронные многоканальные записи с регистрацией сигналов акселерометров, проксиметров СТД ГЦНА и датчиков пульсации давления (ДПД) СПНИ. При этом СТД ГЦНА собственных ДПД не имеет.

4. Реализация на этапах ХГО и ввода в эксплуатацию нетипичных для нормальной эксплуатации РУ режимов невозпроизводимых в дальнейшем, позволило получить уникальную информацию об акустических стоячих волнах (АСВ), а также, что особенно важно, выявить и описать вклад АСВ в вибрационные характеристики контура. В конечном итоге, создана стройная теория виброакустического взаимодействия, ознакомиться с которой можно в [12].

5. Успешная, эффективная и надежная работа СТД целиком зависит от качественной подготовки персонала АЭС, эксплуатирующего системы, несмотря на их максимальную степень автоматизации. При штатном вводе систем в эксплуатацию специалисты цеха тепловой автоматики (ЦТАИ), отвечающие за ремонт технических средств и отдела технической диагностики (ОТД) – собственно эксплуатация систем, получают доступ к системам, в лучшем случае в самом конце работ по вводу блока в промышленную эксплуатацию, часто не имея соответствующего опыта работы с СТД. Поэтому, вынуждены решать проблемы методом проб и ошибок, что не способствует качественной эксплуатации СТД. В случае же опережающего ввода в эксплуатацию, персонал как ЦТАИ, так и ОТД активно включен в процесс, особенно при проведении ПНИ, поэтому на начало штатной эксплуатации систем имеет свой наработанный опыт.

Положительный эффект от опережающего ввода систем в эксплуатацию на энергоблоке с РУ ВВЭР-1200 не исчерпывается пятью представленными здесь пунктами, а гораздо шире, и на сегодняшний день до конца не обобщён, что не позволяет тиражировать опыт НВОАЭС на другие АЭС, как в России, так и за рубежом.

Выводы

В статье обобщен опыт эксплуатации СТД различных поколений на площадке НВОАЭС. Уже не надо доказывать, что системы диагностирования имеют право на жизнь, как это было 30 лет назад. Многотрудный путь, пройденный институтами и предприятиями атомной отрасли России по развитию ВВЭР, определил

диагностирование не просто как модное научное направление, а как проектно заложенный атрибут в комплексе программно-технических средств обеспечения безопасной эксплуатации АЭС.

Прежде чем система диагностирования будет способна выполнять свои функции, она должна быть наполнена диагностическими знаниями. Очевидно, что небольшая группа исследователей не в состоянии охватить всю представленную выше проблематику, как и авторы данной статьи не претендуют на полноту изложения опыта работы с СТД. В статье в краткой и доступной форме излагаются основные проблемы и вопросы, выявленные при эксплуатации СТД на площадке НВОАЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный Стандарт Союза ССР. Техническая диагностика. Термины и определения. ГОСТ 20911-89. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 13 с.
2. Государственный Стандарт Союза ССР. Приборы виброизмерительные. Термины и определения. ГОСТ 16819-71. – Москва : Стандартиформ, 2010. – 8 с.
3. Государственный Стандарт Союза ССР. Акселерометры низкочастотные линейные. ГОСТ 18955-73. – Москва : Издательство стандартов, 1973. – 14 с.
4. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Термины и определения. ГОСТ 24346-80. – Москва : Стандартиформ, 2010. – 26 с.
5. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Обозначения и единицы величин. ГОСТ 24347-80. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 6 с.
6. Государственный Стандарт Союза ССР. Система стандартов по вибрации. Приборы для измерения вибрации вращающихся машин. Общие технические условия. ГОСТ 25275-82. – Москва : Издательство стандартов, 1993. – 11 с.
7. Государственный Стандарт Союза ССР. Вибрация. Динамические характеристики стационарных машин. Основные положения. ГОСТ 26043-83. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 16 с.
8. *Аркадов, Г.В.* Виброшумовая диагностика ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, А.И. Усанов; под ред. А.А. Абагыяна. – Москва : Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.
9. *Аркадов, Г.В.* Системы диагностирования ВВЭР / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, Б.М. Финкель. – Москва : Энергоатомиздат, 2010. – 391 с.
10. *Аникин, Г.Г.* Опыт внедрения систем виброконтроля на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР-440 / Г.Г. Аникин, В.И. Павелко // Теплотехника. – 1999. – № 6. – С. 12-17.
11. *Федоров, А.И.* Комплексные измерения диагностических параметров оборудования на блоке 1 НВАЭС-2 в процессе опытно-промышленной эксплуатации / А.И. Федоров, М.Т. Слепов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017 – № 3. – С. 77-87.
12. *Аркадов, Г.В.* Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – Москва : Наука, 2018. – 469 с. – ISBN 978-5-02-040138-9.
13. *Аркадов, Г.В.* Шумовой мониторинг в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200. / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов. – Москва : Наука, 2021. – 221 с. – ISBN 978-5-02-040869-2.
14. *Павелко, В.И.* Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 / В.И. Павелко, М.Т. Слепов, В.У. Хайретдинов // Известия ВУЗов. Ядерная энергетика. – 2016 – № 4. – С. 44-54.
15. *Аркадов, Г.В.* Виброакустика ВВЭР-1200 / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, М.Т. Слепов // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сборник трудов 11 международной научно-технической конференции, 21-24 мая 2019 года, ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия. – URL : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk2019-061.pdf>.
16. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к обоснованию прочности внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР» (НП-102-17). Введены приказом №409 от 05.10.2017. – Консорциум «Кодекс». – URL : <https://docs.cntd.ru/document/542609712>.
17. *Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I.* The experimental definition of the acoustic standing waves series shapes, formed in the coolant of the primary circuit of VVER-440 type reactor // Progress in Nuclear Energy. 1995. Vol. 29, N 3/4, p.153-170. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00005-5](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00005-5)
18. *Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I.* Some results of the vibrations analysis on the VVER-440 type reactor vessel top head and on the facilities of its primary circuit six loops // A symposium on

- nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN VII, June 19-23, 1995, Avignon, France. Session 9 – Vibrations structures: modeling and monitoring. Vol. 2, p.9.5. P. 168-172.
19. Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibration Acoustics Applied to VVER-1200 Reactor Plant / Singapore: World Scientific, 2021. – 586 p. ISBN 978-981-123-466-8 <https://doi.org/10.1142/12220>

REFERENCES

- [1] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya. GOST 20911-89 [The State Standard of the USSR. Technical Diagnostics. Terms and Definitions. GOST 20911-89]. Moscow: Publishing House of Standards, 1989. 13 p. (in Russian).
- [2] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Pribory vibroizmeritel'nye. Terminy i opredeleniya. GOST 16819-71. [The State Standard of the USSR. Vibration Measuring Devices. Terms and Definitions. GOST 16819-71]. Moscow: Standartinform, 2010. 8 p. (in Russian).
- [3] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Akselerometry nizkochastotnye linejnye. GOST 18955-73. [The State Standard of the USSR. Accelerometers are Low-Frequency Linear. GOST 18955-73]. Moscow: Publishing House of Standards, 1973. 14 p. (in Russian).
- [4] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Vibraciya. Terminy i opredeleniya. GOST 24346-80. [State Standard of the USSR. Vibration. Terms and Definitions. GOST 24346-80]. Moscow: Standartinform, 2010. 26 p. (in Russian).
- [5] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Vibraciya. Oboznacheniya i edinicy velichin. GOST 24347-80. [State Standard of the USSR. Vibration. Designations and Units of Quantities. GOST 24347-80]. Moscow: Publishing House of Standards, 1986. 6 p. (in Russian).
- [6] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Sistema standartov po vibracii. Pribory dlya izmereniya vibracii vrashchayushchih mashin. Obshchie tekhnicheskie usloviya. GOST 25275-82. [State Standard of the USSR. System of Vibration Standards. Devices for Measuring Vibration of Rotating Machines. General Technical Conditions. GOST 25275-82]. Moscow: Publishing House of Standards, 1993. 11 p. (in Russian).
- [7] Gosudarstvennyj Standart Soyuz SSR. Vibraciya. Dinamicheskie karakteristiki stacionarnykh mashin. Osnovnye polozeniya. GOST 26043-83. [State Standard of the USSR. Vibration. Dynamic Characteristics of Stationary Machines. The Main Provisions. GOST 26043-83]. Moscow: Publishing House of Standards, 1984. 16 p. (in Russian).
- [8] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibroshumovaya diagnostika VVER [Vibration Noise Diagnostics of WWER]. Edited by A.A. Abagyan. Moscow: Energoatomizdat, 2004. 344 p.
- [9] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Finkel B.M. Sistemy diagnostirovaniya VVER [WWER Diagnostic Systems.]. Moscow: Energoatomizdat, 2010. 391 p. (in Russian).
- [10] Anikin G.G., Pavelko V.I. Opyt vnedreniya sistem vibrokontrolya na AES s reaktornymi ustanovkami tipa VVER-440 [Experience in the Implementation of Vibration Control Systems at Nuclear Power Plants with WWER-440 Type Reactor Installations]. Heat Engineering. 1999. №6. P.12-17 (in Russian).
- [11] Fedorov A.I., Slepov M.T. Kompleksnye izmereniya diagnosticheskikh parametrov oborudovaniya na bloke 1 NVAES-2 v processe opytно-promyshlennoj ekspluatatsii [Complex Measurements of Diagnostic Parameters of Equipment at Unit 1 of NWPP-2 during Pilot Operation]. University News. Nuclear Power Engineering. 2017. №3. P.77-87 (in Russian).
- [12] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroakustika v prilozheniyah k reaktornoj ustanovke VVER-1200 [Vibroacoustics in the Annexes to the Installation of the Reactor WWER-1200]. Moscow: Nauka, 2018. 469 p. ISBN 978-5-02-040138-9 (in Russian).
- [13] Arkadov G. V., Pavelko V. I., M. T. Slepov SHumovoj monitoring v prilozheniyah k reaktornoj ustanovke VVER-1200 [Noise Monitoring in the Annexes to the Installation of the WWER-1200 Reactor]. Moscow: Nauka, 2021. 221 p. ISBN 978-5-02-040869-2 (in Russian).
- [14] Pavelko V.I., Slepov M.T., Khayretdinov V.U. Opyt provedeniya kompleksnykh izmerenij s ispol'zovaniem raznorodnykh sistem na razlichnykh etapah puska energobloka VVER-1200 [Experience in Conducting Complex Measurements Using Heterogeneous Systems at Various Stages of the WWER-1200 Power Unit Start-Up]. University News. Nuclear Power Engineering. 2016. №4. P.44-54 (in Russian).
- [15] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibroakustika VVER-1200 [WWER-1200 Vibroacoustics]. [Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with WWER: Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference on May 21-24, 2019 OKB «Gidropress»], Podolsk, Russia. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2019/documents/mntk2019-061.pdf> (in Russian).
- [16] Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskemu i atomnomu nadzoru. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovaniya atomnoj energii «Osnovnye trebovaniya k obosnovaniyu

- prochnosti vnutrikorpusnyh ustrojstv reaktorov tipa VVER» (NP-102-17). Vvedeny prikazom №409 ot 05.10.2017 [Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. "Basic Requirements for Substantiating the Strength of Internal Devices of WWER Type Reactors" (NP-102-17). Introduced by Order No. 409 of 05.10.2017]. «Codex» Consortium. URL: <https://docs.cntd.ru/document/542609712> (in Russian).
- [17] Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. The Experimental Definition of the Acoustic Standing Waves Series Shapes, Formed in the Coolant of the Primary Circuit of WWER -440 Type Reactor // Progress in Nuclear Energy. 1995. Vol. 29, N 3/4, p.153-170. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00005-5](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00005-5) (in English).
- [18] Bulavin V.V., Gutsev D.F., Pavelko V.I. Some Results of the Vibrations Analysis on the WWER-440 Type Reactor Vessel Top Head and on the Facilities of its Primary Circuit Six Loops // A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics. SMORN VII, June 19-23, 1995, Avignon, France. Session 9 – Vibrations Structures: Modeling and Monitoring. Vol. 2, p.9.5. P. 168-172 (in English).
- [19] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Slepov M.T. Vibration Acoustics Applied to WWER-1200 Reactor Plant / Singapore: World Scientific, 2021. – 586 p. – ISBN 978-981-123-466-8. – <https://doi.org/10.1142/12220> (in English).

Operational Experience of Stationary Technical Diagnostics Systems at Novovoronezh NPP

G.V.Arkadov^{*1}, V.I. Pavelko^{*2}, V.P. Povarov^{3}, M.T. Slepov^{**4}**

** JSC Joint Stock Company "Scientific and Technical Center "Diaprom", Koroleva str., 6, Obninsk, Kaluga region, Russia 249031*

*** Novovoronezh NPP Branch of JSC «Concern Rosenergoatom», Industrial zone Yuzhnaya 1, Novovoronezh, Voronezh region, Russia 396072*

¹e-mail: skrepka1964@gmail.com

²e-mail: vippvi@mail.ru

³e-mail: povarovvp@nvnpp1.rosenergoatom.ru

⁴ORCID iD: 0000-0001-5563-0526

e-mail: SlepovMT@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract – Technical diagnostics has a strong position in the global engineering community. It is included in the standards and recommendations for both existing and projected nuclear power plants. All foreign operating nuclear power plants are more or less equipped with means of technical diagnostics of reactor installations either from the very beginning or during modernization. Regardless of the diagnostic architecture of the automated control system, whether it is Framatom's local project systems or Westinghouse's centralized systems, diagnostic algorithms are universal. The operating organization of Rosenergoatom Concern JSC pays great attention to the development of technical diagnostics tools. Over the past 20 years, almost all Russian power units have been equipped. This contributed both to improving the safety of operation, and ensuring reliability, and extending the life of existing nuclear power plants. The article presents the authors' classification of technical diagnostics systems, the features of their operation at the Novovoronezh NPP site for a 30-year period of time. Complex, high-tech diagnostic systems are moving into operational practice with great difficulty and skepticism. The systems are slowly being filled with diagnostic knowledge, but our demanding foreign customer will undoubtedly require this diagnostic knowledge.

Keywords: technical diagnostics system, technical diagnostics, technical condition monitoring, block control panel, block control point, abnormal event, vibration monitoring system, free object detection system, humidity leak monitoring system, acoustic leak monitoring system, integrated diagnostics system, anomaly, artificial intelligence, commissioning tests, commissioning measurement system, main circulation circuit, acoustic standing wave, monitoring, control and diagnostics system, software and hardware complex.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 311.2; 51-7

ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ИНДИКАТОРА ХЕРСТА И ЛОГИСТИЧЕСКИХ ТРЕНДОВ

© 2021 В.Я. Шпицер, В.В. Кривин, В.А. Толстов

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал НИЯУ МИФИ, Волгодонск, Россия

В статье представлены результаты идентификации предотказных состояний. Результаты основаны на фрактальном анализе и непараметрической статистике. Элементы оборудования АЭС – это высоконадежные системы длительной эксплуатации. Для них характерны постепенные отказы. Это случается по причине накопления необратимых повреждений. Штатные информационно измерительные комплексы поставляют временные ряды. Они традиционно обрабатываются параметрическими методами. Обработка данных, накопленных экспериментально, может быть автоматизирована для промышленного мониторинга параметров оборудования АЭС.

Ключевые слова: диагностика, предсказание, контролируемые параметры, обработка данных, деградация, индикатор Хёрста, наблюдение, мониторинг, логистические методы, предотказные состояния, нормативные интервалы, распределение вероятности.

Поступила в редакцию 24.08.2021
После доработки 28.09.2021
Принята к печати 06.10.2021

Введение

Главной задачей предсказательной диагностики является выявление устойчивых трендов основных технологических индикаторов, которые, как предполагается, сохраняются на всем периоде наблюдений.

Исходим из того, что сложная техническая система обладает ограниченным ресурсом, ее параметры поддерживаются в нормативных пределах. Эксплуатирующая организация дополнительно устанавливает контрольные уровни параметров, по которым осуществляет мониторинг. Контрольный образ системы образует соответствующий вписанный в норму гиперпараллелепипед. Физически деградация представляет собой ансамбль случайных, диссипативных процессов, обуславливающих возрастание энтропии.

Будем рассматривать деградацию как неконтролируемое изменение системы во времени. Это может быть разрегулирование (по управляющим параметрам), стохастический дрейф физических свойств, накопление необратимых повреждений и несоответствий. Как правило, причины деградации не могут быть учтены при построении математической модели объекта. Задача состоит в том, что помимо математических ожиданий коэффициентов модели необходимо по выборке определить, неизвестные априори, свойства дрейфа.

В условиях непрерывного мониторинга основных технологических параметров оборудования АЭС традиционно ищут наилучшее приближение к действительным значениям коэффициентов, например, регрессионной модели «вход – выход». В такой постановке пространство сигналов отображается в пространство коэффициентов модели, а основным параметром отображения является объём выборки. Регрессионная модель даёт возможность вычислять моменты времени превышения пределов для основных технологических параметров и восстанавливать плотность распределения

этих моментов. По восстановленной плотности рассчитывают средний (ожидаемый) остаточный ресурс и гарантированный (гамма-процентный) остаточный ресурс. В этой технологии приходится использовать гипотезу о нормальности распределений [1, 2].

В работе [3] комплексным решением многих проблем считается анализ самоподобных фрагментов временных рядов (фрактальный анализ). Этот подход был применён для предсказания момента превышения контрольных пределов при мониторинге эксплуатационных параметров оборудования АЭС. В этой работе демонстрируется предсказательная диагностика, основанная на вычислении коэффициента Хёрста и оценки эмпирической вероятности превышения предела. В такой постановке пространство сигналов отображается в единичный гиперкуб.

Показатель Хёрста

Показатель Хёрста (коэффициент Хёрста) – базовый параметр фрактального анализа. Этой мерой широко пользуются при исследовании финансовых временных рядов и биржевых индексов [3-6]. Основой статистической модели Г.Э. Хёрста является формула Альберта Эйнштейна, связывающая расстояние, которое проходит случайная блуждающая частица, и квадратный корень из времени $R = T^{0.5}$. Сущность модели Хёрста: размах вариации равен корню из количества испытаний. Значение коэффициента Хёрста, равное 0,5, соответствует чистому случайному процессу.

Отрезок временного ряда $\{x(i)\}$, $i = 1, \dots, n$ объёма n будем представлять через следующие величины:

Среднее значение $\langle x(n) \rangle = 1/n \sum_i^n x(i)$.

Стандартное отклонение $S(n) = \sqrt{1/n \sum_i^n [x(i) - \langle x(n) \rangle]^2}$.

Накопленное за m измерений отклонение от среднего значения:

$$X(m, n) = \sum_{u=1}^m [x(u) - \langle x(n) \rangle].$$

Размах $R(n) = \max_m X(m, n) - \min_m X(m, n)$, $1 \leq m \leq n$.

Установлено, что для большого числа природных явлений и процессов справедлив эмпирический закон Хёрста:

$$R(n)/S(n) = (n/2)^H.$$

Это соотношение даёт возможность на множествах экспериментальных данных вычислять показатель Хёрста H , как угловой коэффициент линейной регрессии в координатах $(\log \frac{R(n)}{S(n)}, \log (\frac{n}{2}))$.

Пусть задан сигнал, содержащий $N = 3000$ измерений. Выделяем фрагменты размером, например, по $n = 300$ измерений. Каждый фрагмент разбиваем на элементы, например, по $m = 30$ измерений. Для каждого элемента вычисляем сумму отклонений от среднего в своём фрагменте. Для всех элементов вычисляем размах и делим его на среднеквадратическое данного фрагмента. Для всех фрагментов в координатах $(\log \frac{R(n)}{S(n)}, \log (\frac{n}{2}))$ получаем ансамбль точек (в данном примере 10 шт.). Далее методом наименьших квадратов на этих точках находим коэффициенты уравнения прямой. Значение углового коэффициента и есть оценка показателя Хёрста.

Показатель Хёрста связывают с мерой самоподобия или мерой длительности долгосрочного трендового (персистентного) поведения стохастического процесса. Так диапазон $0 < H < 0.5$ соответствует антиперсистентным рядам, т.е. рост в предыдущем периоде, вероятно, сменится на спад в последующем. Диапазон $0.5 < H < 1$ соответствует персистентным рядам, т.е. рост в предыдущем периоде сохранится как тенденция и в последующем. Чем ближе значение $H=0.5$ тем ряд более зашумлён и тем

менее проявляется его тренд. Так для случайного процесса с независимыми приращениями и конечной дисперсией по соотношению Эйнштейна $H=0.5$. Предположительно значение $H=0.5$ связано с периодическими или квазипериодическими вариациями наблюдаемой величины.

Помимо роли классификационного признака показатель Хёрста может непосредственно фиксировать деградацию в форме разрушения. Так глубина деформированного слоя, в котором происходит локализация деформации, имеет выраженную тенденцию к росту в направлении к свободной поверхности. Переход от зоны локализации пластической деформации к зоне разрушения характеризуется резким увеличением показателя Хёрста [7].

Алгоритм построен на циклах и выполняется достаточно быстро даже на ограниченных вычислительных ресурсах, поэтому может составить ядро системы мониторинга. Адекватность процедуры тем выше, чем больше объём вовлекаемых данных.

На рисунке 1 представлен промышленный сигнал (температура масла в гидравлической системе главного циркуляционного насоса ГЦН АЭС) в коридоре контрольного (39°C) и предельно допустимого (41°C) значений, как функция номера регистрации.

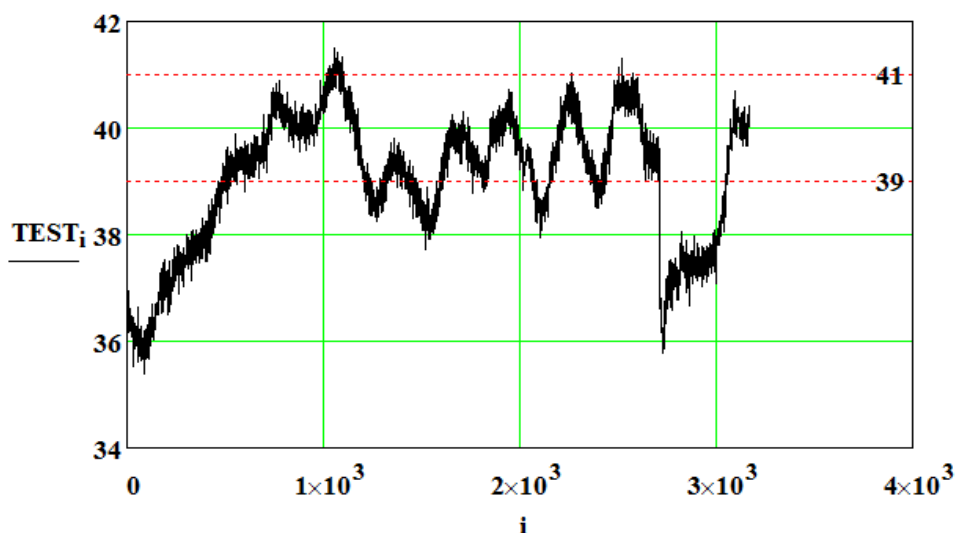


Рисунок 1 – Промышленный сигнал (архивная копия) [Industrial signal (archived copy)]

На данном периоде наблюдений фиксируется дестабилизация контролируемого показателя относительно эксплуатационного режима (36°C). Значение индикатора Хёрста $H=0,865$ (получено по описанной методике) однозначно предсказывает восходящий тренд – грядущее превышение нормативного предела. По этому показателю фиксируем деградацию объекта. На рисунке 2 представлена «плоскость Хёрста». Здесь точки с координатами $(\log(n/2) - \text{абсцисса}, \log(\frac{R(n)}{S(n)}) - \text{ордината})$ аппроксимируются прямой:

$$z(t) = 0.865 \times t + 0.262;$$

$$H=0.865.$$

На большом объёме экспериментального материала установлена высокая эффективность диагностики состояний оборудования АЭС с использованием показателя Хёрста.

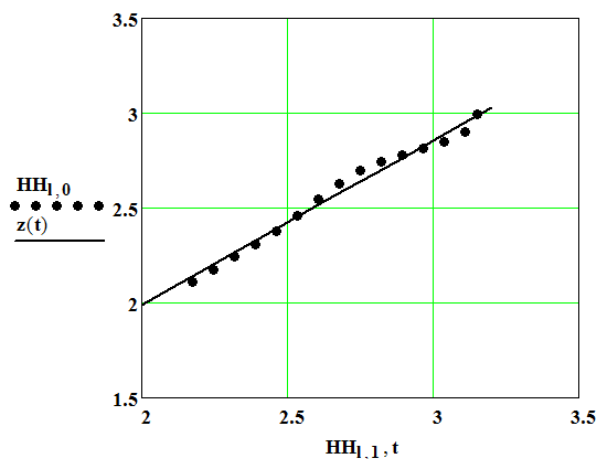


Рисунок 2 – «Плоскость Хёрста» $HH_{1,1}(\log(n/2) - \text{абсцисса})$, $HH_{1,0}(\log \frac{R(n)}{S(n)} - \text{ордината})$;
 $z(t) = 0.865 * t + 0.262$ [“Hurst plane” $HH_{1,1}(\log(n/2) - \text{abscissa})$, $HH_{1,0}(\log \frac{R(n)}{S(n)} - \text{ordinate})$];
 $z(t) = 0.865 * t + 0.262$

Логистический анализ

Мгновенный наблюдаемый образ системы представляется точкой в многомерном нормативном пространстве. Вариабильность траектории изображаемой точки обусловлена: множественным случайным рассеянием с нулевыми средними значениями; следствиями переходных процессов режимного управления или технологических нарушений; формированием тренда к нормативным границам. В общем случае изменение наблюдаемого параметра происходит за некоторый случайный промежуток времени, со случайной скоростью. Основной функцией, характеризующей движение изображающей точки является закон распределения вероятности выхода параметра за нормативную границу. Величина этой вероятности может быть принята за мгновенное значение уровня дефектности системы. Деградация, в этом случае, представляется трендом в многомерном пространстве дефектности [8].

Этот тренд отражает деградацию системы по каждой измеряемой величине относительно установленных для неё нормативных (a_n – левая, b_n – правая) границ. Назовём его *показатель дефектности контролируемого определяющего технического параметра*:

$$\hat{d}_t = 1 - \hat{F}(b_n) + \hat{F}(a_n), \quad (1)$$

$$\text{где } \hat{F}_n(x) = \begin{cases} 0, & x \leq x'_1; \\ \frac{k-1}{n}, & x'_{k-1} < x \leq x'_k \quad k=1,2,\dots,n; \\ 1, & x > x'_n, \end{cases} \quad \text{— эмпирическая функция распределения;}$$

n – объём выборки, x'_k – элементы вариационного ряда измеренных значений.

Если доверительный интервал для математического ожидания наблюдаемой величины шириной $6\hat{\sigma}$ покрывается нормативным, и их центры совпадают, то показатель дефектности \hat{d}_{\min} имеет минимальное значение, которое соответствует латентному уровню меры повреждений.

Система вложенных нормативных (контрольных) интервалов порождает семейство связанных оценок показателя дефектности. Показатель дефектности –

индикатор, позволяющий идентифицировать состояние оборудования сразу после ремонта, в процессе эксплуатации вести объективную оценку уровня деградации и осуществлять управление качеством профилактического обслуживания, не дожидаясь возникновения отказов или аварий.

В качестве предсказательной модели эволюции дефектности воспользуемся семейством логистических кривых. Основанием к этому принята следующая последовательность утверждений:

1. Скорость роста дефектности в системе при авариях (катастрофах) пропорциональна (коэффициент пропорциональности – число) накопленной дефектности – закон Мальтуса $\dot{d} = k \times d$;
2. Скорость накопления дефектности на нормальных режимах эксплуатации пропорциональна накопленной дефектности (коэффициентом пропорциональности является спадающая функция дефектности) – мягкая модель Арнольда $\dot{d} = k(d)d$ [9];
3. Интегральные функции распределения вероятности отказов принадлежат классу логистических функций [10];
4. Логистические кривые используют для моделирования эволюции сложных динамических систем путём перехода накапливаемых количественных изменений в качественные. Обобщённые логистические кривые применяют для отображения возмущающих модуляций поступательного тренда [11-14].

Логистическая трёхпараметрическая кривая представляется выражением:

$$d(t) = \frac{d_{\max} \times d_0 \times \exp(r \times t)}{d_{\max} + d_0 \times [\exp(r \times t) - 1]}. \quad (2)$$

Здесь d_0 – латентная дефектность;

d_{\max} – максимально допустимое значение дефектности;

r – скорость накопления необратимых повреждений. Эта функция используется как средство аппроксимации эмпирической закономерности (1). Подобную форму имеет аналитическое решение мягкой модели Арнольда с выражением коэффициента в виде спадающей прямой:

$$k(d) = c_0 - c_1 d.$$

Для использования произвольных спадающих зависимостей $k(d)$ соответствующее дифференциальное уравнение Арнольда приходится решать численно.

Производственные средства контроля основных технологических параметров накапливают объёмы информации постепенно. В этих обстоятельствах предлагаемые процедуры аппроксимации и экстраполяции, помимо обычно используемых линейных предсказателей, обеспечивают эффективное дополнение штатных систем промышленного мониторинга.

Прослеживалась эволюция дефектности сигнала рисунке 1 относительно контрольного уровня 39 на интервале наблюдений. На рисунке 3 представлена деградация объекта в форме эмпирической функции дефектности и её логистических аппроксимаций. На оси абсцисс номера пакетов накопленных измерений, по 300 значений в каждом.

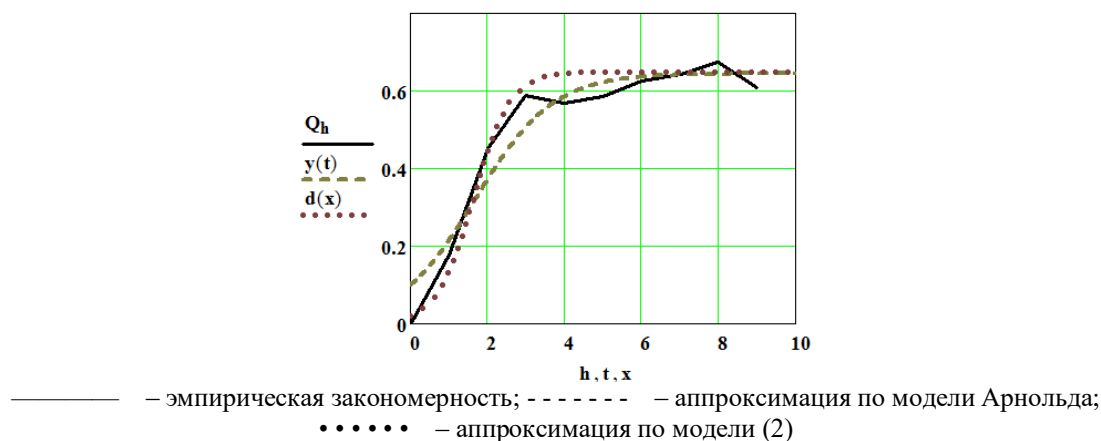


Рисунок 3 – Образ деградации (вероятность превышения параметром контрольного предела 39) объекта в форме логистических кривых [Degradation image (the probability of the parameter exceeding the control limit 39) of an object in the form of logistic curves]

Начиная с 900-ой точки измерения вероятность превышения контрольного уровня $d \approx 0,6$ с тенденцией медленного роста. По этому критерию фиксируем деградацию объекта. Линейный экстраполятор позволяет предсказать момент превышения нормативного предела с вероятностью $d \approx 1,0$.

Возможно, наблюдаемый технологический параметр модулируют несколько разнородных факторов деградации, тогда порождается семейство логистических кривых, отражающих смену доминанты в механизмах деградации. На рисунке 4 приведён пример смены доминанты. В точках $x = 7,3$ и $x = 12,2$ огибающая семейства (на рисунке не показана) претерпевает «изломы» – скачки значений первой производной. Этот феномен образует собственный набор классификационных признаков. Логистический тренд каждого наблюдаемого независимого технологического параметра можно рассматривать как отдельное пространственное измерение. Ортогональное нормированное пространство, построенное на совокупности всех логистических трендов, можно рассматривать как пространство дефектности. Траектория точки в этом пространстве – геометрический образ деградации. Огибающая семейства является монотонно возрастающей кривой – это модель динамики кумулятивных величин. В каждый момент времени дефектность объекта образует уровень, относительно которого скорость дальнейшего роста пропорциональна достигнутому значению. Логистические кривые описывают рост с насыщением, означающим наличие предельно допустимого состояния деградации. При приближении к предельно допустимому уровню рост замедляется – объект должен быть выведен из эксплуатации.

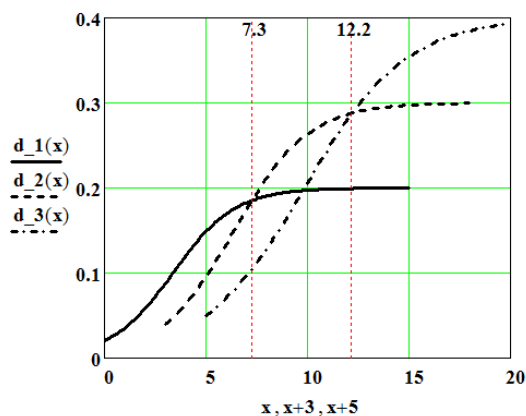


Рисунок 4 – Смена доминанты среди трёх совместно действующих факторов деградации [Change of dominant among three jointly acting degradation factors]

Заключение

В статье на информационном материале, накапливаемом при мониторинге оборудования АЭС демонстрируется возможность построения промышленной системы предсказательной диагностики. Сотни технологических индикаторов, измеряемых в течение десятилетий, образуют колоссальный объём разноразмерных данных. Отображение этих данных в единичный, безразмерный гиперкуб через показатели Хёрста или показатели дефектности решает проблемы навигации в технологическом пространстве, идентификации предотказных состояний, позволяет по-новому сформулировать задачи техногенной безопасности и критерии её достижения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 26.260.004-91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации = Procedural Guidelines – Prediction of Remaining Service Life of Equipment According to the Change in its Operational Parameters During Operation : утверждён в Концерн Химнефтемаш. – URL : <https://meganorm.ru/Data2/1/4294847/4294847460.htm> (дата обращения 09.09.2021).
2. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2016. Контроль состояния и диагностика машин : национальный стандарт Российской Федерации. Часть 1. Общее руководство = Condition monitoring and diagnostics of machines. Machine condition prognosis. Part 1. General guidelines : издание официальное : утверждён и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 ноября 2016 г. N 1770-ст : введен впервые : дата введения 2017-12-01 / подготовлен Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем». – Москва : Стандартинформ, 2017. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200142489> (дата обращения 09.09.2021).
3. Сысоев, Ю.С. и др. Прогнозирование состояний технологических объектов на основе текущего мониторинга значений их параметров с иллюстрацией на примере оборудования АЭС / Ю.С. Сысоев, А.А. Сальников, В.Г. Бекетов [и др.] // Измерительная техника, 2016. – № 4. – С. 3-7.
4. Мухаметзянов, И.З. Методические особенности применения стохастических показателей при анализе потоковых данных природных или технических процессов и объектов / И.З. Мухаметзянов, Р.А. Майский, М.Н. Янтудин // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2015. – № 5. – С. 446-492. – ISSN 1813-503X. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL : <https://e.lanbook.com/journal/issue/298795> (дата обращения: 28.09.2021).
5. Калущ, Ю.А. Показатель Хёрста и его скрытые свойства / Ю.А. Калущ, В.М. Логинов. – Новосибирск : Сибирский журнал индустриальной математики, 2002. – Т. 5, № 4. – С. 29-37.
6. Кириченко, Л.О. Сравнительный анализ статистических оценок показателя Херста // Харьков : Вестник НТУ, 2010. – № 21 – С. 88-95.
7. Ляпунова, Е.А. и др. Исследование морфологии многомасштабных дефектных структур и локализации пластической деформации при пробивании мишеней из сплава А6061 / Е.А. Ляпунова, А.Н. Петрова, И.Г. Бродова [и др.] // Санкт-Петербург : Письма в журнал технической физики, 2012. – Т.38, №1. – С. 13-20.
8. Шпицер, В.Я. Моделирование деградации оборудования атомных станций / Новочеркасск : Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова // Известия вузов. Электромеханика, 2004. – 176 с.
9. Арнольд, В.И. Теория катастроф / А.В. Игоревиц. – Москва : Едиториал УРСС, 2007. – 136 с.
10. Острейковский, В.А. Теория надёжности / В.А. Острейковский. – Москва : Высшая школа, 2003. – 463 с.
11. Cyganek B., Socha K. Computationally efficient methods of approximations of the S-shape functions for image processing and computer graphics tasks. Image Processing & Communications, 2012, vol. 16, № 1-2, pp. 19-28.
12. Дроздюк, А.В. Логистическая кривая / А.В. Дроздюк. – Торонто : Choven, 2019. – 270 с.
13. Павлов, В.Д. Программный комплекс, методы моделирования и прогнозирования многокомпонентных моделей динамических рядов с использованием функции Рамсея : специальность 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

наук / В.Д. Павлов. – Самара : Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, 2009 г. – 20 с.

14. Гнеушев, А.Н. и др. Прямой метод оценки параметров двухсегментной кусочно-логистической кривой / А.Н. Гнеушев, А.А. Гурченков, И.И. Мороз // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2018 – № 1(118). – С. 31-48.

REFERENCES

- [1] RD 26.260.004-91. Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri e'kspluatatsii. [RD 26.260.004-91. Methodical Instructions. Procedural Guidelines – Prediction of Remaining Service Life of Equipment According to the Change in its Operational Parameters During Operation]. Utverzhdyon v Koncern Himneftemash [Introduced in Khimneftemash Concern]. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294847/4294847460.htm> (reference date 09.09.2021) (in Russian).
- [2] GOST R ISO 13381-1-2016. Kontrol' sostoyaniya i diagnostika mashin : nacional'ny'j standart Rossijskoj Federacii. Chast' 1. Obshhee rukovodstvo [Condition Monitoring and Diagnostics of Machines. Machine Condition Prognosis. Part 1. General Guidelines]. Izdanie oficial'noe : utverzhdyon i vveden v dejstvie Prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 24 noyabrya 2016 g. N 1770-st : vvedyon v pervye : data vvedeniya 2017-12-01 / podgotovlen Otkrytym akcionernym obshchestvom «Nauchno-issledovatel'skij centr kontrolya i diagnostiki tekhnicheskikh sistem».[Official edition. Approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology of November 24, 2016 N 1770-st. Introduced for the first time. Date of introduction 2017/12/01. Prepared by the Open Joint Stock Company «Scientific Research Center for Control and Diagnostics Technical Systems»]. Moskva: Standartinform [Moscow: Standartinform]. 2017. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200142489> (reference date 09.09.2021) (in Russian).
- [3] Sy'soev Yu.S., Sal'nikov A.A., Beketov V.G. et al. Prognozirovaniye sostoyanij tekhnologicheskix ob'ektov na osnove tekushhego monitoringa znachenij ix parametrov s illyustratsiej na primere oborudovaniya AE'S [The Prediction of the Technological Objects Conditions Based on the Current Monitoring of their Parameters' Values with an Illustration Using the Example of NPP Equipment]. Izmeritel'naya tekhnika [The Measuring Technology]. 2016. №4. P.3-7 (in Russian).
- [4] Muxametzyanov I.Z., Majskij R.A., Yantudin M.N. Metodicheskie osobennosti primeneniya stoxasticheskix pokazatelej pri analize potokovy'x dannyx prirodn'x ili tekhnicheskix processov i ob'ektov [The Methodological Features of Stochastic Indicators in the Analysis of Natural Streaming or Technical Processes and Facilities]. E'lektronny'j nauchny'j zhurnal «Neftegazovoe delo» [The electronic scientific journal «Oil and Gas Business»]. 2015. № 5. P.446-492. ISSN 1813-503X. URL: <https://e.lanbook.com/journal/issue/298795> (reference date: 28.09.2021) (in Russian).
- [5] Kalush Yu.A., Loginov V.M. Pokazatel' Xyorsta i ego skry'ty'e svoystva [The Hirst Indicator and its Hidden Properties]. Novosibirsk. Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki [The Siberian Journal of Industrial Mathematics]. 2002. №.4. Vol.5. P.29-37 (in Russian).
- [6] Kirichenko L.O. Sravnitel'ny'j analiz statisticheskix ocenok pokazatelya Xersta [The Comparative Analysis of Statistical Estimates of the Hurst Indicator]. Xar'kov. Vestnik NTU [The NTU Bulletin]. 2010. №21. P.88-95 (in Russian).
- [7] Lyapunova E.A., Petrova A.N., Brodova I.G. et al. Issledovanie morfologii mnogomasshtabny'x defektny'x struktur i lokalizacii plasticheskoy deformacii pri probivanii mishenej iz splava A6061 [The Investigation of the Morphology of Multiscale Defect Structures and Localization of Plastic Deformation During the Penetration of Targets from the A6061 Alloy]. Saint-Petersburg. Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Letters to the Journal of Technical Physics]. 2012. V.38. №1. P.13-20 (in Russian).
- [8] Shpicer V.Ya. Modelirovaniye degradacii oborudovaniya atomny'x stancij [The Modeling of the NPP Equipment Degradation]. Novocherkassk. Yuzhno-Rossijskij gosudarstvenny'j politexnicheskij universitet (NPI) im. M.I. Platova [Novocherkassk: South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platova]. Izvestiya vuzov. E'lektromexanika [University News. Electromechanics], 2004. 176 p. (in Russian).
- [9] Arnold V.I. Teoriya katastrof [Catastrophe theory]. Moskva: Editorial URSS [Moscow. Editorial URSS]. 2007. 136 p. (in Russian).
- [10] Ostreykovsky V. A. Teoriya nadyozhnosti [The Theory of Reliability]. Moskva: Vysshaya shkola [Moscow. Higher School] 2003. 463 p. (in Russian).

- [11] Cyganek B., Socha K. Computationally efficient methods of approximations of the S-shape functions for image processing and computer graphics tasks. Image Processing & Communications. 2012. Vol.16. № 1-2. P.19-28 (in English).
- [12] Drozdjuk, A. V. Logisticheskaya krivaya [The Logistic Curve]. Toronto. Choven, 2019. 270 p. (in Russian).
- [13] Pavlov, V.D. Programmy'j kompleks, metody' modelirovaniya i prognozirovaniya mnogokomponentny'x modelej dinamicheskix ryadov s ispol'zovaniem funkcii Ramseya [The Software Package, Methods of Modeling and forecasting Multicomponent Time Series Models Using the Ramsey Function]. Special'nost' 05.13.18 «Matematicheskoe modelirovanie, chislenny'e metody' i kompleksovy' programm». Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk. [Specialty 05.13.18 "Mathematical Modeling, Numerical Methods and Program Complexes": thesis abstract for the PhD degree in Engineering]. Samara: Samarskij gosudarstvennyj aerokosmicheskij universitet imeni akademika S.P. Koroleva [Samara: Korolev Samara State Aerospace University]. 2009. 20 p. (in Russian).
- [14] Gneushev A.N., Gurchenkov A.A., Moroz I.I. Pryamoj metod ocenki parametrov dvusegmentnoj kusochno-logisticheskoy krivoj [Direct Method for Estimating the Parameters of a Two-segment Piecewise Logistic Curve]. Vestnik MGTU im. N.E'. Baumana. Seriya «Priborostroenie» [Bulletin of Bauman MGTU. «Instrument Making» series]. 2018. № 1(118). P.31-48 (in Russian).

The Predictive Diagnosis Based on Hurst Indicator and Logistics Trends

V.Ya. Shpicer¹, V.V. Krivin², V.A. Tolstov³

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

¹ORCID iD: 0000-0002-5051-5091

e-mail: shpits@mephi.ru

²ORCID iD: 0000-0003-0903-0786

WoS Researcher ID: E-2267-2018

e-mail: vkrivin@mephi.ru

³ORCID iD: 0000-0001-7144-5195

WoS Researcher ID: F-1032-2017

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

Abstract – The article presents the results of identifying pre-failure conditions. The results based on fractal analysis and nonparametric statistics. The NPP equipment units are highly reliable systems for long life cycle. These systems are characterized by slow graduating failures. This happens due to the accumulation of irreversible damage. Standard information measuring systems supply time series. They are traditionally processed by parametric methods. The processing of experimental data can be automated for industrial monitoring of NPP equipment parameters.

Keywords: diagnostics, prediction, controlled parameters, data processing, degradation, Hurst indicator, observation, monitoring, logistic methods, pre-failure conditions, standard intervals, probability distribution.

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

УДК 338.24 : 351.862.6

**ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ УРАНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ В
УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

© 2021 М.В. Головки *, А.А. Лапкис **, С.А. Мясоєдов ***

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

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

****Амурский государственный университет, Благовещенск, Амурская обл., Россия*

В данной статье рассматриваются особенности развития уранодобывающей отрасли в условиях рыночных колебаний. Приводятся экономические факторы, способствующие распространению атомной энергетики и вызывающие спрос на продукцию уранодобывающей промышленности. Выявляются конкурентные преимущества стран по добыче и поставке топлива для атомных электростанций. Делается вывод о значительном потенциале развития Российской Федерации (Госкорпорация «Росатом») на всех этапах ядерного топливного цикла, связанного с высокотехнологичным переделом уранового сырья и атомной генерацией. Отмечается проблема высоких капиталовложений и длительный временной лаг с момента разведки месторождения до пуска производственных мощностей предприятий уранодобывающей отрасли в эксплуатацию. Рассматриваются наиболее рентабельные схемы инвестирования в отрасль с учетом государственной поддержки.

Ключевые слова: уранодобывающая отрасль, атомная энергетика, АЭС, твэл, топливный цикл, цена урана, Госкорпорация «Росатом».

Поступила в редакцию 16.11.2020

После доработки 22.11.2020

Принята к публикации 26.11.2020

На сегодняшний день сформировалось достаточное количество факторов, объясняющих целесообразность развития атомной энергетики [1, 2]. Продление сроков эксплуатации атомных электростанций (далее – АЭС) свыше проектных 30-40 лет приводит к росту экономической эффективности выработки электроэнергии. Помимо этого, все большее число экспертов, политиков, общественных деятелей разных стран признают большую, по сравнению с другими электростанциями, экологичность и устойчивость по отношению к воздействию внешней среды. Например, экстремально низкие температуры в США (2014 г., 2019 г., 2021 г.) вызывают массовые перебои в энергоснабжении, а угольные, газовые и ветроэнергетические системы в подобных условиях неработоспособны, что придает большую экономическую и социальную устойчивость атомной энергетике. Особого внимания заслуживают вопросы обеспечения безопасности эксплуатации потенциально опасных объектов [3].

К экономическим факторам следует отнести постоянный рост капитальных затрат на строительство объектов атомной энергетики и каждое следующее поколение АЭС обходится дороже как за счет инфляционных процессов, так и за счет роста числа систем безопасности. В себестоимости электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, их

доля значительна, а в последние десятилетия наблюдается увеличение сроков строительства и связанный с этим перерасход ресурсов в силу неэффективного управления и усиления негативного воздействия инсайдерских рисков [4], но данная тенденция преодолевается за счет более тщательного планирования, контроля и внедрения инновационных технологий. Также возможно предусмотреть новые схемы финансирования, позволяющие снизить объемы капиталовложений и распределить риски. Удовлетворение растущих потребностей в электроэнергии среди развивающихся стран сейчас осуществляется путем использования пакета предложений «build-own-operate reactor». В контуре Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (далее – Госкорпорация «Росатом») создана структура, в компетенции которой входит продвижение на внешнем рынке интегрированных проектов Госкорпорации «Росатом» по строительству АЭС, развитию центров ядерной науки и технологий (далее – ЦЯНТ), привлечению инвестиций и т.п.

В качестве положительной тенденции можно отметить следующее. Минимизации издержек эксплуатации АЭС способствует также внедрение цифровых платформ и инструментов, разрабатываемых АО «Концерн «Росэнергоатом», и внедряемых на российских и зарубежных АЭС российского дизайна. Процесс цифровизации предполагает создание интегрированных цифровых систем для всех основных бизнес-процессов, включая управление жизненным циклом АЭС, проведением ремонтных работ, управлению персоналом, информационными коммуникациями, взаимодействием со стейкхолдерами и т.п. Помимо этого в данную систему включены цифровые продукты, обеспечивающие организацию и управление хозяйственными процессами и документооборотом, например, заключение договоров с контрагентами, контроль движения денежных потоков и проч. Осуществление бизнес-процессов и решение специализированных задач с помощью цифровых ассистентов, а также возможность внедрения указанных цифровых решений на блоках с различными типами реакторов, позволяет оптимизировать затраты, обеспечить необходимый уровень транспарентности и повысить эффективность контроля [5].

Одним из важнейших сдерживающих факторов остается политическая составляющая, проявляющаяся в стремлении групп интересов сформировать негативный имидж атомной энергетики, руководствуясь извлеченными из контекста статистическими данными, фактами, суждениями. Причины подобных устремлений могут носить как идеологический, так и экономический (конкурентный) характер, объясняться недостаточной оценкой значимости безопасности энергоснабжения и устойчивости энергосистем.

Указанные факторы, включая экономические и неэкономические, оказывают влияние на развитие уранодобывающей отрасли. Стоимость топлива в себестоимости производства электроэнергии на АЭС (включая уран, конверсию, обогащение, изготовление) составляет менее 20%. При этом электростанции, функционирующие с использованием традиционных видов топлива, например углеводородного сырья и проч., доля затрат на топливо в себестоимости составляет порядка 80%. Сырьевой основой для производства топлива для АЭС является обогащенный уран.

Следует отметить, что только незначительное количество стран мира обладает технологиями по получению обогащённого урана. В качестве ведущих компаний, занимающихся добычей урана можно выделить такие, как АО «НАК "Казатомпром"» (Казахстан), который доминирует в общем объеме, обеспечивая порядка 40% добычи, Cameco Corporation (Канада), Orano S.A., Uranium One Inc. (Россия, Госкорпорация «Росатом»), CNNC&CGN (Китай, China National Nuclear Corporation) [6]. Лидирующие позиции России обусловлены интегрированными технологическими возможностями, позволяющими обеспечивать весь цикл от добычи до фабрикации топлива (рис. 1).

Добыча	Конверсия	Обогащение	Производство обогащенного урана	Фабрикация топлива
<ul style="list-style-type: none"> ✓ АО «Уральский электрохимический комбинат» ✓ Акционерное общество «Производственное объединение «Электрохимический завод» — предприятие Топливной компании «ТВЭЛ» ✓ ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение имени Е. П. Славского» ✓ АО «Хиагда» 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ АО «Сибирский химический комбинат» ✓ АО «Ангарский электролизный химический комбинат» ✓ АО «Чепецкий механический завод» 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ АО «АЭХК» ✓ АО «Далур» ✓ АО «АРМЗ» 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ АО «ПО Электрохимический завод» ✓ АО «Сибирский химический комбинат» ✓ АО «Ангарский электрохимический комбинат» ✓ ФГУП «ПО Маяк» 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ АО «Машиностроительный завод» ✓ АО «Московский завод полиметаллов» ✓ АО «Чепецкий механический завод» ✓ ПАО «Новосибирский завод химконцентратов»

Рисунок 1 – Технологические мощности Российской Федерации в уранодобывающей отрасли
[Russian Federation technological capacities in the uranium mining industry]

Добыча урана производится с целью его последующей реализации, а также для обеспечения собственного производства ураносодержащей продукции более высокой степени передела, ТВЭЛов и тепловыделяющих сборок (далее – ТВС). Согласно оценкам различных инвестиционных компаний, уровень затрат на урановое сырьё в себестоимости ядерного топлива достигает 20-30% в западных странах и до 50% в российском производстве [7, 8]. Это обуславливает различный уровень чувствительности экономических субъектов к изменениям конъюнктуры на мировом рынке уранового сырья. Наибольшее влияние колебания рынка оказывают на производителей урана, осуществляющих добычу сырья с целью его реализации. Производители, входящие в контур вертикально-интегрированных структур и поставляющих уран для производства ядерного топлива для атомных электростанций, находятся в меньшей зависимости от указанного экономического фактора, т.к. имеют более высокую рентабельность при производстве твэлов и ТВС [9].

В современных условиях на мировом рынке уранового сырья наблюдается тенденция превышения предложения над спросом. Во многом это связано с выводом из эксплуатации значительного количества реакторов, что связано как с эксплуатационными особенностями (завершением срока эксплуатации), так и негативными последствиями в результате аварий на АЭС. Планируемые объёмы ввода новых реакторов недостаточны для компенсации отрицательной динамики спроса на сырьё.

В то же время, отмечается падение мировых цен на оксид урана с 73 долларов США в 2010 г. до 17,7 долларов США в 2017 г. Основной причиной, по оценкам экспертов, послужила авария на АЭС «Фукусима-1» в Японии, положившая начало общественному резонансу в мировых масштабах о крайне высокой опасности ядерной энергетики в целом.

В целом можно выделить следующие факторы, влияющие на цену урана:

- объёмы производства;
- динамика спроса;
- влияние биржевых ситуаций – спекуляции, новостной фон и проч.;
- сроки поставок.

До 2007 г. уран не торговался на бирже, однако, резкое повышение спроса на него, достигшее пятикратного размера за пять лет, привело к необходимости введения нового торгового инструмента биржей NYMEX. Цена урана того периода достигала рекордной отметки в 140 долларов США за контракт, но в 2008 г. произошёл обвал цен

и к 2010 г. цена на уран составила 40-42 доллара США. Это явление получило название «уранового пузыря», не оказавшего, при этом, серьезного влияния на крупных потребителей, имеющих долгосрочные контракты.

Как видно на рисунке 2 [9], в ноябре 2016 г. цена урана достигла минимума в 17,75 долларов США за фунт U_3O_8 .



Рисунок 2 – Фьючерс на уран в период 2016-2021 гг. [Uranium futures for the period 2016-2021]

С сентября 2019 г. фьючерсный контракт торгуется по 25,20 долларов США, динамика изменения стоимости фьючерсов урана данного периода представлена на графике на рисунке 3 [10].



Рисунок 3 – Фьючерс на уран в 2019 г. [Uranium futures in 2019]

В течение семи лет наблюдается снижение цен на оксид урана. Это стало предпосылкой для оптимизации производственных мощностей компаний, занимающихся добычей урана, привело к консервации ряда месторождений. В 2018 г. Kazatomprom, Cameco Corporation объявили о вынужденном сокращении численности персонала, что влечет за собой крайне негативные социально-экономические последствия, а также об уменьшении размеров дивидендов. В результате был достигнут определенный баланс на рынке.

В то же время, необходимо принимать во внимание такие специфические особенности уранодобывающей отрасли, как высокие капиталовложения и продолжительность временного лага от момента разведки месторождения до пуска производственных мощностей в эксплуатацию. В связи с этим не исключены возможности резкого роста цен на фоне снижения спроса. Так, в 2021 году рост биржевых цен на уран составил более чем 60%. В качестве основных причин подобного скачка отмечают следующие:

- ввод в эксплуатацию ранее законсервированных объектов осуществляется, как правило, в случае устойчивого повышательного тренда цен на сырье;
- высокие административные барьеры на пути внедрения новых проектов по разработке новых месторождений урана, высокие затраты создание необходимой инфраструктуры, длительные сроки реализации данных проектов и возможные конъюнктурные колебания на фоне недостаточного предложения;
- спекулятивные операции, осуществляемые некоторыми компаниями, заключающиеся в скупке излишков урана для создания искусственного дефицита;
- строительство новых АЭС и эксплуатация существующих, вне зависимости от усиления негативного отношения к атомной энергетике, в силу большей экономической эффективности данного вида энергии для промышленности многих стран.

По расчетам экспертов МАГАТЭ, в структуре себестоимости электроэнергии на АЭС более 50% занимает амортизация, затем стоимость топлива и издержки на эксплуатацию. Следовательно, при снижении рыночной цены на уран себестоимость атомной энергии снижается, делая объекты атомной энергетике более привлекательными для инвесторов, нежели нефте- и газодобывающие отрасли.

Как было сказано выше, ядерная энергетика занимает ведущее место в энергобалансе многих стран, и оно будет достаточно стабильным, однако, поскольку производство ядерного топлива связано с серьёзными сложностями, эксперты отмечают необходимость трансформации управленческих механизмов [11] уранодобывающих компаний для наибольшего соответствия рыночной конъюнктуре. Можно выделить маркетинговые, производственные и управленческие механизмы. К маркетинговым относится отказ от продаж сырья на спотовом рынке и от долгосрочных контрактов поставки. Изменение производственных механизмов предполагает приостановку производственных программ и программ развития, геолого-разведочных работ, оптимизацию численности персонала, сокращение добывающих мощностей. Управленческие механизмы должны быть направлены на реорганизацию логистических процессов, создание крупных вертикально-интегрированных структур, снижение дивидендов, внедрение инноваций. Особое значение приобретает получение технологий по производству твэлов и ТВС странами, не владеющими такими технологиями, т.к. они обеспечивают более высокую прибыль, нежели продажи закиси-окиси урана. Для Российской Федерации, владеющей технологиями конверсии, изотопного обогащения и производства готового ядерного топлива, актуальным является снижение производственных потерь на всех этапах передела уранового сырья.

Государственные органы стремятся обеспечить приток инвестиций в уранодобывающую промышленность, для этих целей:

- снижаются экологические нормы доступа к разработке либо по воздействию на окружающую среду (в Японии после аварии на Фукусима-1 были пересмотрены нормы предельных концентраций в продуктах питания);
- создаются условия для снижения бюрократических барьеров при строительстве, открытии новых рудников (Казахстан для разработки собственных месторождений привлёк китайские, японские, французские, американские, канадские, российские

компании, в обмен на кредиты, инвестиции, технологии, политическую поддержку на мировой арене, аналогично действуют и африканские государства, но в меньших объемах);

- специальные службы государств, владеющих технологиями по производству ядерного оружия, обогащения урана, фабрикации ядерного топлива, по захоронению, хранению отработанных ядерных отходов активно противостоят попыткам распространения и получения данных технологий.

Российская Федерация владеет всеми технологиями ядерного топливного цикла, в связи с чем предлагает на экспорт ядерное топливо различных степеней передела. Так, на рынок, США до последнего времени направлялся низкообогащенный уран, получаемый путём разбавления излишков оружейного урана, в том числе по соглашению от 1993 г. между правительствами России и США, так называемого ВОУ-НОУ (перевод высокообогащенного урана из ядерного оружия в низкообогащенный уран). При этом для европейских АЭС с реакторами типа PWR западного дизайна с 2016 г. успешно поставляется топливо типа ТВС-КВАДРАТ. В 2016-2019 гг. активно шли переговоры и по поставке такого топлива в США. Тем не менее, российское ядерное топливо прошло полный цикл испытаний и работает на АЭС Швеции, демонстрируя высокий уровень надёжности.

В связи с применением на российских обогатительных комбинатах наиболее эффективной и дешёвой технологии газового центрифугирования, интерес представляет также предоставление услуг по дообогащению обеднённого, или «отвального» урана в форме ГФУ. Такого рода контракты действовали между предприятиями России и Германии в 2000-х годах и продолжают действовать с 2019 г. Перерыв во ввозе отвального урана из Германии объясняется как экономическими, так и политическими причинами. Так, отвальный уран не является по действующим нормативно-техническим документам радиоактивными отходами, но воспринимается так общественностью и экологическими организациями. Сторонники ввоза отвального ГФУ для дообогащения считают, что оно приводит к расширению ресурсной базы для отечественной двухкомпонентной ядерной энергетики, как в части обеспечения ураном, так и фтором. Однако длительное хранение отвального урана требует его перевода в безопасную форму – обесфторивания, с получением отдельно уранового продукта и отдельно фтороводорода. Таким образом, очередной раз подтверждается, что международные сделки в области поставки урановых продуктов всегда являются результатом политического процесса и находятся под сильнейшим воздействием общественно-политических факторов.

Наибольшая рентабельность достигается организациями при реализации ураносодержащей продукции высокой степени передела, полученной от процесса фабрикации уранового топлива. Результатом процесса фабрикации является производство топливных сборок для реакторов АЭС. Фабрикация уранового топлива в Европе производится в следующих странах:

- в Бельгии – завод Dessel, специализация – узлы для PWR, топливные гранулы и твэлы, специализация по производству из МОКС-топлива;

- в Великобритании – завод Springfields, специализация – порошок, таблетки и ТВС;

- в Германии – завод Линген (Lingen), специализация – узлы для активной зоны, порошок закиси-окиси урана (U_3O_8), топливные таблетки, твэлы;

- в Испании – завод Juzbado, специализация – топливные таблетки и ТВС;

- во Франции – завод Pierrelatte (Drome), специализация – комплектующие для PWR сборок; завод Romans-sur-Isere (Drome), специализация – окись урана (UO_2), топливные таблетки, форсунки, твэлы и узлы для PWR [12].

Прибыльным считается торговля единицей на рынке фабрикации – ТВС, которая производится для определённых типов реакторов. По действующим нормам Евросоюза, все АЭС должны иметь как минимум два поставщика ядерного топлива. Конкуренты, используя данное правило, вытеснили компании, входящие в Госкорпорацию «Росатом», из ряда бывших социалистических стран, где функционировали АЭС, построенные СССР.

Одним из примеров политизированного принятия решений о поставке ядерного топлива определённым поставщиком является широко известная история поставок ядерного топлива производства Westinghouse на украинские АЭС, эксплуатирующие реакторы типа ВВЭР советской постройки. Указанному поставщику потребовались годы на опытную эксплуатацию и доработку шестигранных ТВС, требуемых реакторами ВВЭР-1000. При этом российское топливо корпорации АО «ТВЭЛ» было полностью доработанным и с длительной историей эксплуатации в реакторах такого типа. В настоящее время Украина продолжает вести курс на диверсификацию поставок, совмещая поставки российского и американского топлива на реакторы ВВЭР-1000, при этом компания Westinghouse планирует вытеснить Госкорпорацию «Росатом» и из поставок топлива для реакторов ВВЭР-440. В Госкорпорации «Росатом» считают, что изменение поставщика ядерного топлива в ходе эксплуатации действующих энергоблоков подвергает АЭС, ее персонал и население страны дополнительным рискам. Российская Федерация активно участвует в проектах по строительству АЭС в Китае, Индии, Иране. Достигнуты соглашения с Белоруссией, Турцией, Бангладеш, по некоторым проектам начаты работы. По разным причинам, завершились неблагоприятным итогом переговоры с Болгарией (Belene/Kozloduy 7), Украиной, ЮАР (Thyspunt), Нигерией, Аргентиной (Atucha 5), Индонезией (Serpong), Иорданом (Al Amra), Вьетнамом (Ninh Thuan 1) и другие проекты [6].

Острая конкурентная борьба на рынке высокотехнологичной ураносодержащей продукции ведётся с использованием разных инструментов, в том числе в виде активной государственной поддержки предприятий для обеспечения доступа к месторождениям, контрактам на обработку уранового сырья, по заключению контрактов на строительство АЭС, поставку ТВС, обслуживания АЭС. С целью получения технологий по производству высокоэффективных ураносодержащих продуктов, ведущие страны по добыче урана создают совместные предприятия, предоставляя в разработку на своей территории урановые месторождения. Это способствует росту экономического эффекта всех стейхолдеров. Схемы возможных алгоритмов инвестирования в уранодобывающую промышленность представлены на рисунке 4.



Рисунок 4 – Возможные алгоритмы инвестирования в уранодобывающую промышленность
[Possible algorithms to invest in the uranium mining industry]

На основе вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Уранодобывающая отрасль подвержена преимущественно рискам общего характера, присущим атомной энергетике в целом. Спрос и цены на урановое сырьё находятся под значительным влиянием достигнутого и планируемых уровней развития атомной энергетике.

2. Развитие атомной энергетике определяется ресурсным обеспечением со стороны уранодобывающей отрасли, требованиями энергосистем к устойчивости и объёмам энергоснабжения, а также политическими процессами между странами-носителями и потребителями ядерных технологий.

3. Сделки на урановом рынке представляют собой как традиционный вид деятельности по поставкам сырья, так и включают в себя элементы политического давления, в связи с двойным назначением ядерных материалов – возможности их применения, как в целях выработки энергии, так и в целях изготовления ядерных боеприпасов в нарушение международных договоров.

4. В настоящее время рыночные цены на уран находятся вблизи исторических минимумов, но в прошлом показывали значительную волатильность.

5. Наибольшую устойчивость к ценовым рискам в условиях меняющихся цен на сырьё и политических договорённостей будет демонстрировать интегрированная корпорация, совмещающая добычу урана, производство ядерного топлива, атомную генерацию и переработку ядерного топлива, что подтверждается успешным примером роста установленной мощности АЭС и глобального расширения портфеля заказов Госкорпорации «Росатом».

6. Российская Федерация обладает значительным потенциалом развития на всех этапах ядерного топливного цикла, связанных с высокотехнологичным переделом уранового сырья и атомной генерацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ferraris M., Florio M.* Public Enterprises in a Global Perspective in the Last Decade. Milan, 2015.
2. *Дементьев, В.Е.* О характере российской «догоняющей модернизации» и ее институциональном обеспечении // Российский экономический журнал. – 2005. – № 2. – С. 21-29.
3. *M.A. Kolomiets, A.A. Lapkis and O.F. Tsuverkalova.* Decision support system for WWER-1000 reactivity management // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1488, International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems (EDCS 2019) 20-22 November 2019, Tomsk, Russia.
4. *Plotnikov V., Golovko M., Fedotova G., Rukinov M.* (2020), «Ensuring national economic security through institutional regulation of the shadow economy», in Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 87, pp. 342-351.
5. «Росэнергоатом» разрабатывает цифровые платформы и инструменты для АЭС – [Электронный ресурс]. – URL: <https://strana-rosatom.ru/>- (дата обращения 12.02.2021)
6. *Мясоедов, С.А.* Оценка уровня устойчивого экономического развития и экономическая безопасность отраслей минерально-сырьевого комплекса / С.А. Мясоедов // Экономические науки. – 2018. – № 12(169). – С. 65- 69.
7. *Михайловский, А.А.* Повышение эффективности уранодобывающих предприятий в условиях сырьевого дефицита / А.А. Михайловский, Е.С. Мелехин // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2019. – № 1(164). – С. 46-53.
8. *Ералин, Ж.М.* Разработка моделей решения ключевых проблем стратегического развития уранодобывающего предприятия / Ж.М. Ералин, С.Н. Гончаренко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 4. – С. 199-208.
9. *Андреев, Л.* Об экономике российской ядерной электроэнергетики / Л. Андреев // Доклад объединения Bellona, 2011. – [Электронный ресурс]. – URL:

- https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2015/07/fil_economy_05_BW_obl1.pdf (дата обращения 12.09.2021)
10. UXC URANIUM U3O8 FUTURES (CONTINUOUS: CURRENT CONTRACT IN FRONT). [Электронный ресурс] – URL: <https://ru.tradingview.com/symbols/COMEX-UX1/>
 11. Святецкий, В.С. Стратегия технологического развития уранодобывающей отрасли России / В.С. Святецкий, И.Н. Солодов // Горный журнал. – 2015. – №7. – С. 68-77.
 12. World Nuclear Association, February 2018, «World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements», URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>.

REFERENCES

- [1] Ferraris M., Florio M. Public Enterprises in a Global Perspective in the Last Decade. Milan, 2015 (in English).
- [2] Dement'ev V.E. O haraktere rossijskoj «dogonyayushchej modernizacii» i ee institucional'nom obespechenii [Nature of Russian «Catch-Up Modernization» and its Institutional Support]. Rossijskij ekonomicheskij zhurnal [Russian Economic Journal]. 2005. №2. P. 21-29 (in Russian).
- [3] Kolomiets M.A., Lapkis A.A. and Tsuverkalova O.F. Decision Support System for WWER-1000 Reactivity Management // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1488, International Scientific Conference on Electronic Devices and Control Systems (EDCS 2019) 20-22 November 2019, Tomsk, Russia (in Russian).
- [4] Plotnikov V., Golovko M., Fedotova G., Rukinov M. (2020), «Ensuring National Economic Security through Institutional Regulation of the Shadow Economy», in Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 87. P. 342-351 (in English).
- [5] «Rosenergoatom» razrabatyvaet cifrovye platformy i instrumenty dlya AES [Rosenergoatom Develops Digital Platforms and Tools for Nuclear Power Plants]. URL: <https://strana-rosatom.ru/> (reference date 12.02.2021) (in Russian).
- [6] Myasoedov S.A. Ocenka urovnya ustojchivogo ekonomicheskogo razvitiya i ekonomicheskaya bezopasnost' otraslej mineral'no-syr'evogo kompleksa [Assessment of Level of Sustainable Economic Development and Economic Security of Mineral Resource Complex Industries]. Ekonomicheskie nauki [Economic Sciences]. – 2018. – № 12(169). – P. 65-69 (in Russian).
- [7] Mikhailovsky A.A., Melekhin E.S. Povysheniye effektivnosti uranodobyvayushchikh predpriyatiy v usloviyakh syr'evogo defitsita [Improving the efficiency of uranium mining enterprises in conditions of raw materials shortage]. Mineral'nyye resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye [Mineral resources of Russia. Economics and Management]. 2019. №1(164). P.46-53 (in Russian).
- [8] Eralin Zh.M., Goncharenko S.N. Razrabotka modeley resheniya klyuchevykh problem strategicheskogo razvitiya uranodobyvayushchego predpriyatiya [Development of models for solving key problems of strategic development of a uranium mining enterprise]. Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2019. №4. P. 199-208 (in Russian).
- [9] Andreev L. Ob ekonomike rossijskoj yadernoj elektroenergetiki [Economics of the Russian Nuclear Power Industry]. Doklad ob"edineniya Bellona [Bellona report], 2011. URL: https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2015/07/fil_economy_05_BW_obl1.pdf (reference date 12.09.2021) (in Russian).
- [10] UXC URANIUM U3O8 FUTURES (CONTINUOUS: CURRENT CONTRACT IN FRONT). URL: <https://ru.tradingview.com/symbols/COMEX-UX1/> (in English).
- [11] Svyatetsky V.S., Solodov I.N. Strategiya tekhnologicheskogo razvitiya uranodobyvayushchey otrasli Rossii [The strategy of technological development of the uranium mining industry in Russia]. Gornyy zhurnal [Mining Journal]. 2015. №7. P.68-77 (in Russian).
- [12] World Nuclear Association, February 2018, «World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements», URL:<http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx> (in English).

Issue of Compliance Control Efficiency at Nuclear Industry Enterprises in Economic Crisis Conditions

M.V. Golovko^{*1}, A.A. Lapkis^{**2}, S.A. Myasoedov^{***3}

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

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

**** Amur State University, Ignatievskoe highway 21, Blagoveshchensk, Amur region, Russia 675027*

¹ORCID iD: 0000-0002-4835-9800

WoS Researcher iD: J-2461-2016

e-mail: golovko178@mail.ru

²ORCID ID: 0000-0002-9431-7046

e-mail: AALapkis@mephi.ru

³ORCID iD: 0000-0002-5636-3834

e-mail: myasoedov8@mail.ru

Abstract – The article considers the features of the uranium mining industry development in the context of market fluctuations. The economic factors contributing to the spread of nuclear energy and causing the demand for the products of the uranium mining industry are presented. The competitive advantages of countries in the production and supply of fuel for nuclear power plants are revealed. The conclusion is made about the significant development potential of the Russian Federation (SC "Rosatom") at all stages of the nuclear fuel cycle associated with high-tech repartition of uranium raw materials and nuclear generation. The problem of high capital investments and a long-time lag from the moment of exploration of the deposit to the commissioning of production facilities of the uranium mining industry enterprises is noted. The most profitable investment schemes in the industry are considered taking into account government support.

Keywords: uranium mining industry, nuclear energy, nuclear power plants, fuel elements, fuel cycle, uranium price, State Atomic Energy Corporation Rosatom.

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

УДК 338.48

**СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МАРКЕТИНГА
ТУРИЗМА В ЗОНЕ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС**

© 2021 Т.С. Попова

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

В работе рассмотрены основные положения экономики впечатлений, наибольший потенциал которой раскрылся в туристическом бизнесе. Продажа эмоций от путешествий, экстремальных увлечений и новых знаний – всё более экономически выгодна, и туристические компании расширяют список своих предложений. В последнее время появилось много новых, иногда очень странных, видов туризма. Развитие технического прогресса в XX веке послужило толчком для развития необычного вида туризма – индустриального. Отдельный подвид индустриального туризма – атомный. Спустя уже не одно десятилетие после аварии Чернобыльская зона остается непригодной для жизни. Но даже несмотря на это, она имеет будущее. Чиновники и туроператоры соглашаются, что туризм в Чернобыле – это не только немалые экономические выгоды для страны, но и возможность рассказать миру свою историю.

Ключевые слова: экономика впечатлений, социокультурный аспект ядерной энергетики, принципы безопасности, маркетинг туризма, атомный туризм, Чернобыльская АЭС.

Поступила в редакцию 15.10.2021
После доработки 21.11.2021
Принята к печати 26.11.2021

Очевидно, что элементов, входящих в традиционный микс маркетинга «4Р», недостаточно для того, чтобы охватить все виды деятельности, которые представлены в комплексе маркетинга туристических услуг. «Расширение» традиционного состава маркетингового инструментария обусловлено тем, что у каждого туриста свой набор приоритетных критериев при выборе туристического направления или туроператора. Как правило, товары, приобретаемые человеком, можно потрогать, увидеть, оценить их качественные характеристики, но это не относится к сфере туристических услуг. В этом случае клиент увидит выгоду от вложенных средств только после оказания туристической услуги.

Очевидно, что на рынке туристических услуг, очень высокую значимость имеет коммуникационное взаимодействие. Турист, приобретая туристический продукт (услугу) попадает в определенную среду и в некоторые непривычные для него условия. В этом случае маркетинговые коммуникации призваны осуществлять социальную и психологическую поддержку потребителя, предоставляя актуальные и правдивые данные о приобретенном туристическом продукте [1].

Отличительные характеристики туристических услуг можно свести к следующим параметрам [2]:

1. Неспособность к хранению. Отделам маркетинга и рекламы в туристической организации необходимо создать условия спроса и заинтересовать потенциального

потребителя в краткосрочный период, когда использование предполагаемых услуг пока еще актуально, и покупательские предпочтения не изменились.

2. Неосвязаемость услуг. Клиент получает полное предоставление о качестве приобретенной услуги, только после ее получения. В связи с этим, чтобы турист отдал предпочтение конкурентному туроператору, у него (туроператора) должен быть высокий уровень престижа, лояльности со стороны потребителей, он должен быть известным и востребованным.

3. Приверженность сезонным колебаниям. В межсезонье спрос на туристические услуги падает, в связи с этим, отделам маркетинга необходимо продумывать и запускать эффективные методы поддержки туристического бизнеса: скидки на ряд направлений, акции, дополнительные услуги.

4. Статичность. Туристическая организация привязана к тем туристическим направлениям, с которыми она работает. Таким образом, уровень благоприятности конкретного места для посещения туристами в определенное время, напрямую влияет на доходность туроператора.

5. Несовпадение во времени факта продажи услуги и ее потребления. Клиент оплачивает услугу до ее получения и для того, чтобы потребитель не испытывал дискомфорт, туроператору необходимо предоставить полную и правдивую информацию о предстоящей поездке, создать у клиента позитивный настрой, ощущение получаемых выгод и удовольствий от путешествия.

Любой экономически самостоятельный субъект, каким и является туристическая фирма или туроператор, должен внедрять в свою маркетинговую деятельность системный подход. Нарушение этого принципа, то есть бессистемное управление маркетинговым потенциалом, делает такой субъект слабым звеном при наличии на туристическом рынке жесткой конкуренции. Маркетинговые коммуникации в туризме позволяют обеспечить не только полное удовлетворение потребностей клиентов, но и обеспечить конкурентное преимущество на фоне других туристических агентств.

Маркетинг можно назвать стратегической философией туристического бизнеса, которая устанавливает, какие услуги и для какой группы потребителей будут реализовываться, определяет цену на эти услуги и рынки сбыта, способы продвижения услуг. Кроме того, маркетинг координирует деятельность туроператора, определяя его рыночные цели и оценивая степень их достижение, а также дисциплинирует организацию и всех её сотрудников в вопросе рыночного взаимодействия. С помощью маркетингового инструментария можно добиться эффективного функционирования фирмы в турбулентной, быстро меняющейся и растущей туристической отрасли [3].

Но справедливости ради стоит отметить, что такие традиционные достопримечательности, как Диснейленд, Эйфелева башня, Ласточкино гнездо или Останкино сейчас уже не столь популярны среди туристических маршрутов как это было ранее. Наибольшей популярностью стали пользоваться те виды туризма, которые позволяют клиентам турфирм получать качественно новые впечатления. Суть эволюции потребительского поведения в том, что самой лучшей на Земле вещью оказывается вовсе не вещь, а именно чувства, эмоции и выше упомянутые впечатления, возникновение которых обязательно связано с созданием новой ценности для клиента. Люди экономят время и средства в течение года для того, чтобы выбирая направление для путешествия, сделать акцент на более запоминающиеся для них яркие чувства.

Приходится констатировать, что тенденции либерализации политики в отношении явлений, причислявшихся ранее к разряду социально осуждаемых, способствуют более активному их вовлечению в легальный потребительский рынок и превращению во всё более заметный элемент экономики впечатлений. «Экономика опыта» или «экономика впечатлений» («The Experience Economy») – относительно недавний термин и, соответственно, концепция, отражающая новую модель

потребления. Это явление базируется на идее о том, что в последние два десятилетия вне зависимости от инфляции и политических циклов наблюдается тенденция сокращения физического (материального) потребления с одновременным ростом затрат на впечатления и ощущения, а также на досуговое времяпровождение [4].

В научных кругах всё чаще обсуждаются проблемы экономики впечатлений как двигателя экономического роста. Теория экономики впечатлений создавалась как универсальная, применимая к максимально возможному разнообразию и количеству отраслей, сфер и сегментов рынка. В наибольшей степени её потенциал раскрылся в туристическом бизнесе.

В последнее время появилось много новых, загадочных, таинственных, а иногда очень даже странных видов туризма. Подавляющая часть посещений необычных объектов и предпочтений вписывается в рамки допустимых стандартов современной поп-культуры развлечений. Вместе с тем, получает распространение и туризм контркультуры или контртуризм, направленный на изучение необычных, негативных, деструктивных феноменов, осуждаемых или отвергаемых обществом. В их числе и самые неординарные, такие как: фестиваль туризм, духовный туризм (не путать с паломничеством), шопинг-туризм, медицинский туризм, джайлоо-туризм, кинотуризм, гастрономический туризм и прочие виды. Такой туризм пользуется огромной популярностью, потому что помогает получить новые, яркие эмоции, побороть человеку свои фобии [5].

Места, где произошло огромное количество смертей – так называемый «тёмный туризм» – разворачивается вокруг всего, что имеет какое-либо отношение к смерти, стихийным бедствиям, трагедиям и даже к загробной жизни. Например, замок Дракулы в Румынии посещает 2 млн туристов в год.

Зоны активных военных действий тоже популярны. Основная цель туристов при этом – испытать, каково это быть посреди бомб, пуль и гранат (военный туризм). Во время войны в Афганистане было зарегистрировано рекордно высокое количество военных туристов, а также сообщений о случаях гибели посетителей [6].

С середины 2000-х в связи с продвижением хип-хоп культуры, зародившейся в гетто, получил распространение гетто-туризм. Местами паломничества молодых людей стали соответствующие территории Детройта, Нью-Йорка, Чикаго, Лос-Анджелеса.

Места, связанные с самоубийством и эвтаназией – это векторы развития суицидального туризма. Он вызывает интерес у людей, желающих отправиться в страны, где разрешена эвтаназия (Швейцария, Нидерланды, Бельгия, некоторые штаты США). Среди «идеальных» для суицида живописных мест: мост Золотые ворота (Сан-Франциско, США), мост Мапо (Южная Корея), лес Аокигахара (Япония), скалы Бичи-Хед (Великобритания) и другие [7].

Развитие НТП послужило толчком для развития очередного нестандартного вида туризма – индустриального и одного из его подвидов – атомного туризма. Поклонники атомного туризма ездят в Хиросиму и Нагасаки, в префектуру Фукусима. Но самый знаменитый объект атомного туристического направления – ЧАЭС и Припять. Их можно посетить на коммерческой основе. И что немало важно – объекты пользуются необычайным спросом.

В середине 90-х годов прошлого столетия, когда в Зоне отчуждения серьезно сократился уровень радиации, появились и первые «туристы» – мародеры, которые вывезли и распродали все найденные на месте трагедии ценные вещи. В 1995 году было создано Агентство информации, международного сотрудничества и развития «Чернобыльинтеринформ», целью которого агентства была организация уже официальных поездок в Припять [8].

Когда только начали возить в чернобыльскую зону туристов – у многих было отторжение такого турбизнеса – и не только из-за боязни радиации, но из-за того, что

это место людской трагедии... В 2002-м вышел доклад ООН, согласно которому в большинстве мест зоны отчуждения отныне можно было находиться без особого вреда для организма. С тех пор число туристов, посетивших Чернобыль, ежегодно растет (рис. 1):

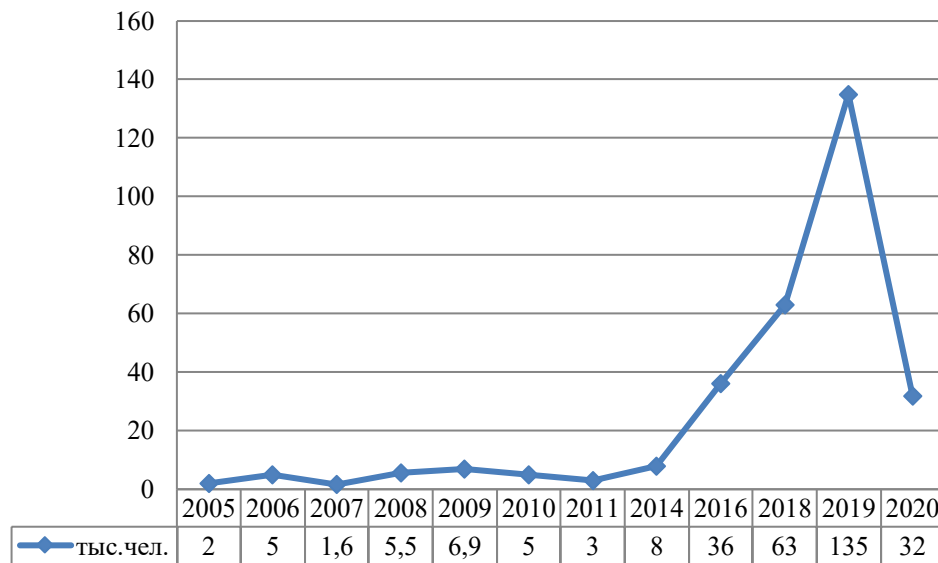


Рисунок 1 – Количество туристов в Зоне отчуждения Чернобыльской АЭС [The number of tourists in the Chernobyl NPP Exclusion Zone]

В 2012-2013 гг. был запрет на посещение туристами Припяти и Чернобыля, поэтому на графике эти года не обозначены. До 2014 г. именно россияне считались самыми активными потребителями туров по данным направлениям. События в ДНР и ЛНР заставили турфирмы сделать ставку на гостей из Европы и Америки. Заметный подъем туристической активности пришелся на 2019 г. в связи с тем, что в прокат вышел телевизионный мини-сериал «Чернобыль» в жанре исторической драмы, созданный американским телеканалом НВО [9].

Туризм в зонах радиационных аварий – это необходимый элемент системы ликвидации их долговременных последствий. Это первый нормальный, нечрезвычайный вид деятельности, который туда заходит. А с ним – необходимость поднимать инфраструктуру, привлекать инвестиции. Туризм хорош еще и тем, что стимулируя социально-экономическое возрождение Зоны и прилегающих заселенных территорий, не требует финансирования от государства. Более того, он дает деньги в бюджет страны, в ее экономику [10].

В феврале 2021 г. в Украине был подписан меморандум о развитии посещения территории зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. Активно развивающийся туризм в районе Чернобыльской АЭС дает возможность воочию оценить масштабы катастрофы, произошедшей 26 апреля 1986 г., прочувствовать положительные изменения и жизнь в ранее «мертвой» зоне. Притягательность Припяти как раз в том, что она умирает. Это заставляет ценить ее жизнь в каждом мгновении. Находясь там очередной раз, уже сложно о чем-то задуматься, но после, остается то, что заставляет возвращаться. Во время прикосновения к ней впечатления смешаны, туманные и неразборчивые, но стоит ее покинуть, и в голове заполняются пробелы, вырисовывается вдохновляющая картина.

Многие считают туристические маршруты в Припять сложными с моральной и этической точек зрения. Но зону однозначно нужно ставить на службу людям. Она очень важна в экономическом, социальном, политическом и культурно-символическом

смысле. Сейчас в мире это одно из самых знаменитых мест для тех туристов, кто путешествует по Украине.

До аварии на Чернобыльской АЭС в 30-километровой зоне проживало порядка 13 тыс. человек. Сегодня это 1500 человек, учитывая работников и нелегальных жителей, которые остались здесь после взрыва или приехали позже. Уже в середине 90-х уровень радиации значительно снизился, что дало толчок к развитию туризма. Сегодня зону посещают туристы из разных стран в рамках индивидуальных или групповых экскурсий.

2600 км² зараженной земли ограждает колючая проволока. По периметру размещены КПП, где круглосуточно дежурит военизированная охрана. Вход на территорию – только по специальным пропускам. Охраняют Чернобыльскую зону пограничники, сотрудники МВД, СБУ и Национальная гвардия.

Чернобыльская зона – это настоящий музей Советского Союза. Эта земля хранит артефакты прошлого, а радиация – лучший сторож, обеспечивающий их сохранность. И хотя мародерство здесь процветает, многие интересные экспонаты все еще сохранились. Скрипучие качели, ржавые надписи на зданиях, брошенные наспех куклы, книги, одежда, мебель... Все это без человека постепенно разрушается. И лишь природа в отсутствие людей благоухает. Известно, что животный и растительный мир не сильно пострадал от радиации и со временем на опустошенной территории начали появляться редкие представители флоры и фауны, отнесенные в Красную книгу. Так что любопытному туристу есть, над чем задуматься, на что посмотреть, о чем печалиться и чем восхищаться в зоне отчуждения [12].

Проблему незаконного туризма решат правильный маркетинг и хорошие маршруты. Изначально Украина не видела в Чернобыле туристического потенциала. Территория едва охранялась, поэтому в Зону наведывались мародёры, браконьеры, сталкеры и бандиты. С годами ситуация изменилась: теперь украинские власти хотят создать «зелёный коридор для туристов» и превратить Чернобыль из тёмного пятна на репутации страны в настоящую достопримечательность. Чем дальше город находится без жизни, тем больше он разрушается, и тем больше он кажется античным. Его популярность не пропадет никогда, потому что невозможно забыть такую катастрофу, как авария на ЧАЭС. Наоборот, о ней хочется все больше и больше узнавать. Экскурсия в Припять – самый безопасный и интересный способ сделать это.

Больше всего туристов интересуют город Припять, саркофаг четвертого энергоблока ЧАЭС, а также секретный радар советских времен – Дуга-1. Однако в Минприроды уверены, что потенциал Чернобыльской зоны больше чем традиционные места туристического маршрута. Для дальнейшей популяризации данного туристического направления, нужно развивать инфраструктуру и в Чернобыле, и в прилегающих районах [11].

Как ни парадоксально, но туризм в Чернобыле стремительно развивается. Ежегодно город-призрак посещают тысячи туристов со всего мира и этот показатель с каждым годом возрастает. Зона отчуждения Чернобыльской атомной электростанции как магнит манит туристов. Заброшенные города и унылые пейзажи Чернобыля журнал *Forbes* приравнял с экзотикой. В 2009 всемирно известное американское издание назвало зону отчуждения самым экзотическим местом для туризма.

Министерство культуры и информационной политики планирует подать заявку на внесение зоны Чернобыльской аварии в список Всемирного наследия ЮНЕСКО, что можно считать первым и важным шагом на пути к тому, чтобы это прекрасное место стало уникальным объектом, который представляет интерес для всего человечества и который необходимо охранять как культурное советское наследие.

Подводя итоги, можно констатировать, что ухудшение экологической ситуации на той или иной территории, вызванное деятельностью человека, приводящее к

возникновению техногенных катастроф и чрезвычайных ситуаций, в свою очередь влияет на сокращение объема туристского потока, разрушая инфраструктуру индустрии туризма. Есть все основания полагать, что даже в таких сложных кризисных условиях, при грамотно выстроенной социально-экономической политике, правильно подобранных маркетинговых инструментах и механизмах, эффективном взаимодействии частного и государственного секторов, можно будет наблюдать возрождение туристского рынка Украины, где в качестве оферты выступают туры в зону отчуждения Чернобыльской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Попова, Т.С.* К вопросу о сущности и содержании экологического маркетинга / Т.С. Попова, А.А. Воронов // Вестник научных конференций. – 2020. – № 2-3(54). – С. 67-69.
2. *Машарипова, Х.* Маркетинг в туризме / Х. Машарипова // Аллея науки. – 2021. – Т. 1. – № 6 (57). – С. 323-327.
3. *Гатауллина, С.Ю.* Управление эффективностью развития экологического туризма в Особо Охраняемых Природных Территориях / С.Ю. Гатауллина, Ц.Чжао, Е.В. Горянина // Практический маркетинг. – 2021. – № 5(291). – С. 3-9. – DOI 10.24412/2071-3762-2021-5291-3-9.
4. *Глумова, Я.Г.* Ключевые особенности туристического маркетинга / Я.Ю. Глумова // Практический маркетинг. – 2020. – № 11(285). – С. 9-14. – DOI: 10.24412/2071-3762-2020-11285-9-14.
5. *Управление территориями в конкурентной рыночной среде : учебное пособие / В.А. Руденко, Т.С. Попова, П.В. Горлачев [и др.].* – Краснодар : Издательство «Новация», 2021. – 270 с. – ISBN 978-5-00179-056-3.
6. *Руденко, В.А.* Выстраивание партнерских отношений атомной отрасли с общественностью: история вопроса и перспективы развития / В.А. Руденко, Т.С. Попова, Ю.А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2020. – № 2(35). – С. 131-141.
7. *Денисов, А.Е.* Маркетинговая деятельность компании в сфере туризма / А.Е. Денисов // Практический маркетинг. – 2018. – № 4(254). – С. 10-13.
8. *Таппасханова, Е.О.* Теоретические и практические аспекты повышения качества туристических услуг / Е.О. Таппасханова, Р.А. Токмакова, З.А. Хандохова // Практический маркетинг. – 2016. – № 8(234). – С. 25-31.
9. *Бородин, Н.В.* Чернобыльская АЭС – 35 лет со дня катастрофы / Н.В. Бородин, И.В. Катаргина, С.В. Закирова // Актуальные вопросы пожарной безопасности. – 2021. – № 2(8). – С. 72-81.
10. *Афанасьев, О.Е.* Экономика впечатлений как тренд в туристско-экскурсионной индустрии / О.Е. Афанасьев // Современные проблемы туризма и сервиса : сборник статей научных докладов по итогам Всероссийской научной конференции, Москва, 24 апреля 2018 года; под редакцией Н.А. Платоновой, О.Е. Афанасьева. – Москва : РУСАЙНС, 2018. – С. 6-11.
11. *Селюх, Д.А.* Атомный туризм / Д.А. Селюх, Н.Г. Каск // Природное и культурное наследие: междисциплинарные исследования, сохранение и развитие : Коллективная монография по материалам VII Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, РГПУ им.А.И.Герцена, 24-25 октября 2018 года, Санкт-Петербург, 24-25 октября 2018 года. – Санкт-Петербург : Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2018. – С. 338-340.
12. *Розенталь, О.М.* «Экономика впечатлений»: благо или вред? / О.М. Розенталь // Контроль качества продукции. – 2017. – № 6. – С. 1.

REFERENCES

- [1] Popova T.S. Voronov A.A. K voprosu o sushchnosti i sodержanii ekologicheskogo marketinga. [The Question of the Essence and Content of Environmental Marketing]. Vestnik nauchnykh konferencij [Bulletin of Scientific Conferences]. 2020. № 2-3(54). P. 67-69 (in Russian).
- [2] Masharipova H. Marketing v turizme [Marketing in Tourism]. Alleya nauki [Alley of Science]. 2021. T. 1. № 6(57). P. 323-327 (in Russian).
- [3] Gataullina, S. Y. Upravlenie effektivnost'yu razvitiya ekologicheskogo turizma v Osobo Ohranyaemykh Prirodnykh Territoriyah [Management of Efficiency of Development of Ecological Tourism in Protected Natural Areas]. Prakticheskij marketing [Practical Marketing]. 2021. № 5(291). P.3-9. DOI 10.24412/2071-3762-2021-5291-3-9 (in Russian).

- [4] Glumova, J. G. Klyuchevye osobennosti turistskogo marketinga [Key Features of Tourist Marketing]. *Prakticheskij marketing* [Practical Marketing]. 2020. № 11(285). P. 9-14. – DOI: 10.24412/2071-3762-2020-11285-9-14 (in Russian).
- [5] Rudenko, V. A., Popova, T. S., Gorlachev, P. V. Upravlenie territoriyami v konkurentnoj rynochnoj srede: uchebnoe posobie [Territory Management in a Competitive Market Environment: textbook]. Krasnodar: «Innovation» Publishing House, 2021. 270 p. ISBN 978-5-00179-056-3 (in Russian).
- [6] Rudenko, V. A. Vystraivanie partnerskih otnoshenij atomnoj otrasli s obshchestvennost'yu: istoriya voprosa i perspektivy razvitiya [Building Partnerships of the Nuclear Industry with the Public: the History of the Issue and Prospects for Development]. *Global'naya yadernaya bezopasnost'* [Global nuclear safety]. 2020. № 2(35). P. 131-141 (in Russian).
- [7] Denisov, A. E. Marketingovaya deyatel'nost' kompanii v sfere turizma [Marketing Activity of the Company in the Field of Tourism]. *Prakticheskij marketing* [Practical Marketing]. 2018. № 4(254). P.10-13 (in Russian).
- [8] Tappaskhanova E. O. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty povysheniya kachestva turistskikh uslug [Theoretical and Practical Aspects of Improving the Quality of Tourist Services]. *Prakticheskij marketing* [Practical Marketing]. 2016. № 8(234). P.25-31 (in Russian).
- [9] Borodina, N.V. Chernobyl'skaya AES – 35 let so dnya [Chernobyl Nuclear Power Plant - 35 Years since the Catastrophe]. *Aktual'nye voprosy pozharnoj bezopasnosti* [Topical Issues of Fire Safety]. 2021. № 2(8). P. 72-81 (in Russian).
- [10] Afanasyev O. E. Ekonomika vpechatlenij kak trend v turistsko-ekskursionnoj industrii [Economy of Impressions as a Trend in the Tourist and Excursion Industry]. *Sovremennye problemy turizma i servisa : sbornik statej nauchnyh dokladov po itogam Vserossijskoj nauchnoj konferencii*, Moskva, 24 aprelya 2018 goda [Modern Problems of Tourism and Service: Collection of Articles of Scientific Reports on the Results of the All-Russian Scientific Conference, Moscow, April 24, 2018]. Edited by N.A. Platonova, O.E. Afanasyev. Moskva: RUSAJNS [Moscow: RUSAINS], 2018. P. 6-11 (in Russian).
- [11] Selyukh D. A. Atomnyj turizm [Atomic Tourism]. *Prirodnoe i kul'turnoe nasledie: mezhdisciplinarnye issledovaniya, sohranenie i razvitie : Kollektivnaya monografiya po materialam VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, RGPU im.A.I.Gercena, 24-25 oktyabrya 2018 goda* [Natural and Cultural Heritage: Interdisciplinary Research, Conservation And Development: A collective monograph based on the materials of the VII International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, A.I.Herzen State Pedagogical University, October 24-25, 2018]. Sankt-Peterburg : Rossijskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet im. A.I. Gercena [St. Petersburg: A.I. Herzen Russian State Pedagogical University]. 2018. P.338-340 (in Russian).
- [12] Rozental' O. M. «Ekonomika vpechatlenij»: blago ili vred? [Impression Economy: Benefit or Harm]. *Kontrol' kachestva produkcii* [Product Quality Monitoring]. 2017. № 6. P.1 (in Russian).

Social and Economic Aspects of Tourism Marketing in the Chernobyl Exclusion Zone

T.S. Popova

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

ORCID iD: 0000-0002-0554-2672

e-mail: tanya930@rambler.ru

Abstract – The paper considers the main provisions of the impression economy, the greatest potential of which is revealed in the tourism business. Selling travelling emotions, adventure hobbies and new knowledge is increasingly economically profitable, and travel companies are expanding their list of offers. Recently, many new, sometimes very strange, types of tourism have appeared. The development of technological progress in the twentieth century was the impetus for the development of an unusual type of tourism – industrial. A separate subspecies of industrial tourism is nuclear. More than a decade after the accident, the Chernobyl zone remains uninhabitable. But even so, it has a future. Officials and tour operators agree that tourism in Chernobyl is not only considerable economic benefits for the country, but also an opportunity to tell the world your story.

Keywords: impression economy, social and cultural aspect of nuclear energy, safety principles, tourism marketing, nuclear tourism, Chernobyl NPP.

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

УДК 330.101.8

**ПРИВЕРЖЕННОСТЬ РУКОВОДСТВА ЦЕЛЯМ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КАК ФАКТОР
ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
МЕНЕДЖМЕНТА БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ**

© 2021 И.Е. Лыскова

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

В статье актуализируются политические, социально-экономические и социокультурные основы формирования культуры производственной безопасности промышленных предприятий. Раскрываются структурные и содержательные аспекты приверженности руководства целям производственной безопасности. Предлагается общий анализ действующей нормативной базы, определяющей методологические основы формирования интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий в Российской Федерации.

Ключевые слова: производственная безопасность, культура производственной безопасности, приверженность руководства целям производственной безопасности, интегрированная система менеджмента безопасности, управление промышленной безопасностью, менеджмент качества, экологический менеджмент, менеджмент безопасности труда и охраны здоровья, управление культурой производственной безопасности.

Организация современного промышленного производства требует исключительного внимания к задачам формирования и развития культуры производственной безопасности. Объективно культура производственной безопасности обосновывается значимостью обеспечения промышленной безопасности, создания и поддержания безопасных условий труда в промышленном производстве. Субъективно культура безопасности отражает позицию руководства и персонала по отношению к концептуальным основам и практическим проблемам обеспечения безопасности промышленных предприятий [1-4].

Целью исследования является выявление структурных и содержательных аспектов приверженности руководства экономическим, экологическим и социальным целям производственной безопасности промышленного производства. Основным методом исследования является комплексный анализ действующей нормативной базы, регулирующей сферу производственной безопасности и определяющей основы формирования интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий в Российской Федерации.

Исключительно значимую роль в обеспечении безопасности промышленных предприятий отводится высшему руководству. Начиная с 1990-х годов целенаправленно актуализируются вопросы формирования и совершенствования системы менеджмента безопасности промышленного производства. Лидером и ориентиром в этом отношении стоит признать атомную промышленность [5]. В ряде докладов Международной консультативной группы по ядерной безопасности МАГАТЭ

(*International Nuclear Safety Advisory Group – INSAG, International Atomic Energy Agency – IAEA*) и Всемирной ассоциации организаций, эксплуатирующих атомные электростанции (BAO АЭС, *World Association of Nuclear Operators – WANO*) были зафиксированы значимые характеристики приверженности безопасности, которые определялись совокупностью функций, полномочий, ответственностью участников производственного процесса.

Были выделены характеристики культуры производственной безопасности в аспекте приоритетности и приверженности всех членов коллектива требованиям безопасности, не утратившие актуальности и сегодня: приверженность безопасности на политическом уровне, на уровне руководства и на индивидуальном уровне [6, 7].

Политический уровень приверженности безопасности характеризуется наличием заявления о политике в области безопасности, соответствующей структуры управления, необходимых ресурсов и обеспечения саморегулирования в вопросах безопасности организации. Ключевые аспекты обеспечения безопасности промышленного производства закрепляются на законодательном уровне, формируя основы государственной политики в области национальной и экономической безопасности [6, с. 19]. На организационном уровне заявление о политике в области безопасности служит руководством для персонала, декларирует приверженность корпоративного управления целям безопасности, определяет высокий приоритет и ценность достижения наилучших показателей безопасности по всем направлениям производственной деятельности. Для этого требуется чёткая структура управления, регламентация должностных обязанностей и ответственности за безопасность, качество процессов и результатов. Вместе с тем приверженность безопасности на политическом уровне предусматривает выделение необходимых ресурсов (административных, финансовых, кадровых, информационных, технологических, временных и др.), обеспечивающих достижение целей безопасности. Процесс формирования эффективной культуры безопасности предполагает выход на уровень саморегулирования на основе высокого профессионализма и управленческой компетенции. По факту речь идёт о формировании «самообучающейся организации с самоподдерживающейся культурой безопасности» [7, с. 5]. МАГАТЭ опубликовало ряд документов, в частности «Основополагающие принципы безопасности» SF-1 (2006 г.), «Руководство по безопасности» GS-G-3.1. (2006 г.) и «Руководство по безопасности» GS-G-3.5. (2009 г.), в которых задачам непрерывного обучения с целью совершенствования культуры производственной безопасности уделялось первостепенное внимание [8, 9].

Приверженность безопасности на уровне руководителей фиксирует высокий уровень персональной ответственности; организацию эффективного контроля обеспечения производственной безопасности; целенаправленную деятельность по подготовке и повышению квалификации кадров в сфере производственной безопасности; формирование системы поощрения и наказания в области безопасности; проведение аудита, ревизий, оценочных проверок, аналитических обзоров и анализа сформировавшихся тенденций обеспечения безопасности промышленного производства.

Персональная ответственность руководителей в сфере безопасности требует тщательного подхода к разграничению полномочий и подготовке соответствующих документов во избежание ошибок, недопонимания, отсутствия, недостаточности или дублирования функций и др. Документационное обеспечение вопросов управления безопасностью включает широкий перечень нормативно-правовых документов, от общих стратегий, планов, концепций и директив до детальных рабочих инструкций и регламентов, регулирующих выполнение необходимых работ по безопасности и контроль производственных процессов. Такой пакет документов является

неотъемлемой составляющей системы управления качеством в организации, качеством безопасности включительно.

Кроме того, руководители несут ответственность за качество человеческих ресурсов, обеспечивающих функционирование системы безопасности в организации. Важнейшим компонентом качества человеческих ресурсов в этом отношении является уровень профессиональной квалификации, наличие необходимых для целей безопасности образования, профессиональных компетенций и личностных характеристик, определяющих модели безопасного мышления и безопасного поведения сотрудников. Соответственно, уделяется внимание формированию эффективной системы мотивации в сфере безопасности, справедливой системы поощрений и наказаний. Система мотивации и стимулирования сотрудников не должна поощрять действия сотрудников по повышению производительности в ущерб безопасности. В то же время открытое сообщение о возникающих проблемах по обеспечению безопасности не должно предусматривать санкций. Высокий уровень мотивации обеспечивает высокий уровень ответственности и доверия работников. Тем не менее, на руководителя возлагается особая ответственность в вопросах осуществления контроля обеспечения качества производственной безопасности. Необходим систематический мониторинг и оценка системы безопасности, в том числе культуры производственной безопасности персонала промышленных предприятий. Организация должна осуществлять работу, направленную на поддержание необходимого уровня профессиональной квалификации и повышение культуры производственной безопасности, уделять внимание не только когнитивным, но и социально-психологическим и поведенческим аспектам безопасности [10-13].

Приверженность безопасности на индивидуальном уровне предполагает наличие трёх базовых компонентов, определяющих профессиональное поведение сотрудников: критической позиции по отношению к целям безопасности; строго регламентированного и взвешенного подхода к выполнению работ при соблюдении требований безопасности; высокой культуры коммуникации.

Впервые указанные компоненты приверженности безопасности были обозначены в докладе Международной консультативной группы по ядерной безопасности МАГАТЭ INSAG-4. Первоосновой трёхуровневой модели приверженности безопасности является приверженность безопасности на индивидуальном уровне. Ключевые положения безопасности должны быть присущи мышлению и поведению всех сотрудников организации, но прежде всего руководителям. Многократное выполнение действий порой отрабатывается до автоматизма. Тем не менее, это не должно приводить к ослаблению внимания к содержанию трудовых операций. Но с особой тщательностью необходимо подходить к освоению и выполнению новых операций или заданий, следуя инструкциям. Чёткая критическая позиция по вопросам производственной безопасности обеспечивает обоснованность строго регламентированного и взвешенного подхода к проведению работ в безопасных условиях труда [6, с. 16-17].

Наряду с выработкой критической позиции сотрудника (руководителя) по вопросам безопасности, необходимостью придерживаться строго регламентированного и взвешенного подхода, приверженность безопасности на индивидуальном уровне проявляется в высоко профессиональной культуре коммуникаций. Её базовыми характеристиками признаны: эффективный обмен информацией; предоставление информации в полном объёме, включая ожидаемые и нестандартные результаты работы; своевременное их документирование; предложение новых инициатив в области информации.

Существенную лепту в обосновании роли руководства в формировании приверженности сотрудников безопасности внесла ВАО АЭС. В 2006 г. было

опубликовано Руководство GL 2006-02 «Принципы сильной культуры ядерной безопасности», в котором подчеркивались значимые принципы обеспечения производственной безопасности:

1. Персональная ответственность за безопасность;
2. Приверженность руководства принципам безопасности;
3. Атмосфера полного доверия в организации;
4. Приоритет безопасности в процессе принятия решений;
5. Признание исключительности и уникальности безопасности ядерных технологий;
6. Взвешенная критическая позиция в вопросах безопасности;
7. Постоянное организационное обучение;
8. Систематические проверки ядерной безопасности [14].

Опыт внедрения данных принципов закрепился в новом документе ВАО АЭС «Особенности здоровой культуры ядерной безопасности» PL 2013-1, который позже был дополнен перекрестными ссылками на документы ВАО АЭС и МАГАТЭ. Особенности здоровой культуры безопасности трактовались как «модель такого мышления, восприятия и поведения, при которой безопасность имеет наивысший приоритет относительно других приоритетов». Соответственно культура ядерной безопасности определялась как «набор ценностей и поступков, имеющих место в результате достигнутого в коллективе соглашения между первыми руководителями и работниками по приданию безопасности наивысшего приоритета относительно других приоритетов с целью обеспечения защиты людей и окружающей среды» [14, с. 4-6].

Принципы здоровой (сильной) культуры безопасности, выделенные ВАО АЭС, применимы для промышленной безопасности в целом. ВАО АЭС особенно выделялась роль руководства в процессе формирования культуры безопасности. В частности, отмечались следующие аспекты деятельности руководства, содействующие здоровой культуре безопасности:

- всемерное и целенаправленное содействие развитию культуры безопасности;
- ориентация не столько на количественные показатели, сколько на тенденции развития культуры безопасности и её эффективность;
- открытое обсуждение факторов, содействующих здоровой культуре безопасности и др.

ВАО АЭС, аналогично МАГАТЭ, определяла тенденции формирования здоровой культуры безопасности согласно уровням приверженности безопасности участников производственных процессов. Выделялись следующие категории приверженности безопасности и их существенные характеристики.

Индивидуальная приверженность безопасности включает такие компоненты как:

1. Персональная ответственность (РА – Personal Accountability):

Предусматривается, что все без исключения, работники несут персональную ответственность за безопасность. Характерные особенности профессионального поведения, связанные с субординацией, подчинением, обеспечением ответственности и совокупность должностных полномочий чётко определены и понятны. Персональная ответственность за безопасность проявляется в обязательности следования стандартам производственной безопасности, в моделях безопасного поведения, добросовестного отношения к выполнению профессиональных обязанностей, готовности к слаженной работе в команде и др.

2. Критическое отношение (QA – Questioning Attitude):

Работники должны избегать чувства самоуспокоенности, должны быть ориентированы на критическую оценку производственных процессов и условий труда, своевременное выявление аномалий, несоответствий, ошибок, должны осознавать

степень угроз и иметь готовность адекватно действовать в ситуациях повышенного риска и др.

3. Коммуникация по вопросам безопасности (Communication):

Процессы коммуникации в организации ориентированы на цели безопасности, поддерживают её приоритеты, способствуют открытому коллективному обсуждению вопросов на всех этапах производственного процесса. Руководители способствуют развитию формальных и неформальных коммуникаций. Адекватно воспринимается поток информации на верхний уровень организации, с такой же важностью, как поток информации сверху вниз. Наличие открытой обратной связи способствует эффективности действий по обеспечению безопасности, препятствует сокрытию фактов, затрудняющих оперативность решений по поддержанию безопасности производства.

Приверженность руководства безопасности характеризуют:

4. Ответственность руководства (LA – Leadership Accountability):

Руководители демонстрируют приверженность безопасности как наивысшему приоритету при принятии решений и своими действиями. Они регулярно и обстоятельно анализируют ситуацию в области производственной безопасности. Руководители всех уровней следуют нормам и требованиям безопасности, обеспечивают условия производственной безопасности, являясь примером для сотрудников. Поведение руководителей должно восприниматься сотрудниками как стандарт и гарант безопасности. Корпоративные документы подчёркивают стратегические приоритеты безопасности производства. Руководители обеспечивают все необходимые ресурсы для поддержания высокого уровня безопасности производства и устранения отклонений от установленных стандартов безопасности. Руководители обеспечивают распределение функций, ответственности и полномочий в области обеспечения безопасности. Они уделяют значительное внимание вопросам эффективности мотивации и стимулирования безопасности производственных процессов, обеспечивают постоянный комплексный контроль безопасности.

5. Принятие решений (DM – Decision-Making):

Особую ответственность руководители несут за принятие решений. Решения по вопросам производственной безопасности должны характеризоваться системностью, чёткостью, завершённостью. Руководители должны объективно оценивать риски в сфере производственной безопасности. В ситуациях повышенного риска или значительной степени неопределённости отдавать предпочтение осторожным, неспешным действиям и придерживаться консервативного подхода в принятии решений.

6. Рабочая обстановка взаимного уважения (WE – Respectful Work Environment):

Значительное внимание руководители должны уделять формированию атмосферы уважения и доверия в производственном коллективе посредством развития системы коммуникаций. Уважение и доверие в коллективе – основа достойных трудовых отношений. Достойный труд – прежде всего безопасный труд. Благоприятный и безопасный социально-психологический климат в организации является существенной составляющей безопасности производства. Высокий уровень доверия способствует осознанию приоритета безопасности и высокой персональной ответственности за соблюдение стандартов безопасности.

Приверженность безопасности в системе управления предусматривает:

7. Непрерывное обучение (Continuous Learning):

Руководители несут ответственность за формирование системы управления безопасностью. Исключительно важное значение отводится непрерывному обучению и повышению квалификации персонала в сфере производственной безопасности. Для этого создаются все необходимые условия и выделяются соответствующие ресурсы,

приветствуется объективная оценка условий безопасности организации и подготовленности специалистов в этой области, их готовность к непрерывному обучению, самообразованию и обмену опытом с целью повышения безопасности производства.

8. Выявление проблем и их решение (PI – Problem Identification and Resolution):

При содействии руководства проблемы, потенциально влияющие на безопасность, быстро выявляются, всесторонне анализируются и устраняются в кратчайший срок. Своевременному выявлению, анализу, решению проблем безопасности должен способствовать комплекс превентивных мероприятий по отслеживанию ситуации и своевременной корректировке возникающих ошибок, сбоев, отказов и др.

9. Среда для выражения обеспокоенности (RC – Environment for Raising Concerns):

Руководители призваны содействовать формированию осознанно-безопасной среды в коллективе, в условиях которой персонал может свободно открыто или конфиденциально выражать мнение и обеспокоенность за соблюдение безопасности, не опасаясь наказаний, ограничения прав, мести, запугивания, дискриминации и др.

10. Рабочие процессы (WP – Work Processes):

Руководители обеспечивают процесс планирования и контроля безопасности производственной деятельности. Все производственные процессы выстраиваются с учётом потребностей и рисков безопасности. Принимаются меры по управлению рисками и системой безопасности. Обеспечивается безопасность оборудования и технологических процессов, осуществляется документационное управление безопасностью производственных процессов. Поддерживается высокий уровень приверженности безопасности производства всех сотрудников.

Комплексно концепции приверженности производственной безопасности, раскрытые в материалах МАГАТЭ (INSAG-4) и ВАО АЭС (PL 2013-01), обеспечивают осознание безопасности как абсолютной ценности. Структурно и содержательно концепции идентичны. Однако важно обратить внимание на логику выстраивания концепции приверженности безопасности. В INSAG-4 предлагается иерархическая модель формирования приверженности (приверженность на политическом уровне – приверженность руководства – приверженность на индивидуальном уровне). В позиции ВАО АЭС PL 2013-01 представлена обратная тенденция формирования приверженности безопасности (приверженность на индивидуальном уровне – приверженность руководства – системы управления).

Таким образом, концепцию приверженности руководства производственной безопасности следует рассматривать как основу для трактовки ключевых положений приверженности руководства культуре производственной безопасности. Прослеживаются структурные и содержательные аналогии данных категорий. Соответственно, приверженность руководства культуре производственной безопасности характеризуется как совокупность полномочий, обязанностей и ответственности по вопросам формирования и совершенствования культуры безопасности промышленных предприятий. Приверженность руководства культуре производственной безопасности является связующим звеном обеспечения приверженности на политическом (организационно-управленческом) и индивидуальном уровне и реализуется в процессе формирования системы менеджмента безопасности организации [15, 16].

Систему менеджмента безопасности следует характеризовать в аспекте формирования и совершенствования интегрированной системы менеджмента, отвечающей целям экономической, экологической и социальной безопасности промышленного производства. Триединство целей системы менеджмента безопасности

промышленных предприятий определяет целостность модели производственной безопасности. Базовыми компонентами интегрированной системы менеджмента безопасности являются: 1 – система управления промышленной безопасностью; 2 – система менеджмента качества; 3 – система экологического менеджмента; 4 – система менеджмента безопасности труда и охраны здоровья; 5 – система управления культурой производственной безопасности.

Наглядно система менеджмента производственной безопасности может быть представлена в виде правильной пирамиды. В её основании – квадрат, углы которого фиксируют четыре компонента системы менеджмента безопасности (1 – система управления промышленной безопасностью; 2 – система менеджмента качества; 3 – система экологического менеджмента; 4 – система менеджмента безопасности труда и охраны здоровья). Боковые грани пирамиды объединяются в вершине, символизирующей структурные и содержательные аспекты культуры производственной безопасности (1 – культуры промышленной безопасности; 2 – культуры безопасности труда и охраны здоровья).

Кроме того, к существенным универсальным компонентам, входящим в структуру интегрированной системы менеджмента безопасности, следует отнести ключевые аспекты стратегического и инновационного менеджмента, менеджмента устойчивого развития, менеджмента рисков, проектного менеджмента, менеджмента знаний, менеджмента ресурсов, финансового менеджмента, менеджмента информационной безопасности организации и др., которые в контексте безопасности приобретают особое содержание производственной деятельности [17].

Предназначение системы менеджмента безопасности состоит в осуществлении систематического контроля безопасности на всех этапах производственного цикла; в планировании и регулировании процессов обеспечения технологической безопасности промышленного производства; обеспечении безопасности производства в процессе организационных изменений, например, в процессе внедрения новых технологий, включая внедрение системы менеджмента безопасности; в оценке производственных процессов на основе показателей качества и комплексной безопасности; в своевременном выявлении и устранении нарушений норм, требований и стандартов безопасности; в развитии культуры безопасности и поддержании её на высоком уровне и др. Важно заметить, что система менеджмента безопасности является значимой и неотъемлемой составляющей менеджмента качества в организации. Качество безопасности характеризует результативность и эффективность качества менеджмента организации.

Обозначим основные характеристики интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий.

1. Система управления промышленной безопасностью

Базовые характеристики системы управления промышленной безопасностью зафиксированы в российском законодательстве. Согласно статье 1 Федерального закона РФ от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 11 июня 2021 г.) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» система управления промышленной безопасностью представляет собой «комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, осуществляемых организацией, эксплуатирующей опасные производственные объекты в целях предупреждения аварий и инцидентов на опасных производственных объектах, локализации и ликвидации последствий таких аварий» [18]. Статья 3 данного закона содержит обоснование требований промышленной безопасности, под которыми понимаются «условия, запреты, ограничения, другие обязательные требования» по обеспечению промышленной безопасности. Установленные требования промышленной безопасности «должны соответствовать нормам в области защиты населения и территорий от

чрезвычайных ситуаций, санитарно-эпидемиологического благополучия населения, охраны окружающей среды, экологической безопасности пожарной безопасности, строительства, а также обязательным требованиям, установленным в соответствии с законодательством Российской Федерации о техническом регулировании». Правовое регулирование в области промышленной безопасности предусматривает совокупность норм, правил, требований, предъявляемых к деятельности в области промышленной безопасности, включая требования к работникам опасных производственных объектов и экспертам в сфере промышленной безопасности; к безопасности технологических процессов; к обоснованию безопасности опасного производственного объекта.

Специфика требований промышленной безопасности и нормативно-правового регулирования определяется отраслью промышленного производства и уровнем потенциальной опасности производственных объектов. Особое внимание в аспекте управления промышленной безопасностью уделяется опасным производственным объектам, которые подразделяются на 4 класса опасности (Ст. 2 Федерального закона РФ от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 11 июня 2021 г.) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»):

I класс опасности – опасные производственные объекты чрезвычайно высокой опасности;

II класс опасности – опасные производственные объекты высокой опасности;

III класс опасности – опасные производственные объекты средней опасности;

IV класс опасности – опасные производственные объекты низкой опасности [18].

Основы промышленной безопасности включают широкую совокупность видов деятельности производственных объектов: проектирование, строительство, эксплуатацию, реконструкцию, капитальный ремонт, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию опасного производственного объекта; изготовление, монтаж, наладку, обслуживание и ремонт технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте; проведение экспертизы промышленной безопасности. Среди многочисленного перечня обязательств, предъявляемых к эксплуатации производственного объекта, предусмотрено создание системы управления промышленной безопасностью и обеспечение её функционирования.

Функционирование системы управления промышленной безопасностью осуществляется по следующим направлениям (Ст. 11 п. 4 Федерального закона РФ от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 11 июня 2021 г.) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»):

1. Определение целей и задач организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, в области промышленной безопасности, информирование общественности о данных целях и задачах, в частности посредством декларации промышленной безопасности и др.

2. Идентификация, анализ и прогнозирование риска аварий на опасных производственных объектах и связанных с такими авариями угроз.

3. Планирование и реализация мер по снижению риска аварий на опасных производственных объектах, в том числе при выполнении работ или оказании услуг на опасных производственных объектах сторонними организациями либо индивидуальными предпринимателями.

4. Координация работ по предупреждению аварий и инцидентов на опасных производственных объектах.

5. Осуществление производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности.

6. Безопасность опытного применения технических устройств на опасных производственных объектах.

7. Своевременная корректировка мер по снижению риска аварий на опасных производственных объектах.

8. Участие работников организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, в разработке и реализации мер по снижению риска аварий на опасных производственных объектах.

9. Информационное обеспечение осуществления деятельности в области промышленной безопасности, том числе документационное обеспечение систем управления промышленной безопасностью [18].

2. Система менеджмента качества

Неотъемлемой составляющей интегрированной системы менеджмента безопасности промышленного предприятия является система менеджмента качества. Согласно требованиям ГОСТ ИСО 9001-2015 Национального стандарта Российской Федерации «Системы менеджмента качества. Требования» применение системы менеджмента качества является «стратегическим решением» для организации, способным улучшить результаты, повысить эффективность, обеспечить «прочную основу для инициатив, ориентированных на устойчивое развитие». Указанный стандарт неразрывно связан со стандартами ИСО 9000 «Система менеджмента качества. Основные положения и словарь» и ИСО 9004 «Менеджмент для достижения устойчивого успеха организации. Подход на основе менеджмента качества», также идентичными им национальными стандартами Российской Федерации (ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Национальный стандарт Российской Федерации «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь» и ГОСТ Р ИСО 9004-2019 Национальный стандарт Российской Федерации «Менеджмент качества. Качество организации. Руководство по достижению устойчивого успеха организации»).

В целом система менеджмента качества обладает мощным потенциалом обеспечения конкурентоспособности и клиентоориентированности организации в условиях рыночной экономики. Установка на качество производственных процессов и продукции – неизбежное требование современности. Ключевыми принципами менеджмента качества выделяются: ориентация на потребителя (клиентоориентированность); лидерство; взаимодействие людей (вовлечённость); процессный подход; системный подход к менеджменту; постоянное улучшение (непрерывное совершенствование); принятие решений, основанных на фактах (свидетельствах); менеджмент взаимоотношений (взаимовыгодные отношения с поставщиками).

Исключительное внимание в системе менеджмента безопасности в аспекте управления качеством в соответствии с политикой в области качества и стратегическими направлениями организации уделяется применению системного и процессного подходов при разработке, повышении результативности процесса обеспечения производственной безопасности. Отметим наиболее существенные свойства системы менеджмента качества. Согласно требованиям менеджмента качества организация «должна разработать, внедрить, поддерживать и постоянно улучшать систему менеджмента качества, включая необходимые процессы и их взаимодействия». Организация должна определять процессы, необходимые для развития системы менеджмента качества, в том числе и менеджмент безопасности, и обеспечивать должное их функционирование.

Опираясь на стандарты качества, следует обосновать актуальность процессного подхода в системе менеджмента безопасности. В данном контексте процессный подход обеспечивает:

1) понимание значимости и необходимости выполнения требований безопасности;

2) значимость системы и процессов управления безопасностью в общей совокупности производственной деятельности (безопасность как процесс обоснована ценностью самой безопасности);

3) достижение намеченных результатов в области качества и безопасности, их согласованность со стратегическими приоритетами организации;

4) нацеленность на постоянное улучшение результатов на основе анализа данных и соответствующей информации.

5) Процесс обеспечения производственной безопасности на основе менеджмента качества должен характеризоваться следующими видами деятельности:

6) определение входных и ожидаемых выходных данных процесса управления безопасностью;

7) определение последовательности действий в процессе обеспечения производственной безопасности;

8) определение и применение критериев и методов (включая мониторинг, измерение и соответствующие показатели результатов деятельности), необходимых для обеспечения результативного функционирования процесса обеспечения безопасности и управления безопасностью;

9) определение ресурсов, необходимых для безопасности производственных процессов, и обеспечение их доступности;

10) распределение обязанностей, ответственности и полномочий в отношении менеджмента безопасности;

11) объективная оценка процесса обеспечения безопасности и возможность адекватной корректировки действий по достижению намеченных результатов;

12) непрерывное совершенствование процесса обеспечения безопасности;

13) разработка, актуализация и применение документированной информации для обеспечения безопасности производственных процессов;

14) регистрация и сохранность документированной информации по безопасности производственных процессов и др.

В системе менеджмента качества одновременно с повышением эффективности процесса обеспечения безопасности должно быть предусмотрено развитие рискориентированного (безопасного) мышления сотрудников, определяющего характеристики безопасного поведения, направленного на использование возможностей и предотвращение нежелательных результатов производственной деятельности. Ключевыми характеристиками рискориентированного мышления могут быть определены:

1) осознание необходимости выполнения предупреждающих действий, направленных на исключение потенциальных несоответствий;

2) анализ любых возникающих несоответствий;

3) принятие мер по предотвращению повторений несоответствий.

В контексте процессного подхода модель безопасного мышления и безопасной профессиональной деятельности может адаптироваться посредством модели (метода) PDCA (известной как цикл В. Деминга). Цикл PDCA применим ко всем процессам, включая процесс управления безопасностью, и к системе менеджмента качества в целом. Цикл Деминга (PDCA – планируй (plan), делай (do), проверяй (check), действуй (act)) применяется как модель совершенствования деятельности, то есть структурирования и упорядочивания процесса постоянных улучшений, в частности для достижения целей безопасности.

Сущность цикла PDCA в аспекте менеджмента качества можно описать следующим образом:

1. Планируй.

Предусматривается разработка целей системы и процессов на основе анализа сложившейся ситуации; определение ресурсов, необходимых для достижения ожидаемых результатов; выработку критериев и показателей результативности; определение и анализ рисков и возможностей. Для эффективности данного шага предусматривается необходимость ответить на такие вопросы:

- Чего мы стремимся добиться?
- Как цели данного процесса связаны с целями организации?
- На кого повлияют предпринимаемые изменения?
- Где и когда это произойдёт?
- Какова последовательность и план действий? и др.

2. Делай (предполагается выполнение запланированного).

3. Проверь.

Требуется мониторинг и измерение (по возможности) результативности процессов, продукции, услуг, анализ соответствия достигнутых результатов заявленной политике, целям, требованиям и др. Кроме того, существенное значение имеет обобщение полученного опыта, как положительного, так и негативного. Последующие действия необходимо предпринимать на основе полученного опыта.

4. Действуй.

Принимаются меры по улучшению результатов, насколько это необходимо. При достижении желательных результатов рекомендуется стандартизировать процесс [19, с. 4].

3. Система экологического менеджмента

Модель PDCA является основой для разработки и функционирования системы экологического менеджмента как значимой составляющей интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий. Применительно к системе экологического менеджмента данная модель может трактоваться следующим образом:

1. Планируй.

Предполагается разработка экологических целей и процессов промышленных предприятий в соответствии с заявленной экологической политикой.

2. Делай.

Обеспечивается выполнение запланированного с ориентиром на необходимые результаты производственных процессов.

3. Проверь.

Осуществляется мониторинг и измерение результативности, документационное обеспечение производственных процессов в аспекте реализации экологической политики, соответствия экологическим целям и требованиям экологической безопасности промышленного производства.

4. Действуй.

Выполнение действий по постоянному улучшению процессов экологической безопасности промышленного производства, совершенствование системы экологического менеджмента.

Основной целью экологического менеджмента промышленных предприятий является достижение баланса устойчивого социально-экономического развития в соответствии с нормами и требованиями экологической безопасности промышленного производства. Достижение баланса между окружающей средой, обществом и экономикой, содействие устойчивому экологическому развитию выстраивается на основе системного подхода с учётом экологических стандартов.

Приверженность высшего руководства промышленных предприятий экологическим целям может воплощаться посредством интеграции экологического менеджмента в производственные процессы и актуализации экологических аспектов производства при разработке стратегии и приоритетов бизнеса в долгосрочной

перспективе. Согласно ГОСТ Р ИСО 14001-2016 Национальному стандарту Российской Федерации «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению» устанавливаются требования к системе экологического менеджмента, которую промышленные предприятия могут внедрять для улучшения экологических результатов своей деятельности.

Основными средствами демонстрации приверженности высшего руководства в отношении системы экологического менеджмента, как указывается в названном стандарте, являются:

- «принятие ответственности за результативность системы экологического менеджмента;
- обеспечение разработки экологической политики и экологических целей, которые согласуются со стратегическими направлениями и условиями среды организации;
- обеспечение интеграции требований системы экологического менеджмента в бизнес-процессы организации;
- обеспечение доступности ресурсов, необходимых для системы экологического менеджмента;
- распространение в организации понимания важности результативного экологического менеджмента и соответствия требованиям системы экологического менеджмента;
- обеспечение достижения системой экологического менеджмента намеченных результатов;
- руководство и оказание поддержки участия работников в обеспечении результативности системы экологического менеджмента;
- поддержка постоянного улучшения;
- поддержка других соответствующих руководителей в демонстрации ими лидерства в сфере ответственности» [20, с. 10].

Промышленным предприятиям необходимо определить совокупность экологических аспектов с учётом специфики бизнес-процессов (вход-выход), что послужит обоснованием для принятия решений и регулирования системы экологического менеджмента. К экологическим аспектам производственной деятельности могут быть отнесены выбросы в воздух, сбросы в воду, сбросы на землю, использование сырья и природных ресурсов, потребление энергии, выделяемая энергия (нагрев, радиация, вибрация, шум, свет), образование отходов или побочных продуктов, использование пространства.

В дополнение к экологическим аспектам организации производственной деятельности, важно выделить аспекты, на которые оказывает влияние само промышленное производство. К этой категории могут быть отнесены экологические аспекты, связанные с производственными процессами, продукцией, услугами, такие как:

- проектирование и разработка зданий;
- приобретение сырья, включая добычу;
- рабочие или производственные процессы, включая хранение;
- эксплуатация и техническое обслуживание зданий, активов и инфраструктуры промышленных предприятий;
- экологические результаты деятельности и практики внешних поставщиков;
- транспортировка продукции и предоставление услуги, включая упаковку;
- хранение, использование и переработка продукции в конце жизненного цикла;
- менеджмент отходов, включая повторное использование, восстановление, переработку и утилизацию.

Все производственные процессы промышленных предприятий должны быть согласованы со стратегическими приоритетами экологической политики. Экологическая политика – «совокупность принципов, сформулированных как обязательства, в которых высшее руководство выражает намерение организации поддерживать и улучшать экологические результаты её деятельности». В соответствии с ГОСТ Р ИСО 14001-2016 Национальным стандартом Российской Федерации «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению» актуализируются три основных обязательства экологической политики, следование которым позволит учесть требования экологических стандартов и обеспечит «устойчивость и надёжность системы экологического менеджмента, а также доверие к ней». Требования следующие:

- защищать окружающую среду;
- выполнять принятые организацией обязательства;
- постоянно совершенствовать систему экологического менеджмента для улучшения экологических результатов деятельности [20].

4. Система менеджмента безопасности труда и охраны здоровья

Интегрированная система менеджмента безопасности предусматривает наличие системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья в организации. Существует широкая совокупность нормативных документов, определяющих требования, стандарты, оценку, условия сертификации системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья (Руководство Международной организации труда по системам управления охраной труда (МОТ-СЮОТ 2001/ILO-OSH 2001); Occupational Health and Safety management Systems. Requirement – Руководство по внедрению OHSAS (Occupational Health and Safety Assessment Series) 18000:2007; ГОСТ Р 54934-2012 Национальный стандарт Российской Федерации «Системы менеджмента безопасности и охраны здоровья. Требования»; ГОСТ Р 12.0.001-2013 Национальный стандарт Российской Федерации «Система стандартов безопасности труда. Основные положения»; ГОСТ Р 12.0.007-2009 Национальный стандарт Российской Федерации «Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда в организации. Общие требования по разработке, применению, оценке и совершенствованию»; ГОСТ 12.0.230-2007 Межгосударственный стандарт. «Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Общие требования»; ГОСТ 12.0.002-2014 Межгосударственный стандарт «Система стандартов безопасности труда. Термины и определения»; ГОСТ 12.0.230.2-2015 Межгосударственный стандарт «Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда. Оценка соответствия. Требования» и др.) [21, 22].

Система менеджмента безопасности труда и охраны здоровья промышленных предприятий разрабатывается с учётом совместимости стандартов системы менеджмента качества, в основе которой ИСО 9001:2000, и системы экологического менеджмента на основе ИСО 14001:2004. В Российской Федерации одним из базовых стандартов является ГОСТ Р 54934-2012 Национальный стандарт Российской Федерации «Системы менеджмента безопасности и охраны здоровья. Требования». Этот стандарт устанавливает требования к системе менеджмента безопасности труда и охраны здоровья, а также является основой для разработки и реализации политики организации в области безопасности труда. Эффективность системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья, как подчёркивается в стандарте, зависит от «приверженности идее безопасности труда и охраны здоровья на всех уровнях и во всех функциональных структурах организации и, в особенности, от приверженности высшего руководства». Приверженность целям безопасности является значимым фактором, способствующим достижению стратегических целей организации и повышению её конкурентоспособности.

Совместимость системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья с системой менеджмента качества и экологического менеджмента определяется методологией PDCA и процессным подходом:

- планирование предполагает определение целей и разработку процессов, направленных на достижение результатов в соответствии с политикой организации в области безопасности труда и охраны здоровья;
- деятельность характеризуется созданием системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья; внедрением и функционированием процессов, направленных на обеспечение безопасности в сфере труда;
- проверки предусматривают регулярный мониторинг и оценку (самооценку) соответствия системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья организационной политике, заявленным целям, правовым и другим нормативным требованиям в данной области;
- действие связано с принятием и реализацией решений, направленных на постоянное улучшение результатов и показателей в области безопасности труда и охраны здоровья; проведение сертификации системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья [23].

Кроме методологии PDCA и процессного подхода совместимость системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья с системой менеджмента качества и экологического менеджмента определяется методологией, основанной на системном подходе. Согласно ГОСТ Р 12.0.007-2009 Национальный стандарт Российской Федерации «Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда в организации. Общие требования по разработке, применению, оценке и совершенствованию» системный подход в управлении охраной труда определяет «систему производственных процессов, их связи и принципы взаимодействия, выявляет процессы, которые приводят к достижению желаемых результатов с минимальными затратами. Он позволяет сосредотачивать усилия на наиболее важных процессах и осуществлять непрерывное улучшение системы управления охраной труда посредством проверки (аудита), оценки и последующей модернизацией».

Отправной позицией в плане формирования эффективной системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья является приверженность высшего руководства политике в данной области. Согласно требованиям стандарта политика в области безопасности труда и охраны здоровья должна предусматривать:

- соответствие характеру и масштабу рисков организации в области безопасности труда и охраны здоровья;
- обязательства по предупреждению травм и ухудшения состояния здоровья, постоянное улучшение системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья;
- обязательства соответствия производственных процессов и систем правовым требованиям и нормам безопасности труда;
- создание системы показателей для оценки и анализа достижения целей в области безопасности труда и охраны здоровья;
- создание системы документационного обеспечения процессов безопасности труда и охраны здоровья;
- доведение до всех сотрудников целей, обязанностей и ответственности в области безопасности труда и охраны здоровья;
- доступность для всех заинтересованных сторон;
- периодический анализ и поддержание в актуальном состоянии [24].

5. Система управления культурой производственной безопасности

Аналогично изложенным выше положениям определяются методологические подходы к формированию системы управления культурой производственной безопасности, включающей культуру промышленной безопасности и культуру

безопасности труда и охраны здоровья. Культура производственной безопасности является неотъемлемой составляющей организационной (корпоративной) культуры [25, 26]. В условиях современной экономики знаний особую актуальность приобретают процессы управления организационной культурой и знаниями. В этом отношении следует выделить ГОСТ Р 57133-2016 Национальный стандарт Российской Федерации «Менеджмент организационной культуры и знания. Руководство по наилучшей практике» [27]. В этом стандарте содержатся соответствующие указания по развитию системы знаний и внедрению её в организационную культуру. Организационная культура является существенным фактором, формирующим модели мышления и поведения сотрудников. И организационная культура, и организационные знания способствуют развитию человеческого и интеллектуального капитала организации, как совокупности личностных и организационных характеристик, компетенций, взглядов, убеждений, моделей мышления, воплощающихся в индивидуальном и коллективном взаимодействии и др. В аспекте культуры безопасности это фиксируется в моделях безопасного мышления и безопасного поведения сотрудников. Соответственно ГОСТ Р 57132-2016 Национальному стандарту Российской Федерации «Менеджмент знаний. Взаимосвязь с организационными функциями и дисциплинами. Руководство по наилучшей практике» важно обратить внимание на формирование культуры сотрудничества, культуры обмена знаниями в аспекте совершенствования организационной культуры в целом, и культуры производственной безопасности в частности. Культура сотрудничества является основой для формирования культуры доверия, по сути, являющейся базовой витальной характеристикой культуры безопасности. В свою очередь культуру производственной безопасности стоит рассматривать как фактор организационной (корпоративной) идентичности.

В ГОСТ Р 57133-2016 Национальный стандарт Российской Федерации «Менеджмент организационной культуры и знания. Руководство по наилучшей практике» среди факторов содействия развитию организационной культуры выделяются информационные технологии, подготовка и обучение персонала, корпоративные учебные центры и университеты, компетенции сотрудников, власть, доверие, идентичность. Высокий уровень идентичности, то есть осознания принадлежности к организации и коллективной интеграции, стоит рассматривать как приверженность организационным целям, в том числе целям производственной безопасности [28].

Таким образом, объективно создание интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий обосновывается высокими рисками и угрозами безопасности самого промышленного производства. Значительных успехов в формировании системы менеджмента безопасности посредством культуры производственной безопасности достигла атомная промышленность. Приверженность руководства целям производственной безопасности призвана служить ориентиром формирования эффективной культуры производственной безопасности промышленных предприятий. Опыт атомной промышленности в плане признания приоритетной роли руководства в вопросах формирования и развития культуры производственной безопасности стоит признать в качестве лучшей практики.

Основными результатами исследования приверженности руководства целям производственной безопасности как фактора формирования интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий являются:

- 1) характеристика структуры и содержания приверженности руководства целям производственной безопасности промышленных предприятий;
- 2) актуализация ценности культуры производственной безопасности промышленных предприятий и обоснование роли руководства в процессе формирования культуры производственной безопасности;

3) выявление структурных и содержательных аспектов интегрированной системы менеджмента безопасности промышленных предприятий;

4) обоснование совокупности общих подходов к формированию системы управления промышленной безопасности, менеджмента качества, экологического менеджмента, менеджмента безопасности труда и охраны здоровья, управления культурой производственной безопасности;

5) вывод о том, что создание единой системы показателей, мониторинга, оценки, анализа производственных процессов в целях обеспечения экономической, экологической и социальной безопасности промышленного производства позволит избежать дублирования в обработке данных, создать систему централизованного контроля и комплексного аудита производственных процессов, то есть повысит эффективность управления культурой производственной безопасности промышленных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лыскова, И.Е. Внедрение моделей устойчивого развития и бережливого производства в систему экологической и социальной безопасности современной организации (на примере Госкорпорации «Росатом») / И.Е. Лыскова // Глобальная ядерная безопасность. – 2019. – № 4(33). – С. 85-95.
2. Лыскова, И.Е. Стратегические цели производственной безопасности промышленных предприятий в аспекте приоритетов национальной и экономической безопасности Российской Федерации / И.Е. Лыскова // Глобальная ядерная безопасность. – 2021. – № 1(38). – С. 94-109.
3. Лыскова, И.Е. Основные направления формирования и развития культуры безопасности в Российской Федерации / И.Е. Лыскова // Глобальная ядерная безопасность. – 2021. – № 2(39). – С. 84-100.
4. Руденко, В.А. Обеспечение высокого уровня культуры безопасности при экспорте ядерных энергетических технологий / В.А. Руденко, Т.С. Попова, Ю.А. Евдошкина // Глобальная ядерная безопасность. – 2021. – № 2(39). – С. 101-109.
5. Машин, В.А. Современные основы концепции культуры безопасности / В.А. Машин // Электрические станции. – 2014. – № 10. – С. 2-10.
6. Международная консультативная группа по ядерной безопасности. Культура безопасности. Серия изданий по безопасности, №75-INSAG-4. МАГАТЭ, Вена, 1991. – 52 с. – URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/> (дата обращения 28.11.2021).
7. Международная консультативная группа по ядерной безопасности. Ключевые вопросы практики повышения культуры безопасности. INSAG-15. МАГАТЭ, Вена, 2015. – 32 с. – URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/> (дата обращения 28.11.2021).
8. Fundamental Safety Principles: IAEA Safety Standards No SF-1. – IAEA. – 2006. – 37 p.; Applications of the Management System for Facilities and Activities Safety Guide: IAEA Safety Standards Series No GS-G-3.1. – IAEA. – 2006. – 116 p.
9. The Management System for Nuclear Installations. Safety Guide: IAEA Safety Standards Series No GS-G-3.5. – IAEA. – 2009. – 157 p.
10. Адизес, И. Управляя изменениями. Как эффективно управлять изменениями в обществе, бизнесе и личной жизни. / И. Адизес; пер. с англ. В. Кузина. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2016. – 368 с.
11. Гоулман, Д. Эмоциональный интеллект. Почему он может значить больше чем IQ / Д. Гоулман; пер. с англ. А.П. Исаевой. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2017. – 544 с.
12. Кокинз, Г. Управление результативностью: Как преодолеть разрыв между объявленной стратегией и реальными процессами / Г. Кокинз; пер. с англ. – Москва : Альпина Паблишер, 2016. – 316 с.
13. Романченко, Л.Н. Формирование ключевых компетенций культуры безопасности жизнедеятельности в процессе обучения, как составляющая экономической безопасности страны / Л.Н. Романченко // Актуальные вопросы безопасности жизнедеятельности в современных условиях. – Москва : Финансовый университет при Правительстве РФ, 2019. – С. 171-183.
14. Principles for a Strong Nuclear Safety Culture. Guideline WANO GL 2006-02. – WANO. – 2006. – 14 p.

15. *Март, Б.* Ключевые показатели эффективности. 75 показателей, которые должен знать каждый менеджер / Б. Март; пер. с англ. А.В. Шаврина. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 340 с.
16. *Шервуд, Д.* Системное мышление для руководителей: практика решения бизнес-проблем / Д. Шервуд ; пер. а англ. – Москва : Альпина Паблишер, 2016. – 300 с.
17. ГОСТ Р 58542-2019 Национальный стандарт Российской Федерации. Интегрированные системы менеджмента. Руководство по практическому применению. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с.
18. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон РФ от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ (ред. от 29 июля 2018 г.) // Собрание законодательства РФ, 28.07.1997, № 30, ст. 3588.
19. ГОСТ Р ИСО 9001-2015 Национальный стандарт Российской Федерации Системы менеджмента качества. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 32 с.
20. ГОСТ Р ИСО 14001-2016 Национальный стандарт Российской Федерации Системы менеджмента качества. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 38 с.
21. Крылов, К.Д. 100-летие МОТ и прогнозы в сфере труда / К.Д. Крылов // Вестник университета имени О.Е. Кутафина (МГЮА). – 2019. – № 11. – С. 54-64.
22. Серегина, Л.В. Право на безопасный труд с учётом вызовов научно-технологического развития Российской Федерации / Л.В. Серегина // Журнал российского права. – 2020. – № 6. – С. 79-94.
23. ГОСТ Р 54934-2012/OHSAS 18001:2007 Национальный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента безопасности труда и охраны здоровья. Требования. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 47 с.
24. ГОСТ Р 12.0.007-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Система управления охраной труда в организации. Общие требования по разработке, применению, оценке и совершенствованию. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 77 с.
25. *Шейн, Э.Х.* Организационная культура и лидерство / Э.Х. Шейн; пер. с англ.; под ред. В.А. Спивака. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 336 с.
26. *Лютенс, Ф.* Организационное поведение / Ф. Лютенс; пер. с англ. – Москва : ИНФРА-М, 1999. – 692 с.
27. ГОСТ Р 57133-2016 Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент организационной культуры и знания. Руководство по наилучшей практике. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 75 с.
28. ГОСТ Р 57132-2016 Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент знаний. Взаимосвязь с организационными функциями и дисциплинами. Руководство по наилучшей практике. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 48 с.

REFERENCES

- [1] Lyskova I.E. Vnedrenie modelej ustojchivogo razvitiya i berezhlivogo proizvodstva v sistemu e'kologicheskoy i social'noj bezopasnosti sovremennoj organizacii (na primere Goskorporacii «Rosatom») [The Introduction of Models of Sustainable Development and Lean Production in Ecological and Social Safety System in Modern Organization (Using the Example of «Rosatom» State Corporation)]. *Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]*. 2019. No.4(33). P.85-95 (in Russian).
- [2] Lyskova I.E. Strategicheskie celi proizvodstvennoj bezopasnosti promy'shlennyy'x predpriyatij v aspekte prioritetoj nacional'noj i e'konomicheskoy bezopasnosti Rossijskoj Federacii [Strategic Objectives of Industrial Enterprises' Production Safety in Aspect of National and Economic Security Priorities of Russian Federation]. *Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]*. 2021. No.1(38). P. 94-109 (in Russian).
- [3] Lyskova I.E. Osnovny'e napravleniya formirovaniya i razvitiya kul'tury' bezopasnosti v Rossijskoj Federacii [The Main Directions of Forming and Development of Safety Culture in the Russian Federation]. *Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]*. 2021. No.2(39). P. 84-100 (in Russian).
- [4] Rudenko V.A, Popova T.S., Yu.A. Evdoshkina Obespechenie vy'sokogo urovnya kul'tury' bezopasnosti pri e'ksporte yadernyy'x e'nergeticheskix tekhnologij [Providing a High Level of Safety Culture when Exporting Nuclear Power Technologies]. *Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety]*. 2021. No.2(39). P.101-109 (in Russian).
- [5] Mashin V.A. Sovremennye osnovy koncepcii kul'tury bezopasnosti [Modern Foundations of Safety Culture Concept] *Elektricheskie stancii [Power Stations]*. 2014. No10. P. 2-10 (in Russian).

- [6] Mezhdunarodnaya konsul'tativnaya gruppa po yadernoj bezopasnosti. Kul'tura bezopasnosti. Seriya izdanij po bezopasnosti [International Advisory Group on Nuclear Safety. Safety culture. Safety Series]. №75-INSAG-4. MAGATE, Vena, 1991. 52 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/> (reference date 28.11.2021) (in Russian).
- [7] Mezhdunarodnaya konsul'tativnaya gruppa po yadernoj bezopasnosti. Klyuchevye voprosy praktiki povysheniya kul'tury bezopasnosti. [International Advisory Group on Nuclear Safety. Key Issues in the Practice of Improving Safety Culture] INSAG-15. MAGATE, Vena, 2015. 32 p. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/> (reference date 28.11.2021) (in Russian).
- [8] Fundamental Safety Principles: IAEA Safety Standards No SF-1. IAEA. 2006. 37p.; Applications of the Management System for Facilities and Activities Safety Guide: IAEA Safety Standards Series No GS-G-3.1. IAEA. 2006. 116p. (in English).
- [9] The Management System for Nuclear Installations. Safety Guide: IAEA Safety Standards Series No GS-G-3.5. IAEA. 2009. 157 p. (in English).
- [10] Adizes I.S. Upravlyaya izmeneniyami. Kak e'ffektivno upravlyat' izmeneniyami v obshhestve, biznese i lichnoj zhizni [Mastering Change. The Power of Mutual Trust and Respect in Personal Life, Family Life, Business and Society]. Moscow. Mann, Ivanov and Ferber. 2016. 368p. (in Russian).
- [11] Goleman D. E'mocional'ny'j intellekt. Pochemu on mozhet znachit' bol'she chem IQ. [Emotional Intelligence. Why It Can Matter More Than IQ]. Moscow. Mann, Ivanov and Ferber. 2017. 544p. (in Russian).
- [12] Cokins G. Upravlenie rezul'tativnost'yu: Kak preodolet' razryv mezhdu ob'yavlennoj strategiej i real'ny'mi processami [Performance Management. Finding the Missing Pieces (to Close the Intelligence Gap)]. Moscow: Al'pina Pablishe [Alpina Publisher]. 2016. 316p. [in Russian].
- [13] Romanchenko L.N. Formirovanie klyuchevyh kompetencij kul'tury bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti v processe obucheniya, kak sostavlyayushchaya ekonomicheskoy bezopasnosti strany [Formation of Key Competencies of Life Safety Culture in the Learning Process, as a Component of Country Economic Security]. Aktual'nye voprosy bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti v sovremennykh usloviyakh [Topical Issues of Life Safety in Modern Conditions]. Moskva: Finansovyj universitet pri Pravitel'stve RF [Moscow: Financial University under the Government of the Russian Federation]. 2019. P.171-183 (in Russian).
- [14] Principles for a Strong Nuclear Safety Culture. Guideline WANO GL 2006-02. WANO. 2006. 14p. (in English).
- [15] Marr B. Klyuchevy'e pokazateli e'ffektivnosti. 75 pokazatelej, kotory'e dolzhen znat' kazhdy'j menedzher [Key Performance Indicators. The 75 Measures Every Manager Needs to Know]. Moskva: BINOM. Laboratoriya znaniy. [Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory]. 2014. 340 p. (in Russian).
- [16] Sherwood D. Sistemnoe my'shlenie dlya rukovoditelej: praktika resheniya biznes-problem [A Manager's Guide to Applying Systems Thinking]. Moscow: Al'pina Pablishe [Alpina Publisher]. 2016. 300p. (in Russian).
- [17] GOST R 58542-2019 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Integrirovannye sistemy menedzhmenta. Rukovodstvo po prakticheskomu primeneniyu [GOST R 58542-2019 National Standard of the Russian Federation. Integrated Management Systems. Practical Application Guide]. Moscow: Standartinform, 2019. 16p. (in Russian).
- [18] O promyshlennoj bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov: Federal'nyj zakon RF ot 21 iyulya 1997 g. № 116-FZ (red. ot 29 iyulya 2018 g.) Industrial Safety of Hazardous Production Facilities: Federal Law of the Russian Federation of July 21, 1997 No. 116-FL (as amended on July 29, 2018)// Sobranie zakonodatel'stva RF [Collection of Legislation of the Russian Federation], 28.07.1997, №30, st.3588 (in Russian).
- [19] GOST R ISO 9001-2015 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [GOST R ISO 9001-2015 National Standard of the Russian Federation Quality Management Systems. Requirements]. Moscow: Standartinform, 2015. 32p. (in Russian).
- [20] GOST R ISO 14001-2016 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii Sistemy menedzhmenta kachestva. Trebovaniya [GOST R ISO 14001-2016 National Standard of the Russian Federation Quality Management Systems. Requirements]. Moscow: Standartinform, 2016. 38 p. (in Russian).
- [21] Krylov K.D. 100-letie MOT i prognozy v sfere truda [ILO Centenary and World of Work Forecasts]. Vestnik universiteta imeni O.E. Kutafina (MGYUA) [Bulletin of the Kutafin University (Moscow State Law Academy)]. 2019. No.11. P.54-64 (in Russian).
- [22] Seregina L.V. Pravo na bezopasnyj trud s uchytom vyzovov nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii [The Right to Safe Work, Taking into Account the Challenges of Scientific and Technological Development of the Russian Federation]. Zhurnal rossijskogo prava [Journal of Russian Law]. 2020. No.6. P.79-94 (in Russian).

- [23] GOST R 54934-2012/OHSAS 18001:2007 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Sistemy menedzhmenta bezopasnosti truda i ohrany zdorov'ya. Trebovaniya [National Standard of the Russian Federation. Occupational Safety and Health Management Systems. Requirements]. Moscow: Standartinform, 2012. 47 p. (in Russian).
- [24] GOST R 12.0.007-2009. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Sistema standartov bezopasnosti truda. Sistema upravleniya ohranoj truda v organizacii. Obshchie trebovaniya po razrabotke, primeneniyu, ocenke i sovershenstvovaniyu [National Standard of the Russian Federation. Occupational Safety Standards System. Occupational Safety Management System in the Organization. General Requirements for Development, Application, Evaluation and Improvement]. Moscow: Standartinform, 2012. 77p. (in Russian).
- [25] Schein E.H. Organizacionnaya kul'tura i liderstvo [Organizational Culture and Leadership]. Sank-Peterburg: Piter [Saint Petersburg: Peter]. 2002. 336 p. (in Russian).
- [26] Luthans F. Organizacionnoe povedenie [Organizational Behavior]. Moscow: INFRA-M, 1999. 692 p. (in Russian).
- [27] GOST R 57133-2016 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Menedzhment organizacionnoj kul'tury i znaniya. Rukovodstvo po nailuchshej praktike [GOST R 57133-2016 National Standard of the Russian Federation. Organizational Culture and Knowledge Management. Best Practice Guide]. Moscow: Standartinform, 2016. 75 p. (in Russian).
- [28] GOST R 57132-2016 Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Menedzhment znaniy. Vzaimosvyaz' s organizacionnymi funkciyami i disciplinami. Rukovodstvo po nailuchshej praktike [GOST R 57132-2016 National Standard of the Russian Federation. Knowledge Management. Relationship with Organizational Functions and Disciplines. Best Practice Guide]. Moscow: Standartinform, 2016. 48 p. (in Russian).

Management Commitment to the Goals of Production Safety as a Formation Factor of Integrated Safety of Industrial Enterprise Management System

I.E. Lyskova

*The Komi Republican Academy of State Service and Administration,
Syktyvkar, Russia 167000
ORCID iD: 0000-0003-2748-2794
WoS Researcher ID: T-1644-2018
e-mail: IrinaLyskova@mail.ru*

Abstract – The paper actualizes the political, social and economic, cultural foundations of the formation of a culture of industrial safety of industrial enterprises. The structural and substantive aspects of the management's commitment to the goals of industrial safety are revealed. A general analysis of the current regulatory framework defining the methodological foundations for the formation of an integrated safety management system of industrial enterprises in the Russian Federation is proposed.

Keywords: production safety, production safety culture, management commitment to industrial safety objectives, integrated safety management system, industrial safety management, quality management, environmental management, occupational safety and health management, production safety culture management.

AUTHOR INDEX

Alhmoud A.Z.	31
Arkadov G.V.	36
Elokhin A.P.	16
Fedorchenko S.N.	16
Gerasimov S.I.	7
Golovko M.V.	56
Kanygin I.A.	7
Krivin V.V.	47
Kruglov A.B.	31
Lapkis A.A.	56
Lyskova I.E.	73
Myasoedov S.A.	56
Nevmerzhitsky N.V.	7
Pavelko V.I.	36
Popova T.S.	66
Povarov V.P.	36
Shpicer V.Ya.	47
Slepov M.T.	36
Tolstov V.A.	47

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Альхмуд А.З.	31
Аркадов Г.В.	36
Герасимов С.И.	7
Головко М.В.	56
Елохин А.П.	16
Каныгин И.А.	7
Кривин В.В.	47
Круглов А.Б.	31
Лапкис А.А.	56
Лыскова И.Е.	72
Мясоедов С.А.	56
Невмержицкий Н.В.	7
Павелко В.И.	36
Поваров В.П.	36
Попова Т.С.	66
Слепов М.Т.	36
Толстов В.А.	47
Федорченко С.Н.	16
Шпицер В.Я.	47

NOTES FOR AUTHORS

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

One file consists of one paper which has the following:

- UDC index;
- the title in Russian and English;
- the structured abstract (200-250 words) in Russian and English;
- keywords in Russian and English (not less than 10 speech units);
- the list of references in Russian and English;
- information about the authors in Russian and English (a surname, a name, a middle name, a work place, a position, an academic degree, a rank and E-mail address, contact phone number);
- ORCID и Researcher ID index of each author (<http://orcid.org> и <http://www.researcherid.com>).

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

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

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

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

To accept an article in the journal you should provide the following materials by e-mail **oni-viti@mephi.ru**:

- an article file in Word format;
- the same file in pdf format signed by the author;
- a certificate of material verification for anti-plagiarism
- an application from the institution where the work is made;
- an expert resolution on publication possibility.

THE LIST OF REFERENCES STANDARD IN ENGLISH

For journals:

- [1] Berela A.I., Bylkin B.K., Tomilin S.A., Fedotov A.G. Analiz i predstavlenie sredy deystviya v sisteme proektirovaniya tehnologii demontazha oborudovaniya pri vyvode iz ekspluatatsii bloka AES [The analysis and representation of the action environment in system of technology design of equipment dismantle during NPP unit taking out of operation] [Global nuclear safety]. 2014. № 1(10). P. 25-31 (in Russian).
- [2] Lobkovskaya N.I., Evdoshkina Yu.A. Professional'noe celepolaganie kak sostavlyayushhaya kul'tury bezopasnosti budushhego specialista-atomshhika [Professional Goal-Setting as a Component of the Safety Culture of a Future Nuclear Specialist]. Sovremennoe obrazovanie [Modern Education]. 2017. № 1. P. 32-38. URL: http://e-notabene.ru/pp/article_22498.html (in Russian).

For books:

- [3] Mogilev V.A., Novikov S.A., Faykov Yu.I. Tekhnika vzryvnogo eksperimenta dlya issledovaniya mekhanicheskoy stoykosti konstruksiy. [Explosive experiment techniques for research of mechanical firmness of designs]. Sarov. FGUP «RFYaTs-VNIIEF» [Russian Federal Nuclear Center – The All-Russian Research Institute of Experimental Physics]. 2007. 215 p. (in Russian).

For web-resources:

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

For foreign references:

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

For materials of conferences:

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

For materials of conferences (foreign references):

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

Editorial office address (for sending printed correspondence):

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

Editorial office of «Global Nuclear Safety» journal

*E-mail: **oni-viti@mephi.ru***

Tel: +79281883628, Nadezhda I. Lobkovskaya

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

В одном файле помещается одна статья, частями которой являются:

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

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

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

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

С целью повышения качества и объективности публикаций авторы призваны отражать в статьях передовой научный опыт стран дальнего зарубежья, России и СНГ по рассматриваемой проблематике. Библиография оформляется согласно ГОСТу 7.0.100-2018 (дата введения – 01.07.2019) «Библиографическая запись и библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Список литературы включает в не менее 12-и источников (из них не более 3-х ссылок на собственные работы), с обязательным включением как минимум 5-и источников позднее 2017 г., и не менее 4 ссылок на зарубежные (из стран дальнего зарубежья, за пределами бывшего СССР) исследования последних лет. Список литературы приводится в конце статьи в порядке упоминания в тексте в квадратных скобках номера источника. Ссылки на иностранные источники даются на языке оригинала и сопровождаются, в случае перевода на русский язык, указанием на перевод. Учебники, учебные пособия, академические методические указания и рекомендации не включаются в список литературы. References приводятся после списка литературы на

русском языке (правила оформления см. в разделе The list of references standard in English). Библиография на английском языке должна быть оформлена в соответствии со стандартом Scopus. Укажите артикул DOI, если он есть.

Для принятия статьи в номер журнала необходимо предоставить следующие материалы по электронной почте oni-viti@mephi.ru:

- файл со статьей в формате Word;
- этот же файл в формате pdf с подписью авторов;
- справка о проверке материала на антиплагиат;
- представление от учреждения, в котором выполнена работа;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ ЛИТЕРАТУРЫ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

Для книг с одним автором:

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

Для книг с двумя и более авторами:

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

Для журналов в статье с одним автором:

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

Для журналов в статье с более четырех авторами:

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

Для диссертаций:

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

Для депонированных работ:

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

Описание архивных материалов:

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

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

Материалы конференций:

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

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

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

ГЛОБАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

2021, 4(41)

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

Сдано в набор 10.12.2021 г.

Компьютерная верстка Казак Ю.Ю.

Подписано к печати 17.12.2021 г.

Бумага «Снегурочка» 80 г/м². Объем 7,03 печ.л.

Гарнитура «TimesNewRoman»,

Тираж 300 экз.

Отпечатано в типографии ВИТИ (ф) НИЯУ МИФИ



Ресурсный центр Госкорпорации «Росатом» - НИЯУ МИФИ

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

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

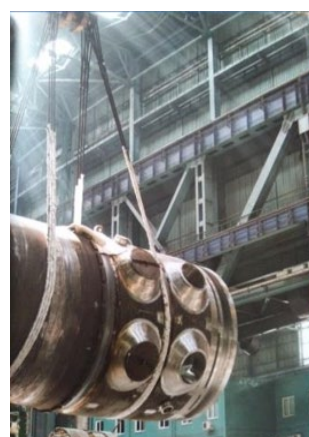
Филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск



Изучение конструкции
оборудования АЭС на
полномасштабных
образцах



**Учебно-тренировочное
подразделение Ростовской**



Проведение
неразрушающих
видов контроля на
корпусе реактора



**Виртуальные 3-D комплексы
энергоблока АЭС**



Приглашаем на следующие программы в Ресурсном центре:

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

Занятия проводятся на русском/английском языках

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