

Том 13, номер 3

ISSN 2304-487X

МАЙ – ИЮНЬ 2024

<https://vestnikmephi.elpub.ru>

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»



Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВЕСТНИК НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО УНИВЕРСИТЕТА «МИФИ»

Том 13 № 3 2024 МАЙ - ИЮНЬ

Основан в июле 2012 г.

Выходит 6 раз в год

ISSN: 2304-487X

ПИ № ФС 77 - 41948

Главный редактор

М.Н. Стриханов

Редакционная коллегия:

А.В. Аксёнов, Pavel Bedrikovetsky,
С.Г. Гаранин, Vladimir S. Gerjikov, Н.Н. Евтихийев,
Yalchin Efendiev, Alexei I. Zhurov, Н.П. Калашников, Н.И. Каргин, С.А. Кащенко,
Н.А. Кудряшов (*заместитель главного редактора*),
Raytcho Lazarov, О.В. Нагорнов, А.Д. Полянин,
В.В. Цегельник, Б.Н. Четверушкин,
М.А. Чмыхов (*ответственный секретарь*), William E. Schiesser

Выпускающий редактор: Н.В. Ермолаева

Адрес редакции: 115409, Москва, Каширское ш., 31,
Вестник НИЯУ МИФИ

Интернет: <https://vestnikmephi.elpub.ru>

Электронная почта: vestnik@mephi.ru

**Москва
НИЯУ МИФИ**

СОДЕРЖАНИЕ

Том 13, № 3, 2024

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА

- Статистические приближения при исследовании взаимодействия широкополосного лазерного излучения в сложной среде**
В.В. Булатов, А.Н. Пономарев 123
- Расчетное обоснование конструкции облучательного устройства для испытания микросферического топлива в реакторе СМ-3 по определению выхода продуктов деления**
М.С. Каплина, Н.К. Калинина, Н.Ю. Марихин, В.С. Моисеев, О.И. Дреганов 133

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

- Моделирование температурных полей в многослойных дорожных одеждах на основе данных мониторинга**
М.Ю. Горский, Е.Н. Симчук, А.В. Бочкарев 142
- Представление решений одномерного нелинейного уравнения теплопроводности тригонометрическими рядами**
С.П. Баутин, И.А. Вазиева 154

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

- Анализ развития системы управления цепями поставок и их актуального состояния в России**
А.Р. Улимаева, Д.С. Смирнов 160
- Использование цифровых фильтров для классификации сигналов в реальном времени**
К.Я. Кудрявцев 169
- Система управления мобильным роботом в среде ROS2 с помощью жестов**
В.А. Бабанина, А.И. Петрова, Т.И. Возненко 176

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Извлечение отработавших закрытых источников ионизирующего излучения из хранилищ бесконтейнерного хранения объектов ядерного наследия**
Н.В. Чегонов, Е.А. Ванина, А.Ю. Кузнецов 184

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Методические основы применения платформы Digital Decommissioning для цифрового сопровождения заключительных стадий жизненного цикла ОИАЭ**
В.Л. Тихоновский, А.А. Бундин 192

Contents

Volume 13 Number 3, 2024

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL PHYSICS

Statistical approximations in studying the interaction of broadband laser radiation in a complex environment

V.V.Bulatov, A.N.Ponomarev

123

Design-basis justification of an irradiation rig design to test micro-spherical fuel in the SM-3 reactor to determine the fission gas release

M.S. Kaplina, N.K. Kalinina, N.Yu. Marikhin, V.S. Moiseyev, O.I. Dreganov

133

MATHEMATICAL MODELS AND NUMERICAL METHODS

Modeling of temperature fields in multilayer road pavements based on monitoring data

M.Yu. Gorskiy, E.N. Simchuk, A.V. Bochkarev

142

Representation of solutions to the nonlinear heat conductivity equation by trigonometric series

S.P. Bautin, I.A. Vazieva

154

APPLIED MATHEMATICS AND COMPUTER SCIENCE

Analysis of the development of the supply chain management system and its current state in Russia

A.R. Ulimaeva, D.S. Smirnov

160

Using digital filters for real-time signal classification

K.Ya. Kudryavtsev

169

Gesture-based control system for mobile robot in ROS2 environment

V.A. Babanina, A.I. Petrova, T.I. Voznenko

176

NUCLEAR ENERGY AND NUCLEAR TECHNOLOGIES

Extraction of spent sealed sources of ionizing radiation from containerless object storage storage nuclear legacy

N.V. Chegonov, E.A. Vanina, A.Yu. Kuznetsov

184

BRIEF MESSAGES

Methodology basics for utilizing the Digital Decommissioning platform for digital support of nuclear back-end activities

V.L. Tikhonovsky, A.A. Bundin

192

УДК 621.373.826

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СЛОЖНОЙ СРЕДЕ

В.В. Булатов^{1,*}, А.Н. Пономарев^{2,}**

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, 119526, Россия

²МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, 105005, Россия

*e-mail: internalwave@mail.ru

**e-mail: holodel@yandex.ru

Поступила в редакцию: 21.04.2024

После доработки: 21.04. 2024

Принята к публикации: 14.05.2024

В работе теоретически изучены статистические выражения, описывающие изменение степени когерентности широкополосного лазерного излучения с наклоненным слоем когерентности в однородной среде. Рассмотрен случай изменения пространственной когерентности пересекающихся широкополосных световых пучков с параллельными слоями когерентности. Дана оценка области когерентного взаимодействия для указанного случая и определено, что степень когерентности диспергированного луча с расстоянием уменьшается заметно быстрее, чем в случае без использования дисперсионного элемента. В рамках использованных моделей получено, что нарушение когерентности при распространении светового пучка возрастает с ростом угла наклона слоев когерентности. Была также изучена возможность значительного увеличения области когерентного взаимодействия пересекающихся лучей в результате наклона их слоев когерентности таким образом, чтобы с помощью установки определенного значения угла их пересечения можно было получить для них параллельность слоев когерентности. В этом случае снимаются ограничения на поперечный размер перекрывающихся лучей и становится возможным использовать всю область их перекрытия. Была изложена общая схема построения асимптотик полученных аналитических решений. Показано, что универсальный характер асимптотических методов расчета волновых импульсов можно дополнить некоторыми универсальными эвристическими условиями и критериями применимости этих методов. Эти критерии обеспечивают внутренний контроль применимости использованных асимптотических методов, и в ряде случаев на основе сформулированных критериев удастся оценивать волновые поля там, где данные методы неприменимы. Тем самым открываются широкие возможности анализа волновых картин в целом, что важно как для правильной постановки теоретических исследований, так и для проведения оценочных расчетов при экспериментальных или натурных измерениях волновых пакетов лазерного излучения.

Ключевые слова: обращение волнового фронта, широкополосное лазерное излучение, когерентность, дисперсионный элемент, петлевая схема.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.316

EDN NSOCXP

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время являются актуальными задачи, предполагающие осуществление непрерывного дистанционного мониторинга состояния водной среды и таких объектов, как морские платформы и другие технологические конструкции, позволяющие в течение продолжительного времени контролировать их параметры с целью предотвращения техногенных катастроф. Применение современных твердотельных лазеров с диодной накачкой (лидаров) открывают широкие перспективы для информационно-измерительных систем сбора данных по

измерению распределения физических величин в водном пространстве, в том числе решения проблем оперативного дистанционного зондирования морской поверхности [1–3]. Отметим, что наиболее перспективными методами контроля морских акваторий с целью обнаружения загрязнений на поверхности воды можно считать методы активной лазерной локации или радиолокации водной поверхности. В этом случае не требуется естественного освещения и поэтому указанные системы могут использоваться в широком диапазоне атмосферных условий независимо от времени суток. Лидарные системы обладают высокой пространствен-

но-угловой разрешающей способностью, возможностью спектральной фильтрации и временного стробирования полезного сигнала на фоне помех. Указанные свойства лидаров делают возможным проводить исследования расположенных в толще воды различных объектов в зависимости от первичных гидрооптических характеристик, состояния взволнованной поверхности воды, проводить зондирование стратифицированной толщи морской воды с целью определения параметров стратификации первичных гидрооптических характеристик, определять параметры светорассеивающих слоев воды, регистрировать поверхностные и внутренние гравитационные волны, оценивать их характеристики. Импульсная характеристика лидара определяет пространственное разрешение лидарных измерений в зависимости от дальности, а также точность определения расстояния до обследуемых объектов. Данная характеристика является сверткой зондирующего лазерного импульса с импульсной характеристикой приемно-регистрирующей оптической системы. Современные достижения в производстве компактных твердотельных лазеров с диодной накачкой способствуют стремительному развитию оптических технологий в лазерной локации земной поверхности и водных сред [4–6].

При прохождении световой волны в природных средах (атмосфере, океане) в силу оптической неоднородности образуются искажения волнового фронта. Для устранения искажений разрабатываются различные специальные оптические системы, включающие твердотельный лазер, приемник излучения, регистрирующий световые волны, устройство коррекции волнового фронта и систему управления. Один из методов восстановления искажений волнового фронта основан на использовании эффекта обращения волнового фронта (ОВФ). Обращенный волновой фронт будет обратным по отношению к искаженному первичному лучу, и в результате наложения двух фронтов можно восстановить исходное изображение. Лазерное излучение после прохождения через неоднородную среду превращается в искаженное пятно, изменяющееся со временем. Отражаясь от объекта, оно еще сильнее искажается и может накладывать серьезные ограничения на точность измерений. В случае же использования обращения волнового фронта, отраженного от объекта, излучения, направляемого обратно по тому же самому пути, при отсутствии значи-

тельных изменений условий прохождения луча за это время происходит восстановление качества пятна на объекте.

Для решения задачи исправления или восстановления волнового фронта в сложных информационных системах, требующих получения оптического изображения высокого разрешения и качества, необходимо разрабатывать соответствующие оптические устройства, способные делать компенсацию указанных искажений в режиме реального времени. Поэтому происходящее в настоящее время активное развитие в области приложений использования явления ОВФ продолжает стимулировать его дальнейшие исследования [7–12]. Одним из существенных ограничений при применении ОВФ служит ширина спектра излучения $\Delta\lambda$, поскольку для эффективного взаимодействия световых пучков необходима их корреляция во всей области пересечения. Если лучи пересекаются под малым углом ψ , тогда можно оценить размер области когерентного взаимодействия $\sim l_c/\psi$, $l_c = \lambda^2/\Delta\lambda$, где l_c – длина когерентности, λ – среднее значение длины волны излучения. Слои когерентности пересекающихся пучков для случая плоской волны также будут пересекаться под углом ψ , поэтому размер области их наложения тоже можно оценить, как $\sim l_c/\psi$.

Для эффективного обращения волнового фронта в случае петлевой схемы требуется выполнение условия, когда область наложения пересекающихся лазерных пучков существенно меньше значения $\sim l_c/\psi$. Данное условие предполагает использование узкополосного одномодового лазерного излучения, что, в свою очередь, ведет к уменьшению энергии импульса волны по сравнению с многомодовым излучением.

Для решения данной проблемы может быть применена петлевая схема ОВФ с наклоненными слоями когерентности лазерного излучения, представленная на рис. 1 [10].

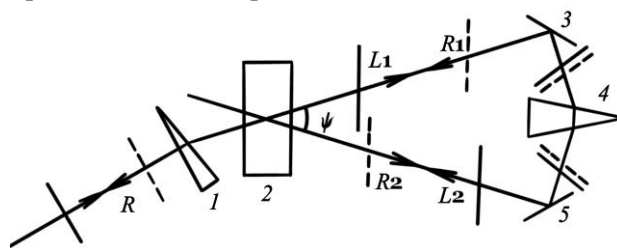


Рис. 1. Петлевая схема обращения волнового фронта: 1, 4 – призмы; 2 – нелинейная среда; 3, 5 – поворотные зеркала; L – входящее лазерное излучение; R , $R1$ – обращенная волна; $R2$ – сигнальная волна; $L1(L2)$ – опорные волны

Для наклона слоев когерентности использовалась призма 1. Призма 4 с увеличенной по сравнению с призмой 1 в два раза угловой дисперсией была расположена таким образом, чтобы изменить угол наклона слоев когерентности на противоположное значение. В работе [11] было экспериментально показано, что применение схемы четырехволнового взаимодействия с

наклоном слоев когерентности лазерного излучения с помощью призмы позволило получить эффективное обращения волнового фронта для излучения с шириной спектра генерации $\Delta\lambda \sim 20$ нм. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

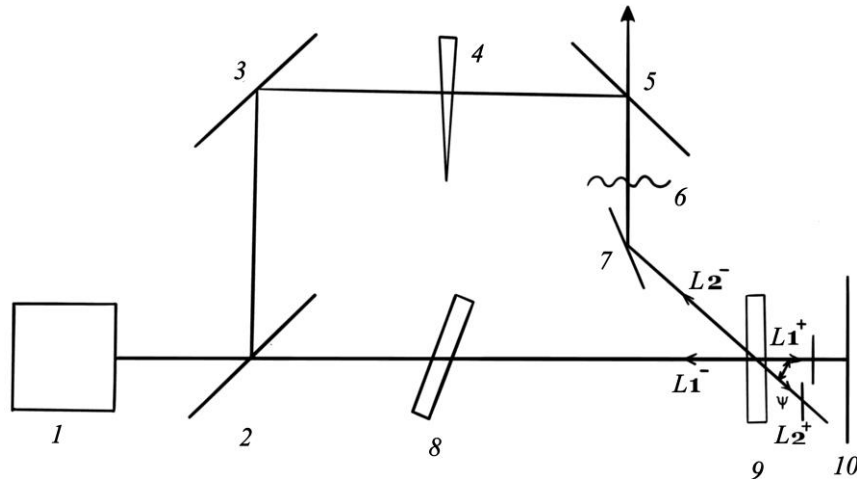


Рис. 2. Схема четырехволнового обращения волнового фронта: 1 – одномодовый лазер на красителе; 2 – полупрозрачное зеркало; 3, 5, 7, 10 – зеркала; 6 – диффузатор; 8 – поворотная пластина; 9 – кювета с раствором красителя; $L1^\pm$ – опорные волны; $L2^+$ – сигнальная волна; $L2^-$ – обращенная волна

Цель настоящей работы – теоретическое изучение возможности увеличения области когерентного взаимодействия лазерных пучков за счет наклона их слоев когерентности, выполненного таким образом, чтобы сделать когерентные слои двух пересекающихся лучей параллельными друг другу, а также проведение расчетов статистических значений параметров излучения, которое может быть проведено с помощью усреднения по всем возможным ре-

ализациям интегральных представлений волновых полей.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Рассмотрим следующую схему, использующую для наклона слоев когерентности дисперсионный элемент, которым может быть призма или дифракционная решетка, работающая в первом порядке дифракции (рис. 3).

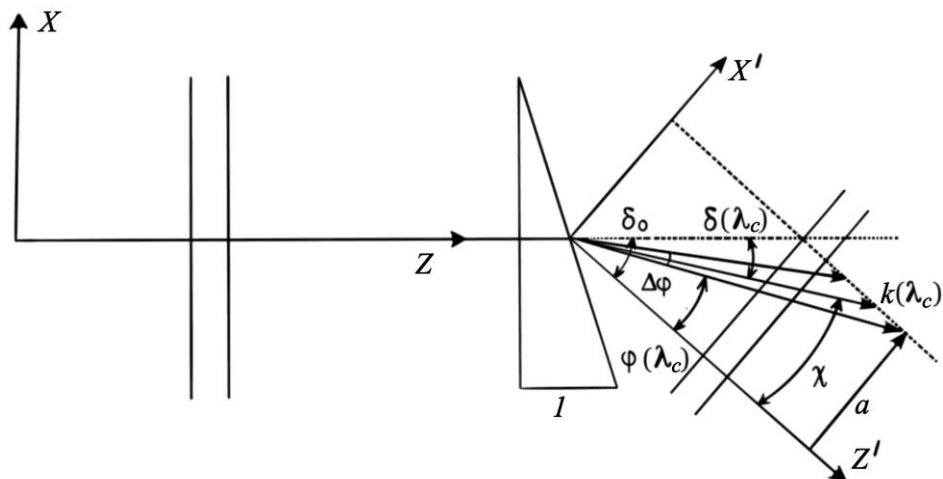


Рис. 3. Наклон слоев когерентности призмой световых пучков: 1 – призма

Первоначальная плоскопараллельная волна распространяется в направлении оси z , а волновой вектор $\mathbf{k}(\lambda)$ лежит в плоскости Oxy . Будем рассматривать случай линейного приближения, когда угол наклона δ линейно зависит от длины волны излучения. Тогда для среднего значения длины волны λ_c спектра $\Delta\lambda$ величину наклона можно записать:

$$\delta(\lambda) \approx \delta(\lambda_c) + (\lambda - \lambda_c) \frac{d\delta}{d\lambda}.$$

Если выбрать угол δ_0 такой, что его направление совпадает с осью z' (см. рис. 3): $\delta_0 = \delta(\lambda_c) - \lambda_c \frac{d\delta}{d\lambda}$. Тогда получим: $\varphi(\lambda) = \delta(\lambda) - \delta_0 = \lambda \frac{d\delta}{d\lambda}$. Поскольку значение угла $\varphi(\lambda)$ мало, то можно принять, что значения перпендикулярных составляющих волновых векторов $\mathbf{k}(\lambda)$ на ось z одинаковы для всех λ из спектра $\Delta\lambda$. В этом случае поле после дисперсионного устройства будет пространственно-когерентно, а слои его когерентности будут перпендикулярны к оси z' . Обозначим угол наклона слоев когерентности через χ . Тогда данный угол χ будет равен углу между осевым направлением луча $\mathbf{k}(\lambda_c)$ и нормалью к слоям: $\chi = -\varphi(\lambda_c) = -\lambda_c \frac{d\delta}{d\lambda}$. При этом угловую расходимость луча можно оценить как $\Delta\varphi \approx |\chi| \Delta\lambda / \lambda_c$. Для выполнения условия параллельности слоев когерентности для лучей $L1$ и $L2$ необходимо, чтобы угол их пересечения ψ был равен сумме модулей χ_1 и χ_2 , где χ_1 относится к лучу $L1$, а χ_2 – к лучу $L2$.

В случае пространственнеоднородного исходного излучения при выполнении условия, чтобы его слои когерентности были перпендикулярны к оси z , это излучение можно рассматривать в виде суммы меняющихся одновременно полей E_n , каждое из которых является суперпозицией плоских волн с перпендикулярными к оси z составляющими волновых векторов $\mathbf{k}_n(\lambda)$. После прохождения через дисперсионное устройство поля E_n преобразуются в поля E_{n1} , для которых будут получены составляющие волновых векторов, перпендикулярные к оси z' . Поскольку огибающие полей E_{n1} двигаются вдоль оси z' с различными скоростями, то будет происходить ухудшение пространственной когерентности поля E_{n1} на расстоянии $z' \geq l_c / 2\theta Y |\chi|$, где 2θ – угловая расходимость первоначального излучения E_n ; Y – угловое увеличение дисперсионного элемента. В отсутствии последнего пространственная когерентность сохраняется на большем расстоянии, равном

$2l_c / \theta^2$, поэтому для исключения влияния данного эффекта в [10] использовалась вторая призма с большей, чем у первой дисперсией. Вторая призма ориентировалась таким образом, чтобы изменить знак χ на противоположный. Тогда в этом случае после прохождения второго дисперсионного элемента пространственная когерентность будет восстанавливаться.

Для эффективной работы схемы обращения волнового фронта требуется высокая пространственная когерентность излучения на всей длине пересечения пучков. Поскольку внесение дисперсионного элемента ведет к росту нарушения когерентности, то в случае применения метода наклона слоев когерентности необходимо определить картину этих нарушений. Для этого рассмотрим случай, когда на дисперсионный элемент (тонкая дифракционная решетка, работающая в одном порядке дифракции) падает плоская пространственно-когерентная волна $E_0(\mathbf{r}, t)$ вдоль оси z . В этом случае поле имеет плоские слои когерентности, которые будут перпендикулярны оси z . В общем случае для однородных стационарных пространственно-временных случайных полей можно применить следующее представление [13–15]

$$E_0(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(\omega) \varepsilon_0(\mathbf{k}_0) \times \\ \times \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(\omega, \mathbf{k}_0) \mathbf{r})) d\omega d^2 \mathbf{k}, \quad (1)$$

где $\mathbf{k}_0$ – поперечная компонента волнового вектора $\mathbf{k}$, $|\mathbf{k}(\omega, \mathbf{k}_0)| = k(\omega) = \frac{\omega n}{c}$, n – показатель преломления; $\varepsilon(\omega)$ – спектральная амплитуда поля. Исходя из требования однородности и стационарности случайного поля $E_0(\mathbf{r}, t)$, можно, усреднив по времени, записать [13–15]

$$\overline{\varepsilon(\omega) \varepsilon^*(\omega')} = g(\omega) \delta(\omega - \omega'), \quad (2)$$

где $g(\omega)$ – спектральная плотность случайного пространственно-временного поля.

Дисперсионный элемент преобразует плоскую волну с волновым вектором $\mathbf{k}(\omega, \mathbf{k}_0)$ в плоскую волну с волновым вектором $\mathbf{k}(\omega, \mathbf{k})$. Вектор $\mathbf{k}$ можно представить в виде суммы двух векторов $\mathbf{k} = \mathbf{k}_0 + \boldsymbol{\alpha}$, где $\boldsymbol{\alpha}$ – вектор, перпендикулярный оси z . Тогда поле после дисперсионного элемента можно записать в виде

$$E(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon(\omega) \varepsilon(\mathbf{k}) \times \\ \times \exp(i(\omega t - \mathbf{k}(\omega, \mathbf{k}) \mathbf{r})) d\omega d^2 \mathbf{k}, \quad (3)$$

$$\varepsilon(\mathbf{k}) = \varepsilon(\mathbf{k}_0)\sqrt{\eta},$$

где η – угловое увеличение дисперсионного элемента.

Полученное поле $E(\mathbf{r}, t)$ пространственно когерентно в плоскости и имеет плоские слои когерентности, перпендикулярные к оси z . Рассмотрим случай симметричного распределения первоначального поля $E_0(\mathbf{r}, t)$ относительно оси z . Пусть ω_c – средняя частота спектра светового пучка. Тогда направление пучка после дисперсионного элемента описывается как $\mathbf{k}(\omega_c, \alpha)$. В случае, если в качестве дисперсионного элемента взять дифракционную решетку, то при ориентации оси z перпендикулярно ее штрихам вектор $\mathbf{k}(\omega_c, \alpha)$ будет образовывать с осью z угол χ , для которого выполняется следующее условие $\sin \chi = \frac{\alpha}{k(\omega_c)}$, где значение α является проекцией вектора α на ось x .

Для стационарного случайного процесса можно ввести нормированные пространственные распределения интенсивностей, усредненные по поперечному пространственному распределению полей $E_0(\mathbf{r}, t)$ и $E(\mathbf{r}, t)$ [13–15]

$$\frac{cn}{8\pi} \langle \varepsilon_0(\mathbf{k}_0) \varepsilon_0^*(\mathbf{k}'_0) \rangle = I_0 g(\mathbf{k}_0) \delta(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}'_0), \quad (4)$$

$$\frac{cn}{8\pi} \langle \varepsilon(\mathbf{k}) \varepsilon^*(\mathbf{k}') \rangle = I g(\mathbf{k}) \delta(\mathbf{k} - \mathbf{k}'),$$

где I_0 и I – средние значения по сечению интенсивностей, $I = \eta I_0$; $g(\mathbf{k}) = g(\mathbf{k}_0) = g(\mathbf{k} - \alpha)$.

Для поля $E(\mathbf{r}, t)$ комплексную степень пространственной когерентности принято определять следующим образом:

$$\gamma_{12}(\tau) = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{I_1 I_2}},$$

где $\Gamma_{12}(\tau) = \overline{E_1(\mathbf{r}_1, t + \tau) E_2^*(\mathbf{r}_2, t)}$ – взаимная корреляционная функция полей $E_1(\mathbf{r}, t)$ и $E_2(\mathbf{r}, t)$ [13–15].

Если выполняется условие для ширины спектра $\Delta\nu|\tau| \ll 1$, тогда с достаточно хорошим приближением можно считать, что $\tau = 0$ и положить $|\gamma_{12}(\tau)| \approx |\mu_{12}|$, где $\mu_{12} = \gamma_{12}(0) = \frac{\Gamma_{12}(0)}{\sqrt{I_1 I_2}}$ – комплексная степень когерентности в точках 1 и 2 [13–15]. Для того, чтобы можно было использовать формулы (4) для упрощения расчета при сохранении приемлемой точности вместо $\Gamma_{12}(0) = \Gamma_{12}$ лучше использовать Γ_{12}^2 . Тогда искомый параметр, который можно будет использовать для приближенной оценки усредненной степени пространственной когерентности будет иметь вид

$$W_{12} = (|\Gamma_{12}|^2 / \overline{|E(\mathbf{r}_1, t)|^2 |E(\mathbf{r}_2, t)|^2})^{1/2}.$$

Вектора $\mathbf{r}_1$ и $\mathbf{r}_2$ можно однозначно задать через вектор β_1 и точку z_1 , и, соответственно, вектор β_2 и точку z_2 , где вектора β_1 и β_2 лежат в плоскости, перпендикулярной оси z . Нас будет интересовать толщина слоя когерентности для случая $\beta_1 = \beta_2$. В этом случае можно получить

$$\begin{aligned} |\Gamma_{12}|^2 &= \int QR(\mathbf{k}_1, z_1, \mathbf{k}_2, z_2) R^*(\mathbf{k}'_1, z_1, \mathbf{k}'_2, z_2) \times \\ &\quad \times d^2 \mathbf{k}_1 d^2 \mathbf{k}'_1 d^2 \mathbf{k}_2 d^2 \mathbf{k}'_2, \\ \overline{|E(\mathbf{r}_1, t)|^2 |E(\mathbf{r}_2, t)|^2} &= \\ &= \int QR(\mathbf{k}_1, z_1, \mathbf{k}'_1, z_1) R^*(\mathbf{k}_2, z_2, \mathbf{k}'_2, z_2) \times \\ &\quad \times d^2 \mathbf{k}_1 d^2 \mathbf{k}'_1 d^2 \mathbf{k}_2 d^2 \mathbf{k}'_2, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Q &= \varepsilon(\mathbf{k}_1) \varepsilon^*(\mathbf{k}'_1) \varepsilon^*(\mathbf{k}_2) \varepsilon(\mathbf{k}'_2) \times \\ &\times \exp[-i(\mathbf{k}_1 \beta_1 - \mathbf{k}'_1 \beta_1 - \mathbf{k}_2 \beta_2 + \mathbf{k}'_2 \beta_2)], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R(\mathbf{k}, z, \mathbf{k}', z') &= \\ &= \int g(\omega) \exp[-i(k_z(\omega, \mathbf{k})z - k_z(\omega, \mathbf{k}')z')] d\omega. \end{aligned}$$

где $k_z(\omega, \mathbf{k})$ – проекция вектора $\mathbf{k}(\omega, \mathbf{k})$ на ось x . Используя формулы (3)–(4) в соотношениях (5), получим

$$\begin{aligned} \langle \Gamma_{12}^2 \rangle &= \left(\frac{8\pi I}{cn} \right)^2 (J_1 + J_2), \\ \overline{|E(\mathbf{r}_1, t)|^2 |E(\mathbf{r}_2, t)|^2} &= \left(\frac{8\pi I}{cn} \right)^2 (1 + J_3), \\ J_1 &= \int g(\mathbf{k}) g(\mathbf{k}') |R(\mathbf{k}, z_1, \mathbf{k}', z_2)|^2 d^2 \mathbf{k} d^2 \mathbf{k}', \\ J_2 &= \left| \int d^2 \mathbf{k} g(\omega) \exp(i\mathbf{k}(\beta_2 - \beta_1)) \times \right. \\ &\quad \times \left. \int d\omega g(\omega) [i\mathbf{k}_z(\omega, \mathbf{k})(z_2 - z_1)] \right|^2, \\ J_3 &= \int g(\mathbf{k}) g(\mathbf{k}') \exp[i(\mathbf{k} - \mathbf{k}')(\beta_2 - \beta_1)] R(\mathbf{k}, z_1, \mathbf{k}', z_1) R^*(\mathbf{k}, z_2, \mathbf{k}', z_2) d^2 \mathbf{k} d^2 \mathbf{k}'. \end{aligned}$$

Рассмотрим далее случай, когда $g(\omega)$ и $g_0(\mathbf{k}_0)$ имеют гауссову форму, а также выполнено условие $g_0(\mathbf{k}_0) = g_0(|\mathbf{k}_0|)$. Пусть $2k_g$ соответствует ширине $g_0(\mathbf{k}_0)$ на половине высоты, $2\theta_0$ – величина углового распределения луча E_0 . Обозначим $u = \frac{|\alpha|}{k_g} = \frac{\sin \chi}{\theta_0}$, $z_{1n} = z_1 \frac{\theta_0^2}{l_c}$, $l_c = \lambda_c^2 / \Delta\lambda$ – длина когерентности излучения, λ_c – средняя длина волны, $\Delta = z_2 - z_1$. Введем следующее обозначение

$$q = (\pi u z_{1n} / \ln 2 \cos^3 \chi)^2.$$

Тогда выражения для $J_{1,2,3}$ можно записать в следующем виде:

$$J_1 = \frac{1}{\sqrt{1+q}} \exp \left[-\frac{\pi^2 \Delta^2}{2 \ln 2 l_c^2 \cos^2 \chi (1+q)} \right],$$

$$J_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi \Delta}{\ln 2 l_c \cos \chi} \right)^2} \times$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{\pi^2}{2 \ln 2} \left[\frac{\Delta^2}{l_c^2 \cos^2 \chi} + \frac{(r_x - \Delta u g \chi)^2 + r_y^2}{(1 + (\pi \Delta / \ln 2 l_{cor} \cos \chi)^2) \pi^2 / \kappa_g^2} \right] \right\},$$

где r_x – проекция разности векторов $\beta_2 - \beta_1$ на ось x ; r_y – проекция разности векторов $\beta_2 - \beta_1$ на ось y ; l_c – длина продольной корреляции поля $E_0(\mathbf{r}, t)$.

Для случая $u = \frac{\sin \chi}{\theta_0} \ll 1$ имеем:

$$J_3 = \frac{1}{\sqrt{1+q_3}} \times$$

$$\times \exp \left\{ \frac{-\kappa_g^2}{2 \ln 2} \left[\frac{(r_x - \Delta u g \chi)^2}{1+q_3} + r_y^2 \right] \right\},$$

$$q_3 = (z_{1n}^2 + z_{2n}^2) (\pi u / \ln 2 \cos^3 \chi)^2,$$

$$W_{12} = \sqrt{\frac{J_1 + J_2}{1 + J_3}}.$$

При $|\beta_2 - \beta_1| \leq \frac{\pi}{k_g}$ получим, что $J_{2,3} \ll 1$ и $W_{12} \approx \sqrt{J_1}$. Из полученных результатов видно, в частности, что J_1 не зависит от разности векторов $\beta_2 - \beta_1$, кроме случая, когда $|\beta_2 - \beta_1| \leq \frac{\pi}{k_g}$. При данном приближении, когда $W_{12} \approx \sqrt{J_1}$, величину W_{12} можно рассматривать как функцию переменных Δ , z_1 , u . Тогда имеем

$$W_{12}(\Delta, z_1, u) = (1+q)^{-1/4},$$

$$W_{12}(\Delta, z_1, u) = W_{12}(0, z_1, u) \times$$

$$\times \exp \left[-\frac{\pi^2 \Delta^2}{4 \ln 2 l_c^2 \cos^2 \chi} W_{12}^4(0, z_1, u) \right].$$

Из полученного выражения, в частности, можно получить оценку толщины слоя когерентности на половине высоты:

$$\Delta_c = \frac{2\Delta}{l_c \cos \chi} = \frac{4 \ln 2 l_c}{\pi} \sqrt{1+q}.$$

Тогда можно оценить расстояние z_1 , на котором значение W_{12} уменьшается до заданного значения:

$$z_1 = \frac{\ln 2 \cos^3 \chi l_c}{\pi u \theta_0^2} \sqrt{W_{12}^{-4} - 1}.$$

Выполним с помощью полученных формул расчеты при следующих значениях основных параметров: $\lambda_c = 5 \cdot 10^{-5}$ см, $\Delta \lambda / \lambda_c = 0.2$, $2\theta_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ рад, $\cos \chi = 0.9$, $l_c = 10^{-3}$ см. Тогда для случая, когда $W_{12} = 0.9$, получим $z_1 = 3.6$ см, для $W_{12} = 0.6$ получим $z_1 = 12.6$ см. Таким образом, показано, что размер области, в которой сохраняется корреляция световых пучков, составляет несколько сантиметров, что на три порядка превышает длину когерентности, которая для рассматриваемого случая составляет порядка 10^{-3} см. Полученные результаты позволяют изучить возможность значительного увеличения области когерентного взаимодействия пересекающихся лучей в результате наклона их слоев когерентности таким образом, чтобы с помощью установки определенного значения угла их пересечения ψ можно было получить для них параллельность слоев когерентности. В этом случае снимаются ограничения на поперечный размер перекрывающихся лучей, который должен быть заметно меньше l_c / ψ , и становится возможным использовать всю область их перекрытия. Так, например, без применения наклона слоев когерентности в [11] при указанных параметрах лазерных пучков было бы невозможно получить обращения волнового фронта из-за слишком малого размера области когерентного взаимодействия.

ОБЩАЯ СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ АСИМПТОТИК АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

При решении рассмотренных выше задач возникает необходимость асимптотического исследования быстроосциллирующих интегралов в виде (1). Проблемы вычисления коротковолновых асимптотик таких интегралов возникают в задачах дифракции, распространения электромагнитных волн в ионосфере и магнитосфере Земли и планет, дифракции лазерного излучения на локальных неоднородностях среды и СВЧ-излучения на телах сложной формы, распространения электромагнитного импульса при радиолокации, распространения акустических, внутренних и поверхностных гравитаци-

онных волн в атмосфере и океане, сейсмических волн в земной коре. Практическое значение асимптотических методов не ограничивается вопросами теории волновой дифракции, так как аналогичные интегральные конструкции возникают также в задачах квантовой механики, например в физической кинематике и квантово-механической теории соударений. Задачи о распространении импульсов различной физической природы, в том числе оптического диапазона, в диспергирующих сложных средах постоянно возникают в различных областях физики в связи с расширением области применения дистанционного зондирования, неразрушающего контроля и т.д. Действительно в подавляющем большинстве реальных природных сред наблюдается дисперсия распространяющегося в ней сигнала. Исключением может являться случай однородной безграничной среды в пренебрежении потерями, в которой волновые возмущения описываются обычным волновым уравнением [16].

Однако дисперсия появляется, если учесть любой из следующих факторов: границы среды, где распространяются колебания; наличие неоднородности среды; релаксационные свойства среды. Для примера приведем простейшую постановку задачи об импульсе в диспергирующей среде. Пусть поле возмущений на полуоси $x \geq 0$ описывается уравнением: $LF(x, t) = 0$, $x > 0$, где L – некоторый линейный оператор.

Пусть некоторый источник излучения, расположенный в точке $x = 0$, создает первоначальный импульс: $F(0, t) = F_0(t)$ ($F_0(t) \equiv 0$, $t < 0$). Такая задача решается с определенными дополнительными условиями: $F(x, t) \equiv 0$, $t < 0$, т.е. до включения источника возмущения отсутствуют, и $F(x, t) \rightarrow 0$, $x \rightarrow \infty$, т.е. на бесконечности источники отсутствуют. Для ее решения удобно воспользоваться преобразованием Фурье

$$\Phi(x, \omega) = \int_0^\infty F(x, t) \exp(i\omega t) dt.$$

Уравнение для функции $\Phi(x, \omega)$ принимает вид (для оператора L второго порядка по x)

$$\left(a_0(\omega) + \frac{\partial^2 a_2}{\partial x^2}(\omega) \right) \Phi(x, \omega) = 0,$$

где $a_0(\omega)$, $a_2(\omega)$ – некоторые функции частоты, и его решение:

$$\Phi(x, \omega) = \Phi_0(\omega) \exp(iK(\omega)x),$$

где $K(\omega) = (a_1(\omega)/a_2(\omega))^{1/2}$. Тогда решение исходной задачи в интегральной форме имеет вид

$$F(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \Phi(x, \omega) \exp(-i\omega t + iK(\omega)x) d\omega,$$

где контур Γ проходит параллельно оси $\text{Re } \omega$ и лежит выше всех особенностей подынтегральной функции.

Однозначная ветвь корня $K(\omega)$ выбирается так, чтобы на контуре Γ было выполнено условие: $\text{Im } K(\omega) > 0$. В подавляющем большинстве физически интересных случаев этот интеграл невозможно вычислить аналитически. Однако можно найти его асимптотику при $x, t \rightarrow \infty$, $x/t = \text{const}$, для чего используется метод перевала [17]. Тогда рассмотрим аналитическое продолжение фазовой функции: $S(\omega) = K(\omega)x - \omega t$ в нижнюю полуплоскость. Обычно она имеет несколько точек ветвления, из которых для удобства исследования асимптотики проведем вертикально вниз разрезы в комплексной плоскости ω . Очевидно, что на листе с этими разрезами функция $S(\omega)$ однозначна. Довольно тонким вопросом является отбор тех точек перевала, т.е. решений уравнения $S'(\omega) = 0$, которые лежат на рассматриваемом листе, и изучение их движения при изменении параметра x/t . Наконец, нужно найти топологически корректную деформацию контура Γ , чтобы он «повис» на некоторых точках перевала и точках ветвления и проходил вблизи них по путям наискорейшего спуска. Если при деформировании контур пересекает полюса функции $\Phi_0(\omega)$, то к «вкладам» точек ветвления и перевала добавятся вычеты в этих полюсах. Вклад точки перевала ω_s , далекой от остальных точек перевала и других особых точек, вычисляется классическим методом перевала: после замены $\omega \rightarrow \tau$, такой что $S(\omega) - S(\omega_s) = -\tau^2$, внеэкспоненциальная функция разлагается в ряд и почленно интегрируется, первый член получающегося асимптотического ряда

$$\Phi(x, t) \approx \Phi_0(\omega_s) [-i2\pi S''(\omega_s)]^{-1/2} \exp[iS(\omega_s)].$$

Для грубой оценки точности метода перевала можно сравнить по порядку величины отношение второго члена ряда к первому ε , вычисляемому по формуле [17]

$$\varepsilon = \frac{1}{2i} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{3S^{IV}}{(S'')^2} - \frac{5(S''')^2}{(S'')^3} \right) + \frac{\Phi' S'''}{\Phi (S'')^2} / - \frac{\Phi''}{\Phi} \frac{1}{S''} \right] \bigg|_{\omega=\omega_s}.$$

В физических расчетах можно ограничиться формулой с первым членом асимптотического разложения, если значение ε мало. Если точка перевала ω_s лежит на действительной оси: ω_s и $K(\omega_s)$ действительны, то асимптотическая формула описывает часть импульса, близкую к синусоиде с локальной частотой ω_s , локальным волновым числом $K(\omega_s)$, локальной фазовой скоростью $\omega_s/K(\omega_s)$. Огибающая синусоиды движется со скоростью, которая равна $(K'(\omega_s))^{-1}$ – групповой скорости узкополосного пакета с центральной частотой ω_s , амплитуда огибающей убывает пропорционально $t^{-1/2}$. Если же ω_s комплексна, то наблюдается также экспоненциальный рост ($\text{Im} \omega_s > 0$) или экспоненциальное затухание ($\text{Im} \omega_s < 0$). В частности, если ω_s лежит на мнимой оси, то участок импульса локально похож на экспоненту.

Ситуация усложняется, если при изменении параметра x/t точка перевала ω_s сближается с другой точкой (точками) перевала или с какой-либо особенностью (полюсом, точкой ветвления) функции $\Phi_0(\omega)$. В этом случае описанный выше стандартный метод перевала неприменим, для исследования асимптотики импульса с помощью подходящей замены следует свести исходный интеграл к более сложным эталонным интегралам. Например, при слиянии двух точек перевала асимптотика интеграла выразится через функцию Эйри, при слиянии точки перевала и полюса – через интеграл Френеля и т.д. Важно отметить, что наиболее интересными с практической точки зрения являются именно локальные максимумы сигнала, а поле в окрестности этих максимумов как раз и описывается эталонными интегралами. Например, случай слияния трех точек перевала описывается функцией Пирси, популярной в теории особенностей. Однако нередко возникают физически интересные случаи, не являющиеся случаем «общего положения». Например, если две из трех сливающихся точек перевала движутся строго симметрично относительно третьей, то асимптотика соответствующего интеграла выражается через функцию Ханкеля [18].

Универсальный характер асимптотических методов расчета волновых импульсов можно дополнить некоторыми универсальными эвристическими условиями (критериями) применимости этих методов. Эти критерии обеспечивают внутренний контроль применимости использованных асимптотических методов, и в ряде случаев на основе сформулированных критериев удается оценивать волновые поля там, где данные методы неприменимы. Тем самым открываются широкие возможности анализа волновых картин в целом, что важно как для правильной постановки теоретических исследований, так и для проведения оценочных расчетов при экспериментальных или натурных измерениях волновых пакетов лазерного излучения. Особая роль данных методов обусловлена тем обстоятельством, что параметры реальных природных сред, как правило, известны приближенно, и попытки точного численного решения исходных уравнений, описывающих излучение и распространения волновых импульсов с использованием таких параметров, могут привести к потере точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе теоретически изучены статистические выражения, описывающие изменение степени когерентности широкополосного лазерного излучения с наклоненным слоем когерентности в однородной среде. Рассмотрен случай изменения пространственной когерентности пересекающихся широкополосных световых пучков с параллельными слоями когерентности. Дана оценка области когерентного взаимодействия для указанного случая, и определено, что степень когерентности диспергированного луча с расстоянием уменьшается заметно быстрее, чем в случае без использования дисперсионного элемента. В рамках использованных моделей получено, что нарушение когерентности при распространении светового пучка возрастает с ростом угла наклона слоев когерентности. Была также изучена возможность значительного увеличения области когерентного взаимодействия пересекающихся лучей в результате наклона их слоев когерентности таким образом, чтобы с помощью установки определенного значения угла их пересечения можно было получить для них параллельность слоев когерентности. В этом случае снимаются ограничения на поперечный размер перекрывающихся лучей и ста-

новится возможным использовать всю область их перекрытия.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания № FFGN-2024-0005 (В.В. Булатов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldin Y.A., Vasilev A.N., Lisovskiy A.S., Chernook V.I. Results of Barents Sea airborne lidar survey // Proc. SPIE., 2017. V. 6615, 66150E.
2. Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Stetter S., Horne J.K., Hunt G.L., Hillgruber N., Sigler M.F., Volenweider J.J. Airborne remote sensing of biological hot spot in the Southeastern Bering Sea // Remote Sensing, 2011. V. 3. P. 621–7626.
3. Coney A., Damzen M.J. High-energy diode-pumped alexandrite amplifier development with applications in satellite-based lidar // J. of Optical Society of America B: Optical Physics. 2021. V. 38. P. 209–216.
4. Булатов В.В., Пономарев А.Н. Развитие теоретического метода в области нелинейного взаимодействия широкополосных световых волн в сложных средах // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. № 3. С. 7–19.
5. Булатов В.В., Пономарев А.Н. О возможности улучшения качества изображения лазерной локации при дистанционном зондировании // Процессы в гео-средах, 2021. № 4(30). С. 1331–1336.
6. Bulatov V.V., Ponomarev A.N. About the possibility of improving the image quality of laser location in the process of remote sensing of the water surface // Processes in GeoMedia. Vol. VI, 2023. Springer Geology. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland. P. 277–285.
7. Smith G., Shardlow P.C., Damzen M.J. High-power near-diffraction-limited solid-state amplified spontaneous emission laser devices // Optics Letters, 2007. V. 32. P. 1911–1916.
8. Jayet B., Huignard J.-P., Ramaz F. Optical phase conjugation in Nd:YVO4 for acousto-optic detection in scattering media // Optics Letters, 2013. V. 38(8). P. 1256–1266.
9. Garmire E. Stimulated Brillouin Review: Invented 50 Years Ago and Applied Today // International Journal of Optics. 2018. Article ID 2459501.
10. Cronin-Golomb M., Fisher B., White Y.O., Yariv A. Theory and application of four-wave mixing in photorefractive media // IEEE J. of Quantum Electronics, 1984. V. 20(1). P. 12–28.
11. Odintsov V.I., Sokolova E.Yu., Krupenin A.I., Ponomarev A.N., Terehin R.I. FWM Broad-band optical Beams with tilted Coherence Layers // Proceedings SPIE. ICONO'95. Nonlinear Optical Interactions and Wave Dynamics, 1995. St. Petersburg, Russia. Published by SPIE. V. 2800. P. 247–253.
12. Okulov A.Y. Twisted speckle entities inside wave-front reversal mirrors // Physical Review A, 2009. V.80(1). P. 013837.
13. Born M., Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. Oxford: Cambridge University Press, 1999. 952 p.
14. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 494 с.
15. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.
16. Borovikov V.A., Kinber B.Ye. Geometrical theory of diffraction. London: IEE electromagnetic waves. Series 37, 1994. 390 p.
17. Borovikov V.A. Uniform stationary phase method. London: IEE electromagnetic waves. Series 40, 1994. 233 p.
18. Kravtsov Y., Orlov Y. Caustics, catastrophes, and wave fields. Berlin: Springer, 1999. 228 p.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 3, pp. 123–132

STATISTICAL APPROXIMATIONS IN STUDYING THE INTERACTION OF BROADBAND LASER RADIATION IN A COMPLEX ENVIRONMENT

V.V.Bulatov^{1,*}, A.N.Ponomarev^{2,**}

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russia

²Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow, 105005, Russia

* e-mail: internalwave@mail.ru

** e-mail: holodel@yandex.ru

Received April 21, 2024; revised April 21, 2024; accepted May 14, 2024

In this paper, statistical expressions describing the change in the degree of coherence of broadband laser radiation with an inclined coherence layer in a homogeneous medium are theoretically studied. The case of changes in the spa-

tial coherence of intersecting broadband light beams with parallel layers of coherence is considered. An assessment of the region of coherent interaction for this case is given, and it is determined that the degree of coherence of a dispersed beam decreases noticeably faster with distance than in the case without the use of a dispersive element. Within the framework of the models used, it was found that the violation of coherence during the propagation of a light beam increases with increasing angle of inclination of the coherence layers. The possibility of significantly increasing the area of coherent interaction of intersecting beams as a result of tilting their coherence layers in such a way that by setting a certain value of the angle of their intersection it was possible to obtain parallelism of the coherence layers for them was also studied. In this case, restrictions on the transverse size of the overlapping beams are removed and it becomes possible to use the entire area of their overlap. A general scheme for constructing the asymptotics of the obtained analytical solutions was outlined. It is shown that the universal nature of asymptotic methods for calculating wave impulses can be supplemented with some universal heuristic conditions and criteria for the applicability of these methods. These criteria provide internal control over the applicability of the asymptotic methods used, and in a number of cases, based on the formulated criteria, it is possible to evaluate wave fields where these methods are not applicable. This opens up wide possibilities for analyzing wave patterns as a whole, which is important both for the correct formulation of theoretical studies and for carrying out evaluation calculations during experimental or field measurements of wave packets of laser radiation.

Key words: wavefront reversal, broadband laser radiation, coherence, dispersive element, loop circuit.

REFERENCES

1. Goldin Y.A., Vasilev A.N., Lisovskiy A.S., Chernook V.I. Results of Barents Sea airborne lidar survey. *Proc. SPIE*, 2017. Vol. 6615. 66150E.
2. Churnside J.H., Brown E.D., Parker-Stetter S., Horne J.K., Hunt G.L., Hillgruber N., Sigler M.F., Volenweider J.J. Airborne remote sensing of biological hot spot in the Southeastern Bering Sea. *Remote Sensing*, 2011. Vol. 3. Pp. 621–7626.
3. Coney A., Damzen M.J. High-energy diode-pumped alexandrite amplifier development with applications in satellite-based lidar. *J. of Optical Society of America B: Optical Physics*, 2021. Vol. 38. Pp. 209–216.
4. Bulatov V.V., Ponomarev A.N. Razvitie teoreticheskogo metoda v oblasti nelinejnogo vzaimodejstviya shirokopolosnih svetovih voln v slozhnih sredah [The development of the theoretical method in nonlinear interaction of wideband light waves in complex media]. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*, 2021. Vol. 3. Pp. 7–19 (in Russian).
5. Bulatov V.V., Ponomarev A.N. O vozmozhnosti ululsheniya kachestva izobrazeniya lazernoj lokasii pri distansionnom zondirovanii [On the possibility of improving the quality of laser ranging images in remote sensing]. *Processi v Geosredah*, 2021. Vol. (30), Pp. 1331–1336 (in Russian).
6. Bulatov V.V., Ponomarev A.N. About the possibility of improving the image quality of laser location in the process of remote sensing of the water surface. *Processes in GeoMedia. Volume VI*, 2023. Springer Geology. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland. Pp. 277–285.
7. Smith G., Shardlow P.C., Damzen M.J. High-power near-diffraction-limited solid-state amplified spontaneous emission laser devices. *Optics Letters*, 2007. Vol. 32. Pp. 1911–1916.
8. Jayet B., Huignard J.-P., Ramaz F. *Optical Optics Letters*, 2013. Vol. 38(8). Pp. 1256–1266.
9. Garmire E. Stimulated Brillouin Review: Invented 50 Years Ago and Applied Today. *International J. of Optics*, 2018. Article ID 2459501.
10. Cronin-Golomb M., Fisher B., White Y.O., Yariv A. Theory and application of four-wave mixing in photorefractive media. *IEEE J. of Quantum Electronics*, 1984. Vol. 20(1). Pp. 12–28.
11. Odintsov V.I., Sokolova E.Yu., Krupenin A.I., Ponomarev A.N., Terehin R.I. FWM Broad-band optical Beams with tilted Coherence Layers. *Proceedings SPIE. ICONO'95. Nonlinear Optical Interactions and Wave Dynamics*. 1995. St. Petersburg, Russia. Published by SPIE. Vol. 2800. Pp. 247–253.
12. Okulov A.Y. Twisted speckle entities inside wave-front reversal mirrors. *Phys. Rev.* 2009, vol.80(1), pp.013837.
13. Born M., Wolf E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge University Press, 1999. 952 p.
14. Ritov S.M. *Vvedeniye v statisticheskuyu radoifiziku* [Introduction to statistical radiophysics]. Part 1. Moscow, Nauka Publ., 1976, 494 p.
15. Ahmanov S.A., Djakov Yu.E., Chirkin A.S. *Vvedeniye v statisticheskuyu radoifiziku I optiku* [Introduction to statistical radiophysics and optics]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 640 p.
16. Borovikov V.A., Kinber B.Ye. *Geometrical theory of diffraction*. London: IEE electromagnetic waves. Series 37, 1994, 390 p.
17. Borovikov V.A. *Uniform stationary phase method*. London: IEE electromagnetic waves. Series 40, 1994, 233 p.
18. Kravtsov Y., Orlov Y. *Caustics, catastrophes, and wave fields*. Berlin: Springer, 1999. 228 p.

УДК 621.039.553

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3 ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

М.С. Каплина^{1,2}*, Н.К. Калинина², Н.Ю. Марихин², В.С. Моисеев^{1,2}, О.И. Дреганов²

¹Дмитровградский инженерно-технологический институт, филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (Московский инженерно-физический институт), Дмитровград, 433511, Россия,

²АО «ГНЦ НИИАР» (Государственный научный центр – научно-исследовательский институт атомных реакторов), Дмитровград, Ульяновская область, 433510, Россия

*e-mail: marabond21@mail.ru

Поступила в редакцию: 04.03.2024

После доработки: 03.05.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

Одним из инновационных проектов реакторов IV поколения является высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, который способен вырабатывать тепло с температурой теплоносителя до 950–1000 °С, что позволяет получать водород и другие полезные продукты без выбросов CO₂. Отличительная особенность таких реакторов – использование микротвэлов, диспергированных в графитовой матрице – топливном компакте. Для промышленного внедрения высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов необходимо провести исследование надежности и работоспособности их компонентов. Поэтому одной из задач является исследование топливных компактов (ТК) с микросферическим топливом. Для решения этой задачи необходимо провести реакторные испытания и послереакторные исследования топливных компактов с микротвэлами. Для проведения реакторных испытаний ТК в среде гелия требуется разработать ампульное облучательное устройство, которое позволит производить отборы проб газовой среды из полостей с ТК для проведения анализа динамики выхода продуктов деления из микротвэлов. В работе представлено обоснование конструкции облучательного устройства для проведения реакторных испытаний топливных компактов с микросферическим топливом с возможностью оперативного анализа радиоизотопного состава газовой среды, в которой размещены топливные компакты, с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров.

Ключевые слова: микротвэл, топливный компакт, матричный графит, средняя плоскость активной зоны, микротвэлы, реактор СМ-3, сосуд Маринелли, продукты деления, реакторы IV поколения, атомная энерго-технологическая станция, облучательное устройство.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.329

EDN NTOWNG

ВВЕДЕНИЕ

Одним из инновационных проектов реакторов IV поколения является высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР), который способен вырабатывать тепло с температурой теплоносителя до 950–1000 °С, что позволяет получать водород и другие полезные продукты без выбросов CO₂. Отличительная особенность таких реакторов – использование микротвэлов (МТ), диспергированных в графитовой матрице – топливном компакте (ТК). ВТГР планируются к промышленному внедрению в 2030-х гг. [1]. Для этого необходимо провести исследование надежности и работоспо-

собности их компонентов¹. Поэтому одной из актуальных задач является исследование ТК с микросферическим топливом.

Для решения поставленной задачи необходимо проведение в исследовательском реакторе СМ-3 высокотемпературных испытаний ТК с микротвэлами, изготовленных по лабораторной

¹ Научный портал «Атомная энергия 2.0» (2008–2023) [Электронный ресурс]. Свидетельство о регистрации Эл № ФС 77-72853. Публикация № 11054 от 22 марта 2017 г. «Перспективы развития высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов» в рубрике «Технологии». – Режим доступа: в открытом доступе. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/technology/73919> (дата обращения: 16.01.2023).

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3 ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

технологии, в составе ампульных облучательных устройствах (ОУ) в среде гелия при температуре до 1300 °С для последующих материаловедческих исследований. Цель эксперимента – получение экспериментальных данных по радиационной стойкости ТК, подтверждающих принятые конструктивные и технологические решения и необходимых для обоснования работоспособности при эксплуатации в проектируемой атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с ВТГР. Задачей эксперимента также являлось определение длительности облучения в условиях, характерных для ВТГР, при которых будет обнаружено ускорение накопления дефектов в защитных слоях микротвэлов.

Для достижения поставленной цели были проведены нейтронно-физические, теплофизические и прочностные расчеты ОУ, разработана рабочая конструкторская документация на него.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОУ

Для получения экспериментальных данных по радиационной стойкости ТК, подтверждающих принятые конструктивные и технологические решения и необходимых для обоснования работоспособности ТК при эксплуатации в проектируемой атомной энерготехнологической станции, необходимо иметь возможность оперативного анализа радиоизотопного состава газовой среды, в которой размещены ТК (рис. 1). Поэтому необходимо, чтобы конструкция ОУ позволяла регулярно отбирать газовые пробы из полости ОУ, в которой размещены ТК, во время облучения и анализировать их состав с помощью полупроводниковых гамма-спектрометров². Реактор СМ-3 – исследовательский, мощность ТК и температура незначительно зависят от заранее неизвестной на длительный период фактической загрузки экспериментальных каналов РУ СМ-3. Так как максимальная температура ТК не должна превышать 1300 °С, необходима возможность регулирования температуры облучения ТК. Для изготовления ОУ были выбраны материалы, способные не терять

прочность при заданных температурах. Выполнены предварительный нейтронно-физический и одномерный теплофизический расчеты для определения максимальных температур элементов ОУ, подобраны размеры элементов ОУ, произведен прочностной расчет согласно Норм³ и определена конструкция ОУ [1].

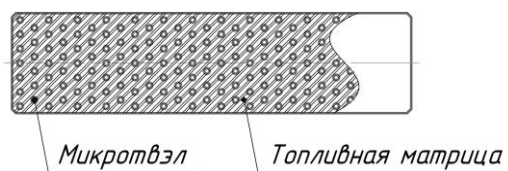


Рис. 1. Схема ТК

В ОУ, на уровне активной зоны (рабочий участок – рис. 2), размещаются три ампулы, в каждой из которых размещается по одной негерметичной капсуле с ТК (рис. 3).

В каждой капсуле размещены:

- три исследуемых ТК;
- один вспомогательный ТК – с центральным отверстием для ТЭП;
- графитовый фильтр.

К каждой капсуле с обеих сторон герметично приварены стальные трубки для продувки полости с ТК гелием марки 6.0.

Каждая капсула помещена в ампулу из нержавеющей стали. В ОУ установлены три ампулы, расположенные симметрично относительно центральной оси ОУ. Толщина корпуса ампулы – 1 мм, материал – сталь 12Х18Н10Т. Все ампулы имеют по одной трубке для контроля газовой среды в полости. Трубка для вакуумирования и заполнения ампулы гелием с внутренним диаметром 6 мм вварена в нижний фланец ампулы, внутри нее проходит трубка для подачи газа в полость капсулы. Полости ампул и капсул между собой не сообщаются. ОУ сконструировано таким образом, что трубки, соединяющие полости капсул с газовакуумным стендом, находятся либо внутри полости ампулы, либо внутри полости подвески. Таким образом, исключается контакт этих трубок с водой, т.е. при нарушении герметичности трубки в ОУ исключается попадание воды на топливные компакты.

² Атомная энергетика и состояние работ в области реакторных материалов ядерных [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://showslide.ru/atomnaya-ehnergetika-i-sostoyanie-rabot-v-oblasti-reaktornikh-materialov-yadernikh-65356> (дата обращения: 29.08.2023).

³ Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Пин АЭ Г-7-002-86.

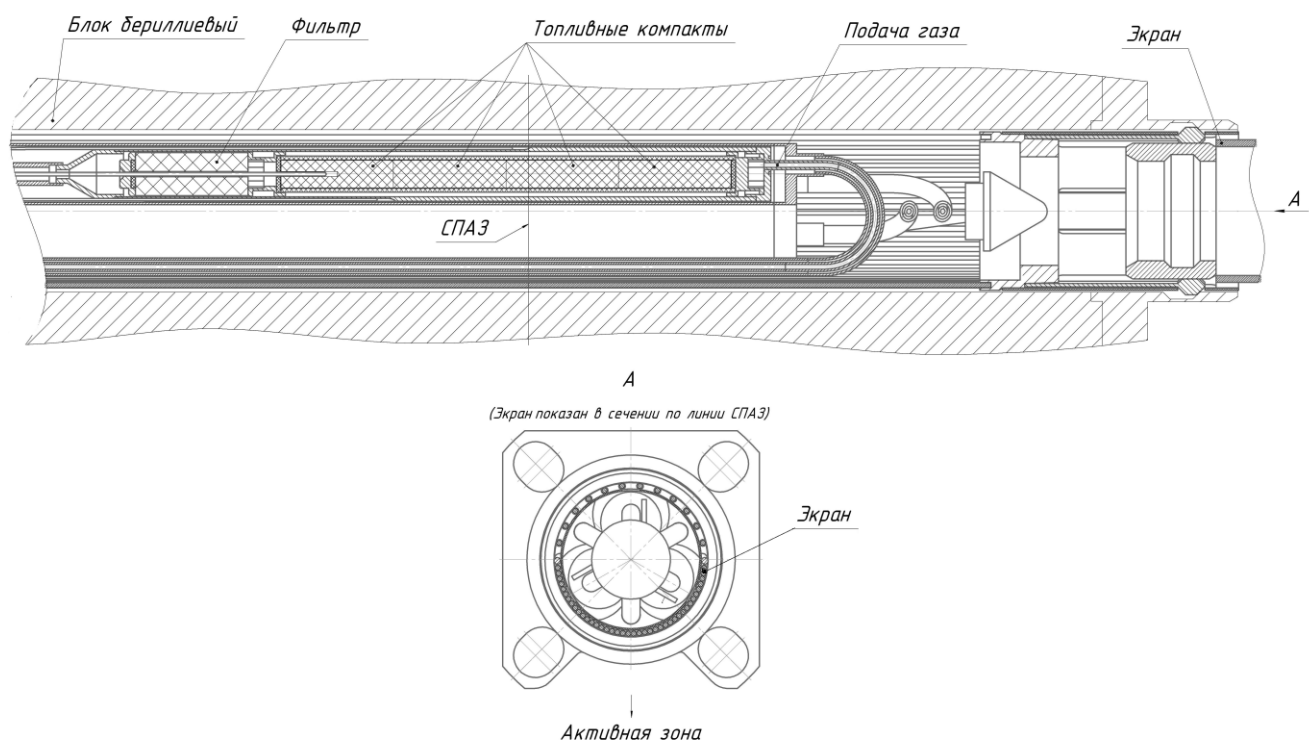


Рис. 2. Схема рабочего участка ОУ с исследуемыми ТК

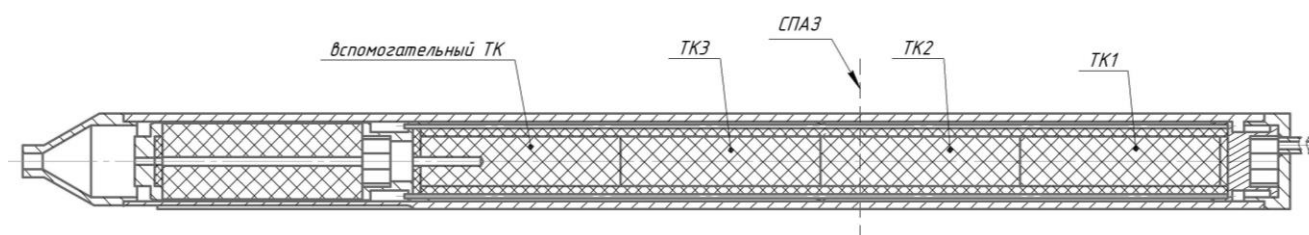


Рис. 3. Схема капсулы с ТК

В каждой ампуле (рис. 4) размещено три термоэлектрических преобразователя (ТЭП): один ТЭП градуировки ВР устанавливается в верхнем ТК, и два ТЭП градуировки ХА устанавливаются в наружных проточках корпуса капсулы.

В каждой капсуле размещены исследуемые ТК и графитовый фильтр из материала МПГ-6. ТК размещены друг над другом внутри графитовой обоймы из МПГ-6 цилиндрической формы. Для снижения потерь тепла графитовая обойма обернута танталовой фольгой. Обойма с ТК сверху и снизу дистанционируется от корпуса капсулы молибденовыми втулками.

Эксплуатационные характеристики ОУ:

– температура ТК при облучении – до 1300 °С;

– плотность потока быстрых ($E \geq 0.1$ МэВ) нейтронов – до $9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$;

– среда в ампулах – гелий при давлении до 0.5 МПа;

– среда в капсулах – гелий при давлении 0.12 ± 0.02 МПа;

– среда в полости подвески – гелий при давлении до 0.5 МПа;

– максимальная мощность топливного компакта – до 0.43 кВт;

– длительность облучения – до 400 эффективных суток.

Снаружи ОУ, на уровне активной зоны, размещается экран из гафниевого проволоки, предназначенный для формирования потока нейтронов, обеспечивающего условия облучения ТК (см. рис. 2).

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3 ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

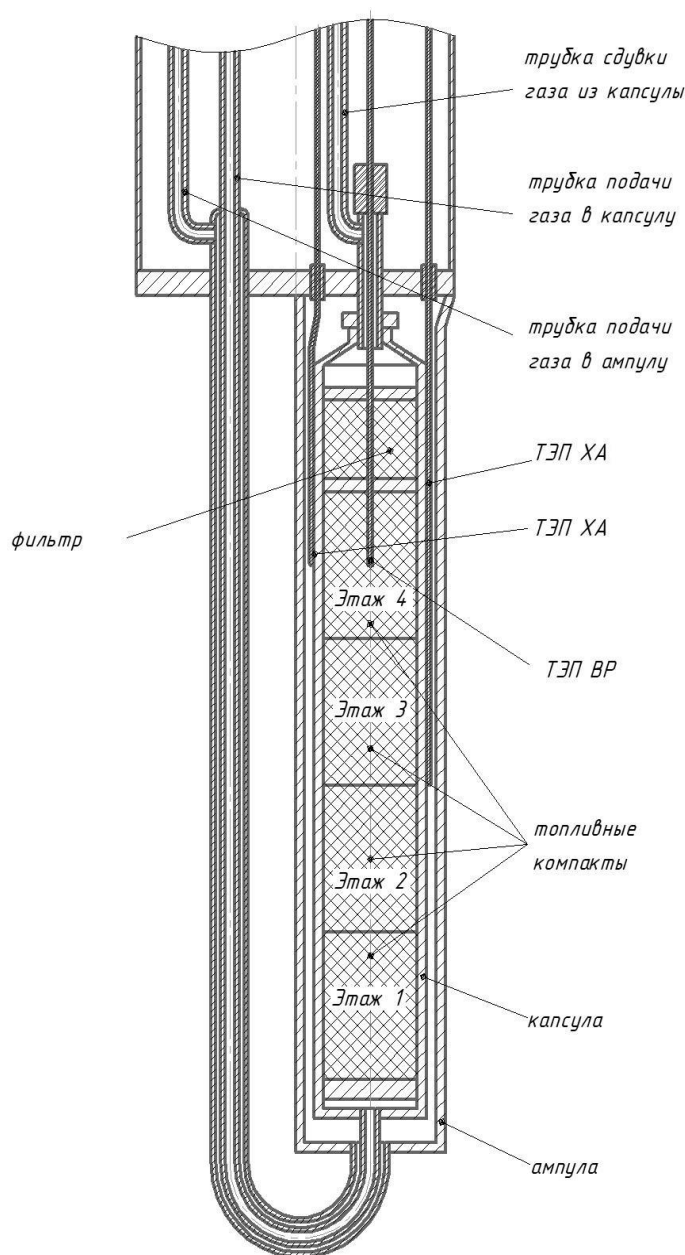


Рис. 4. Схема ампулы ОУ

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОУ

Для обоснования конструкции облучательного устройства были получены энерговыделения в образцах и элементах ОУ по результатам нейтронно-физических расчетов с учетом радиально-азимутального и высотного неравномерностей распределения энерговыделения. На рис. 5 показана картограмма активной зоны реактора СМ-3. Для расчета использовался имитатор IMCOR_SM [2], созданный на базе прецизионной программы MCU-RR [3], реализующий

алгоритм решения уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло. За основу брались средние выгорания топлива в ТВС в кампаниях реактора СМ-3 в 2020 г. Результаты нейтронно-физических расчетов представлены на рис. 6.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОУ

Построение расчетной модели выполнено в системе автоматизированного проектирования SolidWorks. Расчет проводился во встроенном в SolidWorks программном обеспечении Flow Simulation⁴, с учетом аксиальных потоков тепла и теплообмена излучением между элементами конструкции ОУ. В процессе оценки распределения температуры учитывалась зависимость свойств материалов от температуры. Такой подход позволил корректно смоделировать конструкцию ОУ и обеспечить требуемые условия облучения ТК.

Тепло, генерируемое в образцах и элементах конструкции облучательного устройства, снимается за счет охлаждения внешней стенки ампулы водой первого контура реактора.

Исходные данные и граничные условия:

- коэффициенты теплопроводности молибдена, тантала и стали 12Х18Н10Т взяты из [4];
 - коэффициент теплопроводности графита принят 30 Вт/(м·К) ;
 - теплофизические свойства газообразного гелия взяты из [5];
 - коэффициент теплоотдачи на поверхности канала – $10 \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}$;
 - температура воды реактора – 50°C ;
- объемное энерговыделение в элементах конструкции и топливных компактах задано по результатам нейтронно-физического расчета.

Так как при высоких температурах имеет место теплообмен излучением, а у графита высокая степень черноты [4], максимальная температура ТК, согласно расчету, не превышала $\sim 1010^\circ \text{C}$. Наличие танталовой фольги с низкой степенью черноты позволяет получить нужную максимальную температуру ТК.

Толщина танталовой фольги была принята 50 мкм , так как она была в наличии.

⁴ 3D CAD Design Software| SolidWorks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата обращения: 20.05.2023).

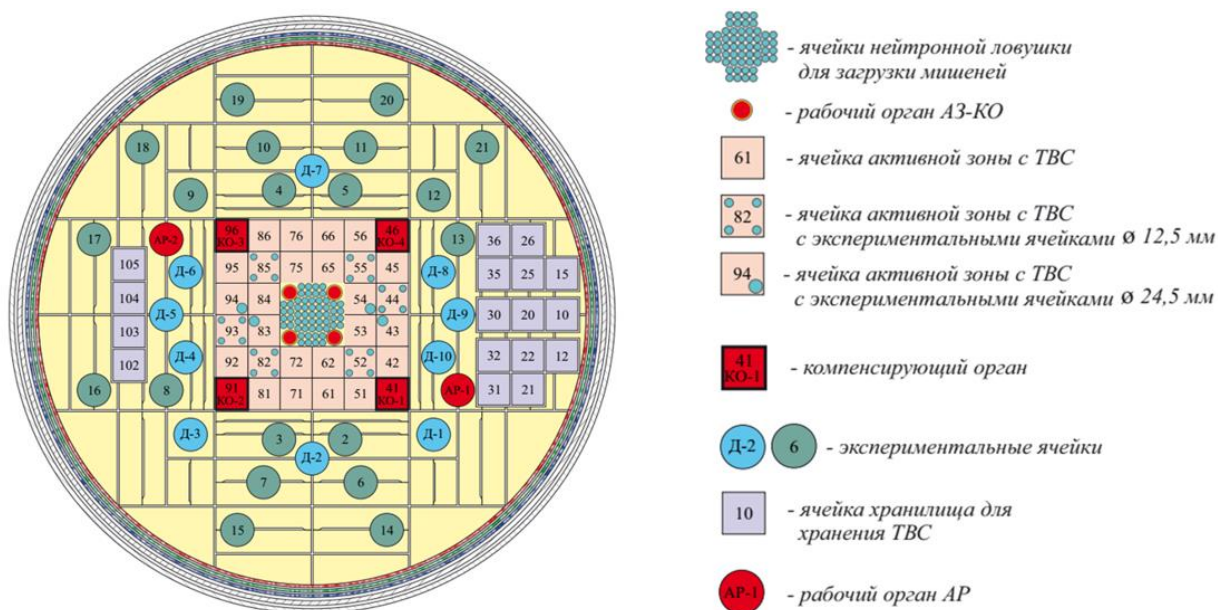


Рис. 5. Картограмма активной зоны реактора СМ-3

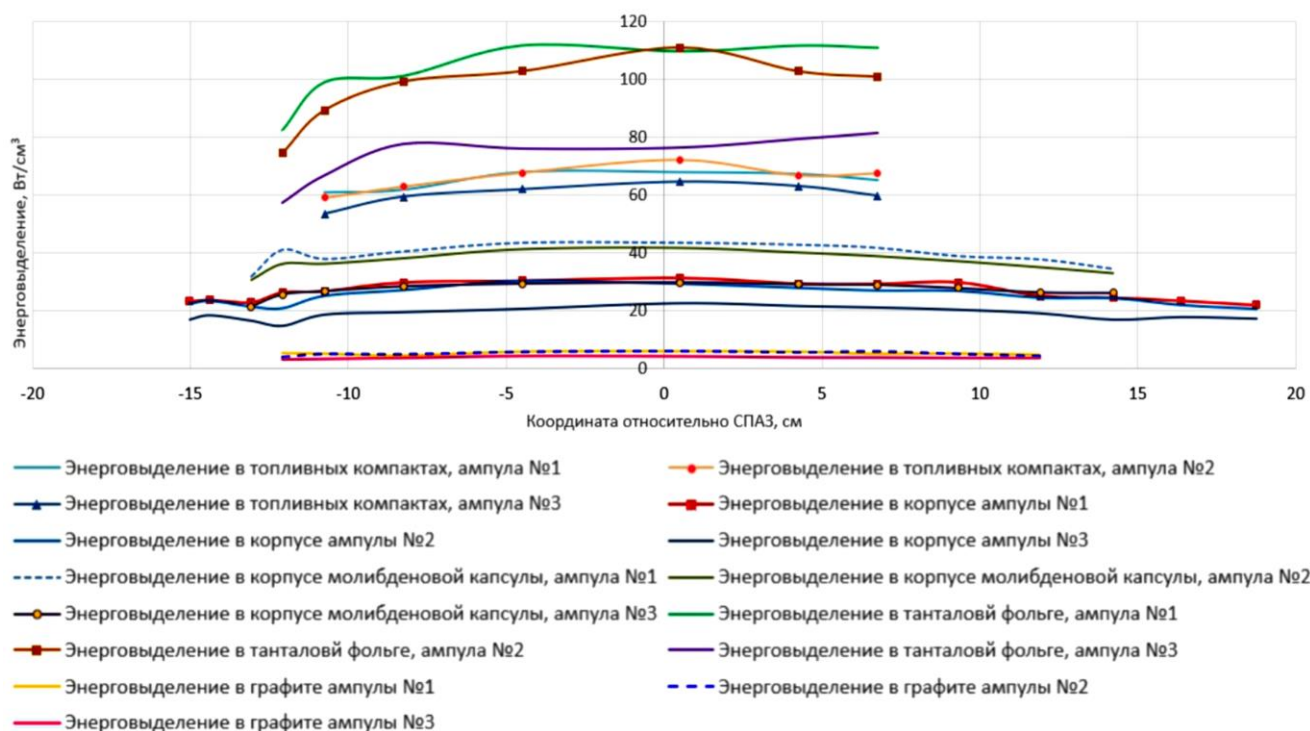


Рис. 6. Распределение энерговыделения в ТК и элементах конструкции по высоте

Размеры корпуса ампулы и корпуса капсулы были приняты $\varnothing 27 \times 1$ мм и $\varnothing 24 \times 2$ мм, соответственно, исходя из предварительных одномерных теплофизических расчетов, и на их основе прочностных расчетов согласно Норм⁵. Данные расчеты показали, что при максимальных расчетных температурах корпуса сохраняют проч-

⁵ Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Пин АЭ Г-7-002-86.

ность и жесткость в заданных условиях облучения.

В результате проведенных расчетов определены диаметр и толщина графитовой обоймы $\varnothing 16 \times 1,75$ мм и величины зазоров: между корпусами ампулы и капсулы — 0,5 мм, между корпусом из жаропрочной стали и фольгой из тантала — 1,95 мм.

Радиальное распределение температуры внутри ампулы на уровне средней плоскости активной зоны (СПАЗ) представлено на рис. 7 и

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

9 [1]. Перепад температуры на уровне СПАЗ в гелиевом зазоре между корпусами стальной ампулы и капсулы величиной 0.5 мм составляет 357 °С, а перепад температуры в гелиевом зазоре между корпусом молибденовой капсулы и

фольгой из тантала величиной 1.95 мм составляет 671 °С. Распределение температуры по высоте капсулы, относительно уровня СПАЗ, представлено на рис. 8 и 10.

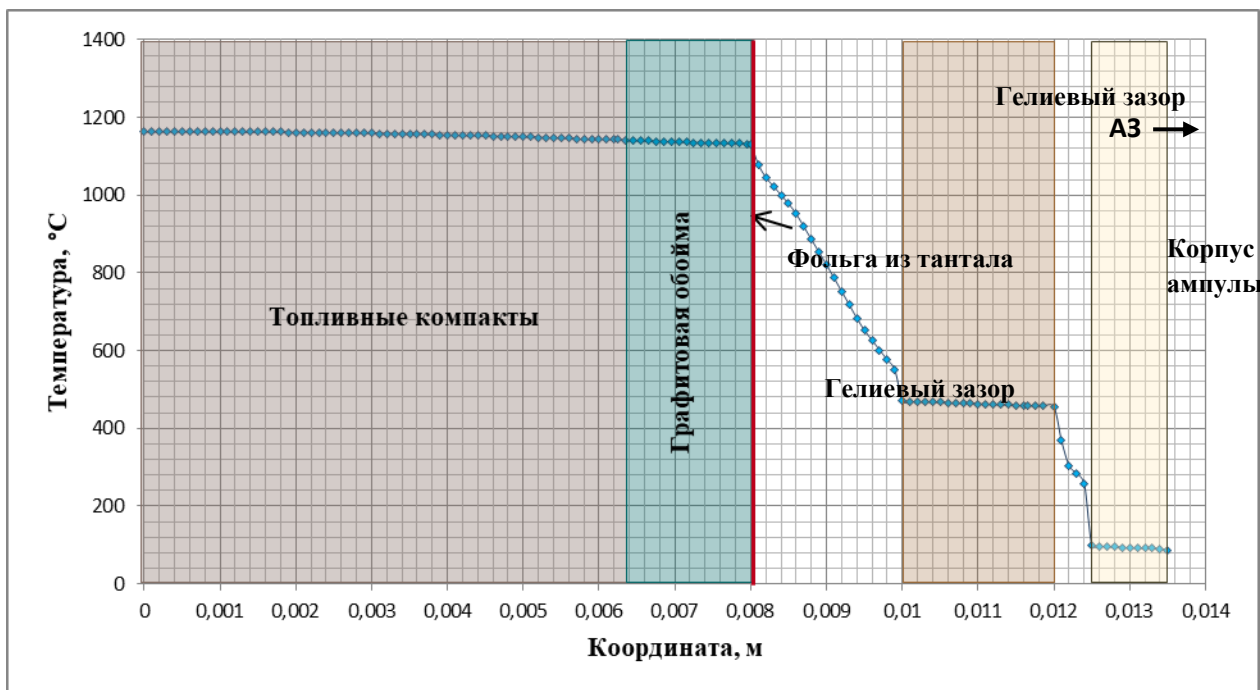


Рис. 7. Радиальный профиль температуры на уровне СПАЗ

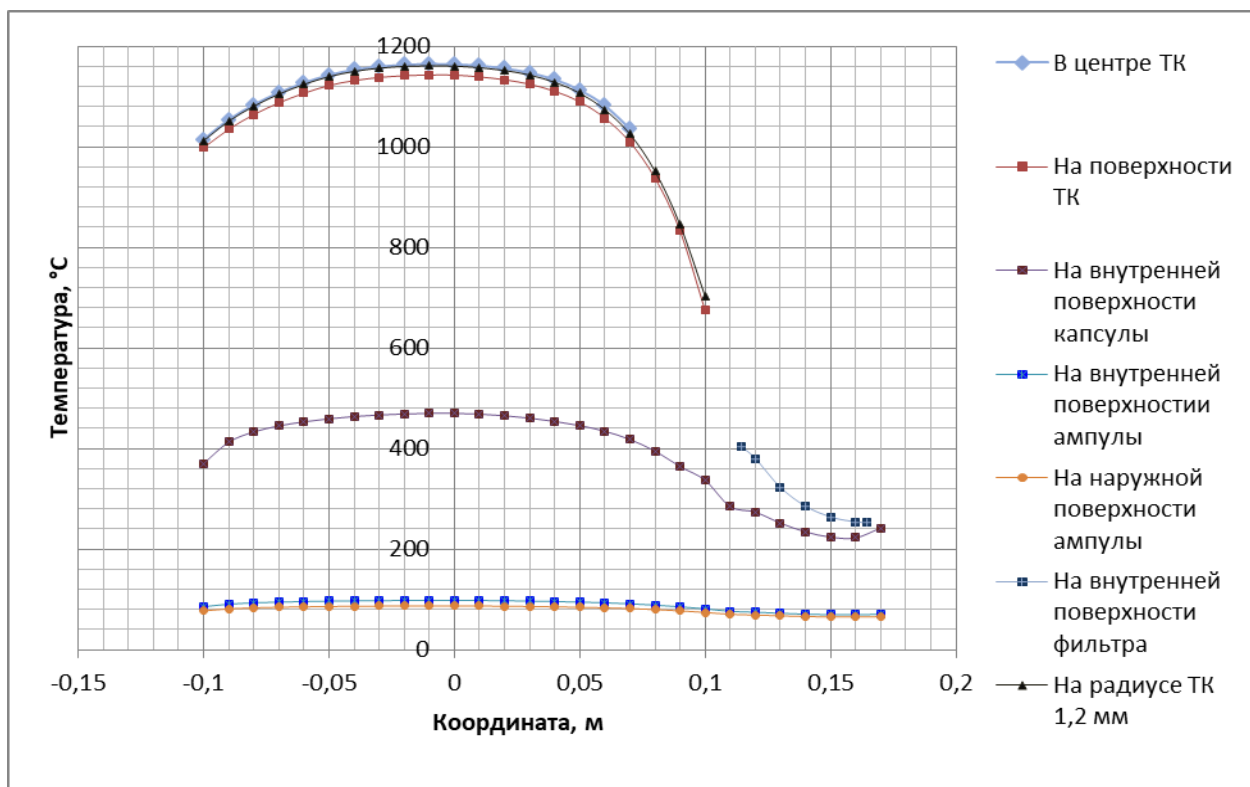


Рис. 8. Распределение температуры по высоте в элементах ОУ на конец кампании реактора

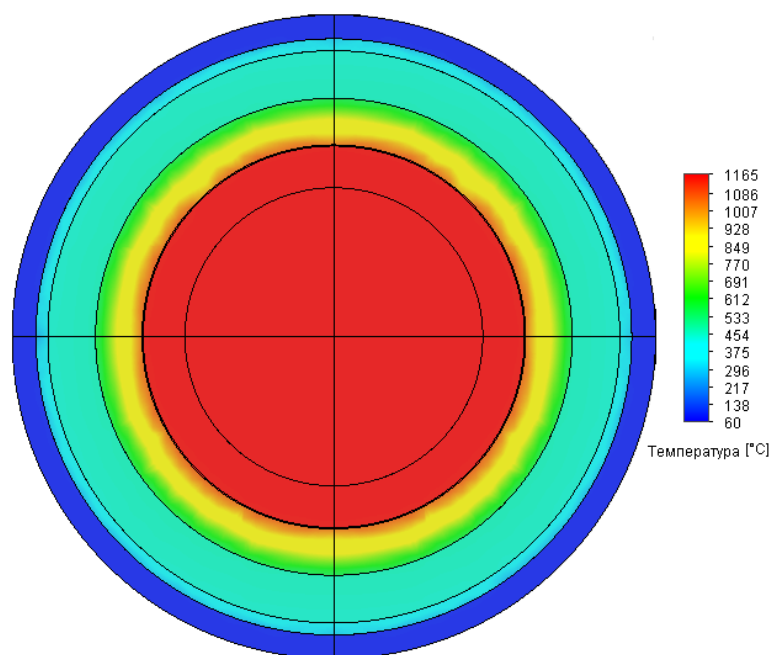


Рис. 9. Распределение температуры в ампуле на уровне СПАЗ

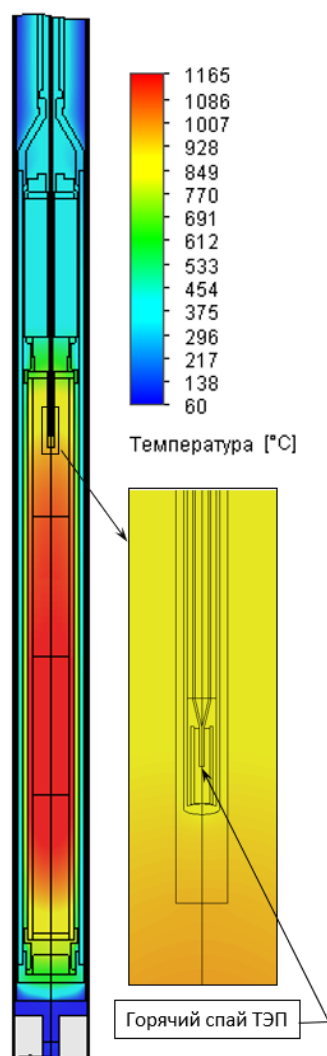


Рис. 10. Распределение температуры по высоте капсулы

В результате проведенного предварительного теплофизического расчета видно, что расчетная температура облучения ТК находится в диапазоне 700–1165 °С, это связано с неравномерным по высоте распределением энерговыделения. Так как температура ТК не должна превышать 1300 °С, а максимальная расчетная температура облучения ТК составляет 1165 °С, во время проведения испытаний будет запас повышения температуры в случае фактической загрузки экспериментальных каналов РУ СМ-3, при которой мощность ТК и энерговыделения в конструкционных материалах окажутся выше предварительно рассчитанных. Повысить температуру ТК возможно понижением давления в полости ампулы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований была выбрана конструкция ОУ для проведения реакторных испытаний ТК, проведены предварительные нейтронно-физические, теплофизические и прочностные расчеты конструкции ОУ. По результатам проведенных нейтронно-физических, теплофизических и прочностных расчетов определены: размеры гафниевого экрана и необходимое количество проволочек для его изготовления, подобраны материалы и определены размеры конструктивных элементов ОУ, при которых температура ТК на протяжении всего периода реакторных испытаний не превышала 1300 °С, а мощность каждого ТК не превышала

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
МИКРОСФЕРИЧЕСКОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ СМ-3
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЫХОДА ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

430 Вт. Изготовлено два ампульных ОУ, предназначенных для проведения испытаний в ячейках отражателя № 6 и 7 реактора СМ-3, предназначенных для разной длительности облучения. Каждое ОУ имело в своем составе по три герметичных капсулы с ТК. Во время испытаний периодически проводились отборы проб газовой среды из капсул с ТК для обнаружения вышедших за пределы защитных покрытий МТ продуктов деления топлива. После завершения облучения в составе ОУ, ТК были направлены на послереакторные материаловедческие исследования.

В результате реакторных испытаний и послереакторных исследований были получены данные о вышедших за пределы покрытий МТ продукты деления топлива в процессе облучения ТК в условиях ВТГР, был проведен анализ работоспособности МТ и подтверждена их герметичность во время эксплуатации.

С использованием результатов выполненной работы был разработан и обоснован технический проект реакторной установки ВТГР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономарёв-Степной Н.Н. Атомно-водородная энергетика // Вестник Российской академии наук, 2021. Т. 91. № 5. С. 484–498.

2. Каплина М.С., Калинина Н.К., Марихин Н.Ю., Громов М.О., Головкин Г.А., Нагайцев В.Г., Филимонов А.Е., Моисеев В.С., Дреганов О.И. Исследование выхода газообразных продуктов деления из топливных компактов. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» (отчет об основных исследовательских работах, выполненных в 2022 г.) / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Калыгина. Дмитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2023. 296 с.

3. Марихин Н.Ю. Комплекс программных средств на базе прецизионного кода для расчетов нейтронно-физических параметров эксплуатации реактора СМ: Диссертация... канд. физ.-мат. наук. Дмитровград, 2011. 135 с.

4. Гомин Е.А. Статус МСУ-4 // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика ядерных реакторов», 2006. Вып. 1. С. 6–32.

5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: АТОМИЗДАТ, 1968. 484 с.

6. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: учебное справочное пособие для студентов / Под общ. ред. проф. П.Л. Кириллова; 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИздАт, 2007. 200 с.

7. Каплина М.С., Калинина Н.К., Ильиных Г.А., Марихин Н.Ю., Моисеев В.С. Теплофизический расчет облучательного устройства для облучения топливных компактов в реакторе СМ-3 // Сборник докладов XXII Международной конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам 13–14 апреля 2022 г. Подольск: АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2022. С. 256–263.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 3, pp. 133–141

DESIGN-BASIS JUSTIFICATION OF AN IRRADIATION RIG DESIGN
TO TEST MICRO-SPHERICAL FUEL IN THE SM-3 REACTOR TO DETERMINE
THE FISSION GAS RELEASE

M.S. Kaplina^{1,2,*}, N.K. Kalinina², N.Yu. Marikhin², V.S. Moiseyev^{1,2}, O.I. Dreganov²

¹Dimitrovgrad Engineering and Technology Institute-branch of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering and Physics Institute), Dimitrovgrad, 433511, Russia,

²JSC «SSC RIAR» (State Scientific Center - Research Institute nuclear reactors),
Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, 433510, Russia

*e-mail: marabond21@mail.ru

Received March 04, 2024; revised May 03, 2024; accepted May 14, 2024

One of the innovative projects of Gen- IV reactors is a high-temperature gas-cooled reactor able to generate heat with a coolant temperature of up to 950–1000 °C, which makes it possible to produce hydrogen and other useful products without CO₂ emissions. A distinctive feature of such reactors is the use of micro fuel rods dispersed in a graphite matrix, a fuel compact (FC). The commercialization of high-temperature gas-cooled reactors requires the

reliability and performance of their components to be confirmed. Therefore, one of the tasks is to study fuel compacts with micro-spherical fuel (MF). To address this task, reactor tests and post-irradiation examinations of fuel compacts with micro fuel rods shall be performed. To test fuel compacts in a helium environment, a capsule-type irradiation rig shall be designed that allows sampling of the gas environment from cavities with fuel compacts to analyze the FGR dynamics. The paper presents a rationale for the irradiation rig (IR) design to conduct reactor tests of fuel compacts with micro-spherical fuel with the possibility of real-time analysis of the radioisotope composition of the gas environment where the fuel compacts are located using semiconductor gamma spectrometers.

Key words: micro fuel rod, fuel compact (FC), matrix graphite, core mid-plane (CMP), micro-spherical fuel (MF), reactor SM-3, Marinelli vessel, fission gas, Gen- IV reactors, nuclear power engineering plant (NPEP).

REFERENCES

1. *Ponomarev-Stepnoy N.N.* Atomno-vodorodnaya energetika [Atomic-hydrogen energy]. Vestnik Rossijskoj akademii nauk Atomno-vodorodnaya energetika, 2021. Vol. 91. No. 5. Pp. 484–498 (in Russian).
2. *Kaplina M.S., Kalinina N.K., Marikhin N.Yu., Gromov M.O., Golovko G.A., Nagaitsev V.G., Filimonov A.E., Moiseev V.S., Dreganov O.I.* Issledovanie vyhoda gazoobraznykh produktov deleniya iz toplivnykh kompaktoy. [Study of fission gas release from fuel compacts]. Nauchnyj godovoj otchet AO “GNC NIIAR” (otchet ob osnovnykh issledovatel'skikh rabotakh, vypolnennykh v 2022 g.) / Pod obshchej red. d-ra tekhn. nauk, prof. V.V. Kalygina. [Scientific Annual Report of RIAR JSC (Report on the main research activities performed in 2022) / under the ed. of Prof. V.V. Kalygin]. Dimitrovgrad, RIAR JSC, Publ., 2023. 296 p. (in Russian).
3. *Marikhin N.Yu.* Kompleks programmnykh sredstv na baze precizionnogo koda dlya raschetov nejtronno-fizicheskikh parametrov ekspluatatsii reaktora SM. Diss. k.fiz.-mat. nauk [A set of software tools based on a precision code for calculating the neutronic parameters of the SM reactor operation. PhD Thesis in Physics and Mathematics]. Dimitrovgrad, 2011. 135 p.
4. *Gomin E.A.* Status MCU-4 [MCU-4 status]. Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya «Fizika yadernykh reaktorov», 2006. Iss. 1. Pp. 6–32 (in Russian).
5. *Chirkin V.S.* Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoj tekhniki [Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968. 484 p.
6. *Kirillov P.L., Terentyeva M.I., Deniskina N.B.* Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoj tekhniki: uchebnoe spravocnoe posobie dlya studentov / Pod obsh. red. prof. P.L. Kirillova. [Thermophysical Properties of Nuclear Engineering Materials: Educational Reference Guide for Students / Under the general. ed. prof. P.L. Kirillova]. Moscow, IzdAt Publ., 2007. 200 p.
7. *Kaplina M.S., Kalinina N.K., Ilinykh G.A., Marikhin N.Yu., Moiseyev V.S.* Teplofizicheskij raschet obluchatel'nogo ustrojstva dlya oblucheniya toplivnykh kompaktoy v reaktore SM-3 [Thermophysical Calculation of An Irradiation Device for Irradiating Fuel Compacts in the SM-3 Reactor]. Sbornik dokladov XXII Mezhdunarodnoj konferencii molodykh specialistov po yadernym energeticheskim ustanovkam 13-14 aprelya 2022 g. [Proc. of the XXII International Conference of Young Specialists on Nuclear Power Plants April 13–14, 2022]. Podolsk, JSC OKB «GIDROPRESS» Publ., 2022. Pp. 256–263 (in Russian).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

М.Ю. Горский^{1,*}, Е.Н. Симчук^{1,**}, А.В. Бочкарев^{2,***}

¹Автономная некоммерческая организация «НИИ ТСК», Москва, 111024, Россия

²Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, 410054, Россия

*e-mail: gorskiy@niitsk.ru

**e-mail: simchuk@niitsk.ru

***e-mail: ab2009sar@list.ru

Поступила в редакцию: 20.04.2024

После доработки: 20.04.2024

Принята к публикации: 02.05.2024

В статье приведены результаты моделирования температурных полей в многослойной дорожной одежде по результатам мониторинга на эксплуатируемой автомобильной дороге. Актуальность работы обусловлена высоким влиянием температуры на модули упругости асфальтобетона и, как следствие, на результаты испытаний по оценке прочности дорожных одежд, выполняемых в различных температурных условиях. В ходе исследований выполнен анализ данных, накопленных в течение длительного времени со станции температурного мониторинга, заложенной во время строительства автомобильной дороги. Предложена методика, основанная на решении задачи теплопроводности для каждого связного слоя дорожной одежды, принимающая во внимание непрерывность температуры и плотности теплового потока при переходе через межслойные границы, которая позволяет определить температурное поле в первом слое при неизвестной температуре на поверхности и уточнить механические и теплофизические параметры остальных слоев. Проведен анализ степени неоднородности распределения температуры по слоям в различные периоды года, допускающие проведение прочностных испытаний. Намечены направления дальнейших исследований по актуализации полученных методик с учетом применения современных типов асфальтобетонов в конструкциях дорожных одежд.

Ключевые слова: многослойные дорожные одежды, уравнение теплопроводности, оптимизация, определение теплофизических свойств, статистический анализ.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.315

EDN OAIIVDR

ВВЕДЕНИЕ

Своевременное получение полной, объективной и достоверной информации о транспортно-эксплуатационном состоянии и изменении условий работы является основной целью диагностики и мониторинга автомобильных дорог [1]. С учетом постоянно повышающихся транспортных нагрузок на автомобильные дороги, вопросы оценки их прочности постепенно выходят на первый план, наряду с определением продольной ровности, колеиности и наличия дефектов покрытия. Это обусловлено тем, что снижение параметров указанных показателей напрямую является следствием недостаточной прочности конструкций. Достоверная информация о прочности также позволяет принимать оптимальные решения о необходимости уси-

ния существующих конструкций или строительстве более капитальных дорожных одежд.

Наиболее широко применяемыми способами оценки прочности дорожных одежд являются испытания с использованием установок динамического нагружения (УДН). В отечественной практике методики испытаний регламентируются межгосударственным [2] и национальным стандартами [3]. При этом испытания позволяют оценить не только общую прочность конструкции, но и состояние отдельных нижележащих конструктивных слоев. Для практического достижения указанных целей используется решение обратной задачи по определению упругих параметров слоев дорожной одежды [4–9]. Математическая сложность решения обратной задачи заключается в высокой чувствительности результатов расчета к малым измене-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

ниям входных параметров. Одной из причин изменчивости входных параметров является сильная зависимость модуля упругости асфальтобетона от температуры и времени приложения нагрузки [10]. Причем если время приложения нагрузки при испытании задается измерительной установкой и является относительно стабильным параметром, то температуры асфальтобетона изменяются в широком диапазоне и зависят от множества таких факторов как время года, время суток, температура окружающего воздуха, солнечная активность, расположение участка автомобильной дороги на местности (наличия открытых или затененных мест) и т.д. Как показывают лабораторные исследования [10], модули упругости асфальтобетона с повышением температуры материала с 0 до 20 °С снижаются в 3–4 раза, а при повышении температуры до 40 °С, снижение модуля достигает 15 раз и более.

Практические измерения температуры на различных глубинах часто выявляют значительный температурный градиент [11], между тем в существующих методиках обратного расчета температура асфальтобетона принимается одинаковой по всей толщине. Второй важной проблематикой в учете температурных факторов является проведение температурной коррекции в условиях, когда значительная часть данных от УДН получена при больших температурных градиентах.

Цель настоящего исследования – с использованием данных, собранных с устройства температурного мониторинга, провести моделирование процессов вертикального теплопереноса в слоях дорожной одежды и затем при помощи статистической обработки результатов моделирования выявить наиболее вероятные распределения температур по толщине в зависимости от даты/времени суток обследования. Результаты настоящего исследования необходимы: 1) для оценки погрешности обратного расчета упругих параметров дорожных одежд, которая вносится заменой реального распределения температур на усредненное распределение; 2) для совершенствования методики температурной коррекции, в процессе которой упругие параметры асфальтобетонных слоев приводятся к нормативной температуре.

ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В качестве источника экспериментальных данных в данном исследовании использовались

показания одной из станций удаленного мониторинга состояния дорожной одежды, установленной в 2018 г. на автомобильной дороге М-11 «Нева» Москва – Санкт-Петербург. Станция оснащена шестью датчиками температур, установленными на границах между слоями дорожной одежды и в глубине земляного полотна, и в исправном состоянии непрерывно передает показания этих датчиков с интервалом примерно в 30 мин. Согласно проектной документации, слои дорожной одежды, сверху вниз: щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-20 (6 см), плотный крупнозернистый асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (8 см), пористый крупнозернистый асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (15 см), щебеночная смесь (48 см) и песок мелкий (60 см) поверх существующего земляного полотна (рис. 1). Таким образом, связные слои, распределение температуры по глубине которых необходимо установить, включают три слоя общей проектной толщиной 29 см.

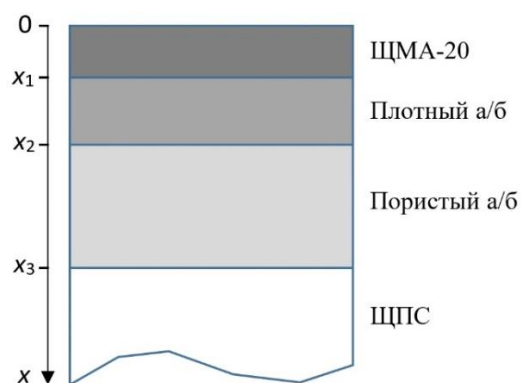


Рис. 1. Структура дорожной одежды

Временные ряды, сформированные показаниями датчиков температуры, обладают определенными недостатками.

1. 30-минутный интервал измерений поддерживается нестрого, что связано, по всей видимости, с особенностями передачи информации по стандарту GSM. В последовательности моментов времени измерений за три года функционирования станции с июня 2018 г. по август 2021 г. присутствуют как кратковременные пропуски от 1 ч, так и длительные, вплоть до нескольких месяцев, связанные с выходом из строя аккумуляторных батарей.

2. Ограниченная точность измерения температуры, равная 0.1 °С, придает графикам зависимости температуры от времени характерный пилообразный вид, что затрудняет надежное вычисление тепловых потоков на межслойных границах при малых вариациях температуры.

Первый недостаток устранить не сложно: в данных мониторинга за три года обнаруживается промежуток практически непрерывных изменений с января по декабрь 2019 г., который был пересчитан при помощи линейной интерполяции для множества равноотстоящих моментов времени с шагом ровно 30 мин.

Второй недостаток может быть, на первый взгляд, легко устранен любым методом сглаживания кривых, например методом скользящего среднего – но степень сглаживания требует теоретического обоснования.

Для упрощения обоснования слои дорожной одежды принимаются однородными, неограниченными в горизонтальной плоскости и имеющими постоянную толщину. В таких предположениях распространение тепла от поверхности дорожной одежды, температура которой определяется погодными условиями, в направлении земляного полотна может моделироваться при помощи уравнения линейной теплопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где u – температура; t – время; x – координата, отсчитываемая по вертикали вниз от поверхности дорожной одежды; $a^2 = \lambda / (c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, зависящий от коэффициента теплопроводности λ , удельной теплоемкости c и плотности ρ вещества.

Уравнение (1) имеет известное частное решение, описывающее распространение гармонической тепловой волны вглубь полубесконечного однородного полупространства $x \geq 0$:

$$u(x, t) = e^{-\alpha x} \sin(kx - 2\pi \nu t), \quad (2)$$

в котором коэффициент затухания α , волновое число k и частота ν связаны соотношениями

$$\alpha = k, \quad \pi \nu = a^2 k^2. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что по мере распространения вглубь полупространства амплитуда гармонической волны экспоненциально затухает, причем скорость этого затухания возрастает с частотой. Если на поверхности полупространства задать произвольное периодическое колебание температуры, то амплитуды дискретных Фурье-образов (спектры) колебаний температуры, возникающих на глубинах x и $x+h$, свяжет следующая зависимость:

$$\frac{|U(x+h, \nu)|}{|U(x, \nu)|} = \exp\left(-\frac{\sqrt{\pi \nu}}{a} h\right). \quad (4)$$

Согласно ГОСТ Р 59918 [3], измерения при помощи установки динамического нагружения разрешено проводить только при положительных температурах во всех слоях дорожной одежды – данное требование вынуждает нас ограничиться в дальнейшем анализе периодом с 18 апреля по 27 октября 2019 г., называемым в дальнейшем расчетным. На рис. 1 сплошными линиями отложены натуральные логарифмы сглаженных наблюдаемых спектров U_1 , U_2 и U_3 колебаний температуры в местах расположения первых трех датчиков на глубинах 6, 14 и 29 см, соответственно.

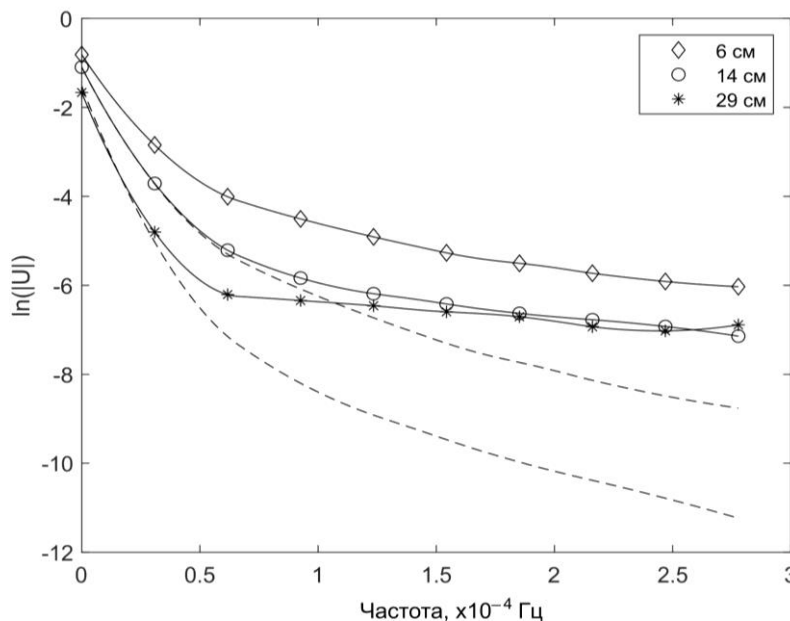


Рис. 2. Наблюдаемые и теоретические спектры температуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

Пунктирные линии на рис. 2 показывают теоретические спектры $\tilde{U}_2$ и $\tilde{U}_3$, которые мы могли бы ожидать в предположении, необходимом для выполнения зависимости (4), что коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость c и плотность ρ всех слоев дорожной одежды одинаковы (и отвечают средним значениям для горячего плотного асфальтобетона). Как видим, в области малых частот от нуля до $0.3 \cdot 10^{-4}$ Гц теоретические и наблюдаемые спектры практически совпадают; напротив, наблюдаемые амплитуды в области высоких частот превышают теоретические амплитуды в 5 раз для второго датчика и более чем в 20 раз для третьего. Это

расхождение объясняется упомянутой выше зашумленностью временных рядов температуры для 2 и 3 датчиков, появляющейся из-за ограниченной точности измерения температуры. Коррекция спектра наблюдаемых температур заключается в приведении спектра к теоретическому виду умножением на специальный поправочный коэффициент $C(\nu)$ и действует подобно фильтру нижних частот на радиосигнал. После выполнения обратного дискретного преобразования Фурье получаем сглаженный график температуры с теоретически обоснованной степенью сглаживания (рис. 3).

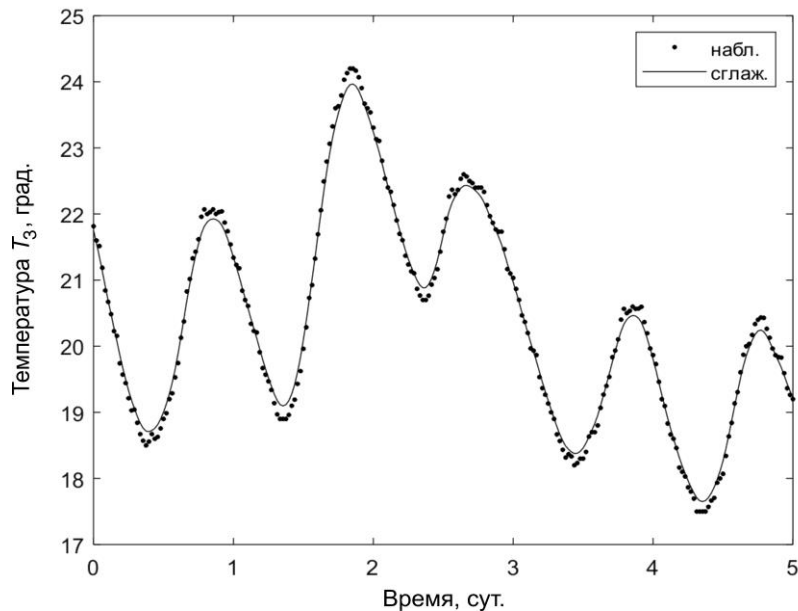


Рис. 3. Наблюдаемая и сглаженная зависимости температуры на третьем датчике (глубина 29 см)

УТОЧНЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЕВ

Как следует из теории, распределение температур по слою $x_L \leq x \leq x_R$ в произвольный момент времени $0 \leq t < \infty$, удовлетворяющее уравнению теплопроводности (1), полностью определяется начальным условием и граничными условиями первого рода

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= u_0(x), \\ u(x_L, t) &= u_L(t), \quad u(x_R, t) = u_R(t) \end{aligned} \quad (5)$$

для широкого класса функций $u_0(x)$, $u_L(t)$, $u_R(t)$ [12]. Очевидно, чем большее время про-

ходит с начала наблюдения, тем меньшее влияние на имеющееся распределение температур оказывает начальное условие — численные оценки показывают, что в нашем случае при $t > 1$ сут. влиянием начальных условий на результат можно пренебречь.

Задача моделирования температур сталкивается с двумя проблемами. Во-первых, физические условия требуют непрерывности изменения как температур, так и тепловых потоков при переходе через межслойные границы, и при заданных коэффициентах температуропроводности a^2 задача расчета температур в слоях плотного и пористого асфальтобетона оказывается переопределенной, поскольку решение этой задачи однозначно определяется температурами на границах слоев, и для обеспечения равенства

тепловых потоков не хватает варьируемых параметров. Во-вторых, станция мониторинга не сообщает температуру на поверхности ($x=0$) и задача теплопроводности для слоя ЩМА-20 является недоопределенной – в ней не хватает одного граничного условия. В качестве недостающего граничного условия можно назначить тепловой поток через границу $x=x_1$, но этот поток становится известным только после решения задачи теплопроводности для слоя плотного асфальтобетона ($x_1 \leq x \leq x_2$), поэтому сначала нужно разобраться с первой проблемой.

Для решения первой проблемы написана программа численного решения задачи теплопроводности однородного слоя (1), (5) методом конечных разностей. Незвестные начальные условия определялись из линейной интерполяции известных температур на границах слоя в начальный момент. Граничные условия определялись сглаженными зависимостями температур от времени на первых трех датчиках (расположенными в точках с координатами $x=x_1$, $x=x_2$ и $x=x_3$), измеренными в произвольный промежуток времени длительностью 5 сут. в расчетном периоде. В качестве варьируемых параметров назначались толщины, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости слоев плотного и пористого асфальтобетона; плотности принимались фиксированными и равными 2400 кг/м^3 для плотного асфальтобетона и 2300 кг/м^3 для пористого [13]. Задача оптимизации, решаемая по методу Левенберга-Марквардта, состояла в подборе таких значений варьируемых параметров, которые обеспечивали минимум целевой функции

$$\sum_n \left[Q_2^{\text{down}}(t_n) - Q_3^{\text{up}}(t_n) \right]^2, \quad (6)$$

где Q_2^{down} и Q_3^{up} – плотности теплового потока через нижнюю границу второго слоя (плотный асфальтобетон) и через верхнюю границу третьего слоя (пористый асфальтобетон), соответственно. Начальные значения варьируемых параметров выбирались равными, соответственно, проектным значениям толщин и табличным значениям коэффициента теплопроводности и теплоемкости для горячего плотного асфальтобетона.

В результате решения серии задач оптимизации установлено, что наилучшее совпадение тепловых потоков Q_2^{down} и Q_3^{up} (рис. 4) достигается при следующих значениях варьируемых параметров (табл. 1).

Необходимо обратить внимание, что толщины слоев, приведенные в табл. 1, оказались ниже проектных значений. Это может быть обусловлено допусками по толщинам при строительстве, возможным смещением датчиков температуры от межслойных границ и заводскими погрешностями самих датчиков. Также, согласно выполненному расчету, коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость пористого асфальтобетона превышают соответствующие показатели плотного асфальтобетона, что можно объяснить повышенным объемом пустот и, как следствие, возможной повышенной влажностью пористого асфальтобетона, находящегося на границе с неукрепленным слоем основания.

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

После нахождения температур во втором и третьем слоях, вычисляем плотность теплового потока Q_2^{up} на верхней границе второго слоя и вычисляем температуры в первом слое (ЩМА-20), используя пару условий для нижней границы этого слоя:

$$u(x_1, t) = u_1(t), \quad \lambda_1 \frac{\partial u}{\partial x}(x_1, t) = Q_2^{\text{up}}. \quad (7)$$

Первое из условий (7) задает температуру, используя показания первого датчика $u_1(t)$, второе обеспечивает непрерывность теплового потока на границе между первым и вторым слоями. Вычисления температуры производятся методом конечных разностей с помощью равенств

$$\begin{aligned} u_{i,j} &= 2u_{i,j+1} - u_{i,j+2} + \\ &+ \frac{\Delta x^2}{a^2 \Delta t} (u_{i+1,j} - u_{i-1,j}), \quad i=2, \dots, N_t-1, \\ u_{1,j} &= 2u_{1,j+1} - u_{1,j+2} + \frac{\Delta x^2}{a^2 \Delta t} (u_{3,j} - u_{1,j}), \\ u_{N_t,j} &= 2u_{N_t,j+1} - u_{N_t,j+2} + \frac{\Delta x^2}{a^2 \Delta t} (u_{N_t,j} - u_{N_t-2,j}), \end{aligned} \quad (8)$$

полученных из уравнения теплопроводности (1) заменой частных производных на разностные аналоги второго порядка точности для сеточной функции $u_{i,j}$. Здесь i, j – индексы дискретных времени и координаты, $i=1, \dots, N_t$, $j=1, \dots, N_x$; $\Delta x, \Delta t$ – шаги разностной сетки.

Для запуска расчета из условий (7) находим значения сеточной функции в двух последних слоях разностной сетки u_{i,N_x-1} и u_{i,N_x} , после

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

чего вычисляем неизвестные значения в слоях сетки с номерами, последовательно уменьшающимися с $j = N_x - 2$ по $j = 1$. Вычисленные се-

точные значения $u_{i,1}$, $i = 1, \dots, N_t$ определяют искомую температуру на поверхности дорожной одежды.

Таблица 1. Оптимальные значения параметров

Слой	Толщина, см	Коэффициент теплопроводности, Вт/м ² · К	Удельная теплоемкость, Дж/кг · К
Плотный асфальтобетон	7.2	1.0	710
Пористый асфальтобетон	12.9	1.4	830

Разностная схема (8) является неустойчивой и нуждается в контроле погрешности. Контроль обеспечивается вычислением температур внутри слоя ЩМА-20 по стандартной устойчивой разностной схеме для граничных условий первого рода [12], с известными температурами на верхней и нижней поверхностях слоя – первая из них определяется из расчета по формулам

(8), вторая – из показаний датчика температуры. Оказалось, что при $N_x = 24$, $N_t = 48 \cdot \Delta T$, где ΔT обозначает длительность расчетного времени в сутках, относительная погрешность не превышает 0.5 %. Пример результатов расчета показан на рис. 5.

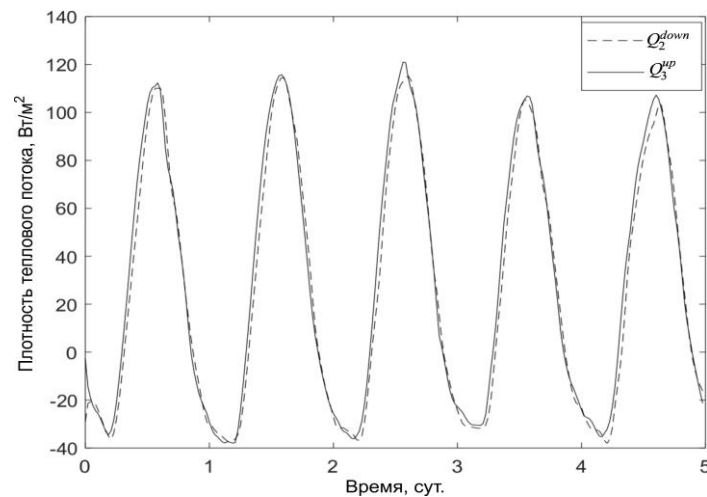


Рис. 4. Плотности тепловых потоков Q_2^{down} и Q_3^{up} , рассчитанные для промежутка времени с 16 по 20 мая 2019 г.

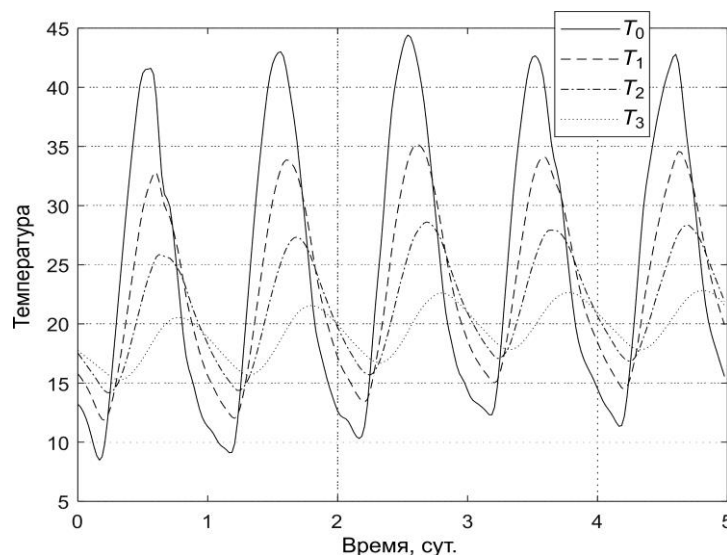


Рис. 5. Измеренные температуры $T_1 - T_3$ и вычисленная температура на поверхности T_0

ОБРАБОТКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Обозначим температуру дорожной одежды на поверхности как T_0 , а температуры на границах между первым и вторым слоями, вторым и третьим слоями, и на нижней границе треть-

го слоя как T_1, T_2, T_3 . Из табл. 2, составленной для расчетного периода, следует, что максимальное суточное изменение температуры на поверхности дорожной одежды превосходит 35°C . При этом максимум разности температур между верхней и нижней границами пакета асфальтобетонных слоев достигает 26°C .

Таблица 2. Показатели неоднородности температурного поля

Показатели	Минимум	Максимум	Среднее
Суточное изменение T_0 , град.	2.6	35.6	19.3
Разность $T_0 - T_3$, град.	-10.1	26.2	2.7
Температурный градиент dT/dx в 1-м слое, град./см	-1.4	2.1	0.1

На рис. 6 приведено измерение температур $T_0 - T_3$ в течение суток 4 июня 2019 г., когда было зафиксировано максимальное суточное изменение температуры. Рост температуры начинается после восхода солнца и уже примерно к 10:30 температура на поверхности достигает 40°C – максимально разрешенной температуры для проведения испытаний согласно [3].

Как известно, модуль упругости асфальтобетона существенно зависит от температуры. Для уточнения характера этой зависимости обратимся к теоретическим и экспериментальным оценкам. На рис. 7 приведены теоретические модули упругости плотного и пористого асфальтобетонов, устроенных в рассматриваемой конструкции, которые соответствуют длительности импульсного нагружения 30 мс (типичного для установок динамического нагружения), рассчитанные согласно методике монографии [14]. На рис. 8 представлены экспериментально определенные в лаборатории согласно методике [15] динамические модули упругости различных типов современных асфальтобетонов на одном битумном вяжущем PG 64-22, соответствующие частоте переменной нагрузки 25 Гц. Как видим, экспериментальные и теоретические результаты вполне согласуются между собой и показывают, что для широкого круга асфальтобетонов увеличение температуры от 0 до 40°C приводит к уменьшению модуля упругости от 8 до 15 раз, а приращение температуры всего на 8°C приводит к двукратному уменьшению модуля упругости при средних и высоких температурах. Это может указывать на то, что замена слоя асфальтобетона с двукратной или большей вариацией модуля упругости по толщине на однородный слой, как это происходит при обра-

ботке результатов измерения установкой динамического нагружения, нуждается в актуализации.

Между тем, если в расчетном периоде ограничиться светлым временем суток (в темное время суток испытания по оценке прочности, как правило, не проводятся) и поверхностными температурами T_0 от 0 до 40°C , то относительная частота случаев, когда разность максимальной и минимальной температур ΔT в асфальтобетонных слоях превышает 8°C , составляет 33 %. Более детально, в диапазоне $0 < T_0 \leq 10$ шанс встретить $\Delta T > 8$ составляет всего 2 %, при $10 < T_0 \leq 20$ – 5 %, при $20 < T_0 \leq 30$ – 34 % и при $30 < T_0 \leq 40$ – 94 %. Таким образом, при поверхностных температурах от 20 до 30°C некорректные данные могут быть получены более чем в одной трети случаев, а при температурах выше 30°C – почти во всех случаях. Если попытаться обойти проблему, снизив максимально допустимую поверхностную температуру, при которой разрешены измерения, с 40 до 20°C , то мы столкнемся с другой проблемой – резкое снижение КПД использования светлого времени суток. На рис. 9 показан график процента светлого времени суток, при котором температура на поверхности оказывается ниже 20°C .

Исходя из наблюдений за температурным режимом в месте выполнения мониторинга, летний период 2019 г. не отличался аномально жаркими температурами, тем не менее измерения в июне и с середины августа по середину сентября при таком ограничении температуры проводить было бы практически невозможно. Суммарная доля пригодного для измерений времени снижается с 96 до 47 % при понижении допустимой температуры с 40 до 20°C – и это

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

без учета стандартного диапазона рабочего времени с 8:00 до 17:00. С учетом последнего ограничения доля пригодного времени уменьшается до 33 %, причем для измерения можно использовать только вторую половину сентября и октябрь. В относительно теплые месяцы с ап-

реля по август при ясной погоде температура поверхности быстро поднимается выше 20 °С и в течение светового дня для измерений остаются подходящими не более нескольких часов после восхода солнца и перед закатом.

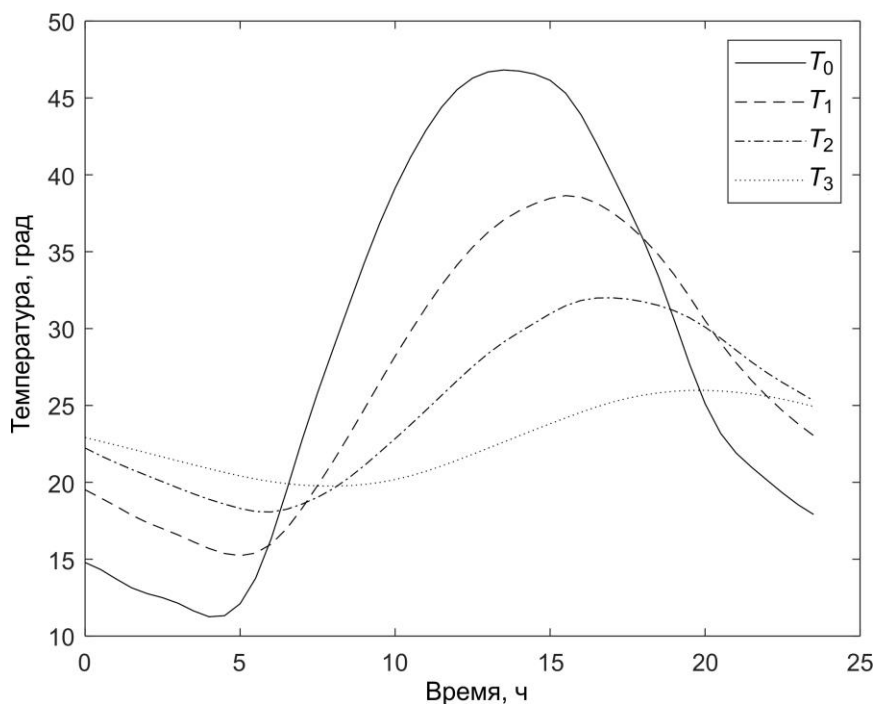


Рис. 6. Изменение межслойных температур в течение суток 4 июня 2019 г.

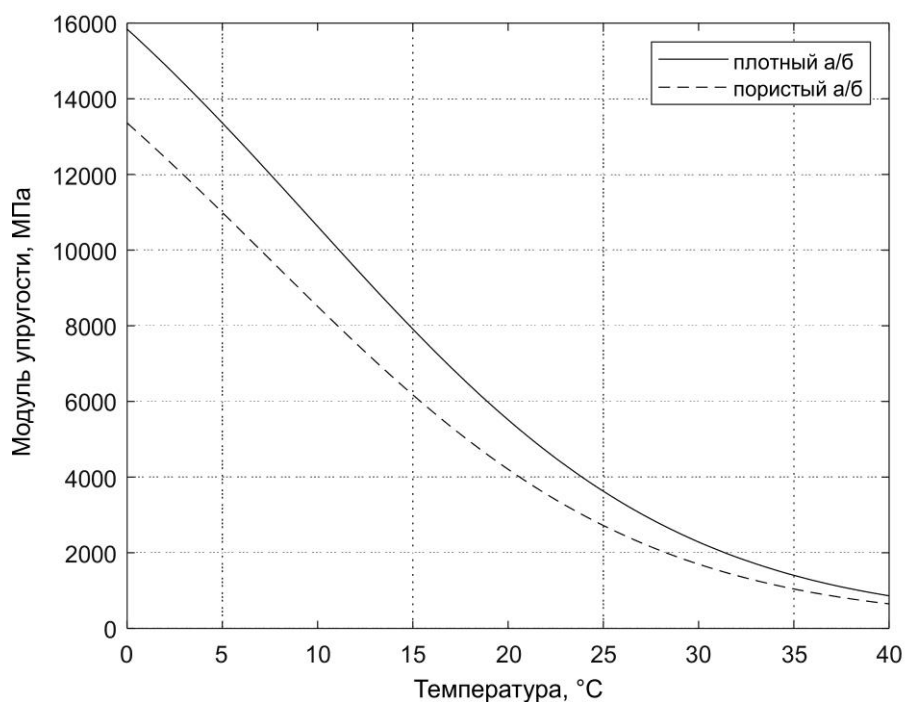


Рис. 7. Теоретическая зависимость модуля упругости разных типов асфальтобетона (а/б) от температуры

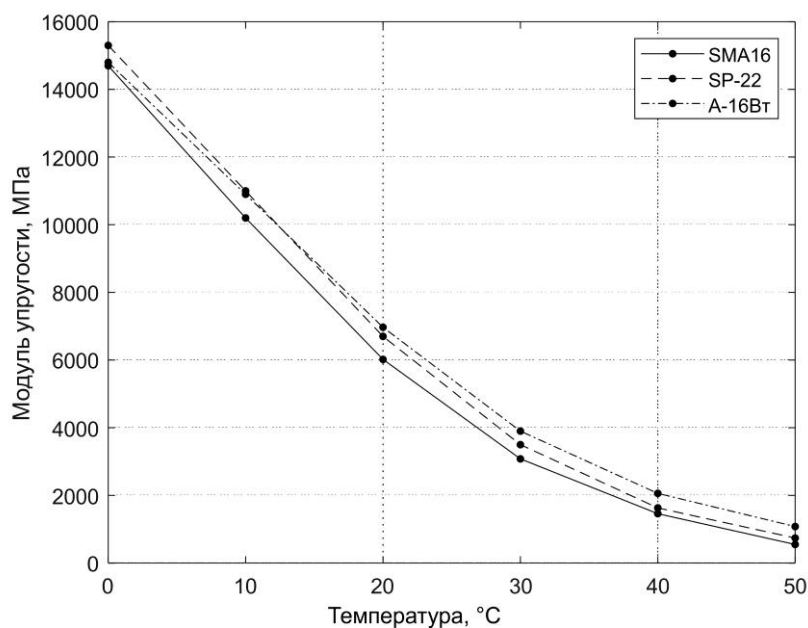


Рис. 8. Экспериментальная зависимость модуля упругости различных асфальтобетонных смесей от температуры [10]

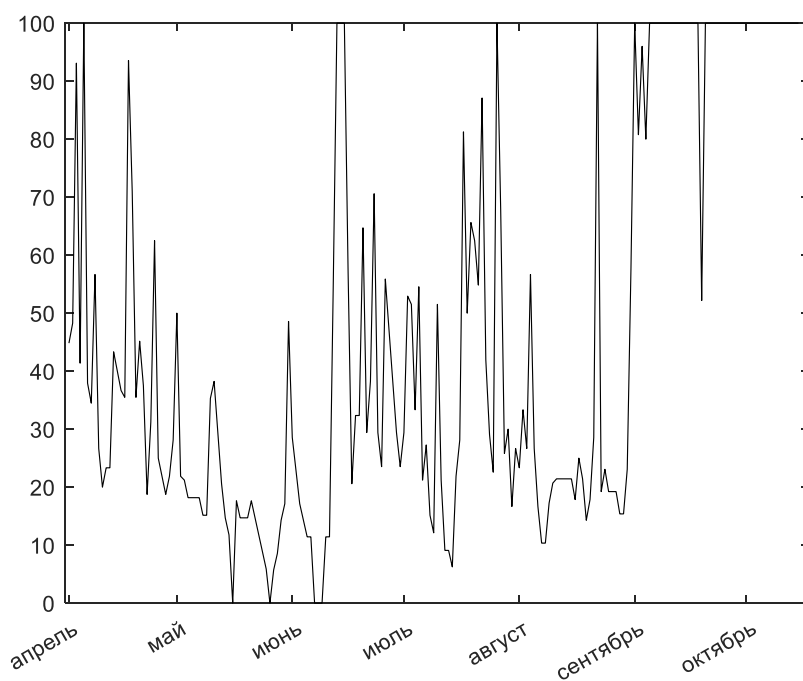


Рис. 9. Доля светлого времени суток (в %), при которой температура на поверхности дорожной одежды не превышает 20 °C

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Предложенная методика, основанная на решении задачи теплопроводности для каждого связного слоя дорожной одежды, принимающая во внимание непрерывность температуры и плотности теплового потока при переходе через межслойные границы, позволяет не только найти температуры в первом слое при неизвестной температуре на поверхности, но и уточнить

механические и теплофизические параметры слоев, в частности толщины, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости.

Существующая методика обратного расчета упругих параметров слоев дорожной одежды на основании измерений, проводимых установкой динамического нагружения [3], предполагает неизменность упругих параметров в пределах одного слоя. Модуль упругости асфальтобетона обладает высокой чувствительностью к темпе-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

ратуре; теплообмен между поверхностью дорожной одежды и окружающей средой, с учетом нагрева солнечным излучением, охлаждения выпадающими осадками и движущимися приповерхностными воздушными массами и прочих факторов, приводят к тому, что в то время суток/года, которое пригодно для проведения измерений, распределение температуры по асфальтобетонным слоям, как правило, отличается существенной неоднородностью. Результаты обратного расчета с последующим приведением упругих параметров к нормативной температуре (температурная коррекция) могут иметь определенные значительные разбросы при изменении модуля упругости в пределах асфальтобетонного слоя в два и более раз. Проведение измерений только в те часы/дни, которые обеспечивают приемлемо малую неоднородность свойств, значительно уменьшает коэффициент использования рабочего времени или вынуждает отбраковывать большую часть результатов измерений. Выход видится в совершенствовании методик обратного расчета и температурной коррекции, с тем чтобы обеспечить их работу в условиях высокой неоднородности упругих параметров асфальтобетона.

Для выполнения обозначенных задач будут продолжены исследования температурных параметров асфальтобетонных слоев на действующих автомобильных дорогах в различных регионах путем устройства станций мониторинга, накопления и анализа получаемых на них данных. Для этого будет подобрано соответствующее оборудование, позволяющее минимизировать погрешности получаемых результатов, разработана методика мониторинга и актуализированы полученные в рамках выполнения данных исследований параметры с учетом применения современных типов асфальтобетонов и битумных вяжущих, входящих в их состав.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОДМ 218.4.039-2018. Рекомендации по диагностике и оценке технического состояния автомобильных дорог. Росавтодор. М.: Информавтодор, 2018. 60 с.
2. ГОСТ 32729-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Метод измерения упругого прогиба жестких дорожных одежд для определения прочности. М.: Стандартинформ, 2014. 6 с.
3. ГОСТ Р 59918-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Жесткие дорожные одежды. Методики оценки прочности. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 50 с.
4. Углова Е.В. Оценка модулей упругости слоев дорожной одежды на стадии эксплуатации автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2009. № 2 (23). С. 170–178.
5. Углова Е.В., Тиратуриян А.Н., Мизонов В.В. Разработка теоретических основ «обратного» расчета модулей упругости слоев дорожной конструкции на стадии эксплуатации // Известия Ростовского государственного строительного университета, 2011. № 15. С. 84–89.
6. Тиратуриян А.Н., Углова Е.В. Программный комплекс для «обратного» расчета динамических модулей упругости эксплуатируемых дорожных конструкций с учетом параметров воздействия установок нагружения дорожных одежд // Научное издание: интернет-журнал, 2012. № 3 (12). URL: <https://naukovedenie.ru/sbornik12/12-120.pdf> (дата обращения 16.04.2024).
7. Бочкарев А.В. Анализ надежности обратного расчета упругих параметров дорожных одежд // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура, 2022. № 3 (33). С. 5–18.
8. Бочкарев А.В., Землянухин А.И. Обратное вычисление послойных модулей упругости дорожных одежд // Вестник Саратовского государственного технического университета, 2022. № 3(94). С. 5–18.
9. Тиратуриян А.Н., Ляпин А.А., Углова Е.В. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика, 2023. № 1. С. 56–65.
10. Кадыров Г.Ф., Горский М.Ю., Жданов К.А., Симчук Е.Н. Исследование модулей упругости щебеночно-мастичного асфальтобетона для расчета конструкций дорожных одежд // Дороги и мосты, 2023. № 1(49). С. 273–297.
11. Горский М.Ю., Симчук Е.Н., Кадыров Г.Ф., Симчук А.Е. Оценка влияния температурных факторов на параметры чаши прогиба жестких дорожных одежд на основе испытаний прочности установками динамического нагружения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2023. Т. 25. № 4. С. 211–225.
12. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 736 с.
13. ОДН 218.046-01. Проектирование жестких дорожных одежд. М.: Информавтодор, 2001. 104 с.
14. Радовский Б.С., Телтаев Б.Б. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям. Алматы: «Білім» баспасы, 2013. 152 с.
15. ГОСТ Р 58401.21-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Методы определения динамического модуля упругости и числа текучести с использованием установки динамического нагружения (АМРТ). М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.

MODELING OF TEMPERATURE FIELDS IN MULTILAYER ROAD PAVEMENTS BASED ON MONITORING DATA

M.Yu. Gorskiy^{1,*}, E.N. Simchuk^{1,}, A.V. Bochkarev^{2,***}**

¹*Autonomous non-profit organization "NII TSK", Moscow, 111024, Russia*

²*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russia*

**e-mail: gorskiy@niitsk.ru*

***e-mail: simchuk@niitsk.ru*

****e-mail: ab2009sar@list.ru*

Received April 20, 2024; revised April 20, 2024; accepted May 02, 2024

The article presents the results of modeling temperature fields in multi-layer road pavement based on monitoring results on an operating road. The relevance of the work is due to the high influence of temperature on the elastic moduli of asphalt concrete, and, as a consequence, on the results of tests to assess the strength of road pavements performed under different temperature conditions. The research included an analysis of data accumulated over a long period of time from a temperature monitoring station installed during the construction of the highway. A technique is proposed based on solving the problem of thermal conductivity for each cohesive layer of road pavement, taking into account the continuity of temperature and heat flux density when passing through interlayer boundaries, which makes it possible to determine the temperature field in the first layer at an unknown temperature on the surface and clarify the mechanical and thermophysical parameters of the rest layers. An analysis was carried out of the degree of heterogeneity of temperature distribution across layers in different periods of the year, allowing for strength tests. Directions for further research are outlined to update the obtained methods, taking into account the use of modern types of asphalt concrete in road pavement structures.

Keywords: multilayer pavements, thermal conductivity equation, optimization, determination of thermophysical properties, statistical analysis.

REFERENCES

1. ODM 218.4.039-2018. Rekomendacii po diagnostike i ocenke tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobil'nyh dorog [Recommendations for diagnosing and assessing the technical condition of highways]. Moscow, Informavtodor, 2018. 60 p. (in Russian).

2. GOST 32729-2014. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Metod izmereniya uprugogo progiba nezhestkih dorozhnyh odezhd dlya opredeleniya prochnosti [State Standard 32729-2014. Public roads. Method for measuring elastic deflection of flexible pavements to determine strength]. Moscow, Standartinform, 2014. 6 p. (in Russian)

3. GOST R 59918-2021. Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Nezhestkie dorozhnye odezhd. Metodiki ocenki prochnosti [State Standard 59918-2021. Public roads. Non-rigid road pavements. Methods for assessing strength], Moscow, Rossijskij institut standartizacii, 2022. 50 p. (in Russian).

4. Uglova E.V. Ocenka modulej uprugosti sloev dorozhnoj odezhd na stadii ekspluatatsii avtomobil'nyh dorog [Estimation of elastic moduli of pavement layers at the stage of highway operation], Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2009. No. 2(23). Pp. 170–178 (in Russian).

5. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Mizonov V.V. Razrabotka teoreticheskikh osnov «obratnogo» rascheta modulej uprugosti sloev dorozhnoj konstrukcii na stadii ekspluatatsii [Development of theoretical foundations for the «reverse» calculation of the modulus of elasticity of layers of a road structure at the operational stage], Izvestiya Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta, 2011. No. 15. Pp. 84–89 (in Russian).

6. Tiraturyan A.N., Uglova E.V. Programmnyj kompleks dlya «obratnogo» rascheta dinamicheskikh modulej uprugosti ekspluatiruemyh dorozhnyh konstrukcij s uchetom parametrov vozdejstviya ustanovok nagruzheniya dorozhnyh odezhd [Software package for “reverse” calculation of dynamic moduli of elasticity of road structures in use, taking into account the parameters of the influence of road pavement loading installations], Naukovedenie: internet-zhurnal, 2012. No. 3(12) (in Russian) Available at: <https://naukovedenie.ru/sbornik12/12-120.pdf> (accessed 16.04.2024).

7. Bochkarev A.V. Analiz nadezhnosti obratnogo rascheta uprugih parametrov dorozhnyh odezhd [Reliability analysis of reverse calculation of elastic parameters of road pavements], Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura, 2022. No. 3(33). Pp. 5–18 (in Russian).

8. Bochkarev A.V., Zemlyanuhin A.I. Obratnoe vychislenie poslojnyh modulej uprugosti dorozhnyh

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

odezhd [Reverse calculation of layer-by-layer elastic moduli of road pavements], Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2022. No. 3(94). Pp. 5–18 (in Russian).

9. *Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., Uglova E.V.* Sovershenstvovanie nerazrushayushchego metoda opredeleniya mekhanicheskikh harakteristik elementov mnogoslojnykh konstrukcij na primere dorozhnykh odezhd [Improving a non-destructive method for determining the mechanical characteristics of elements of multilayer structures using the example of road pavements], Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika, 2023. No. 1. Pp. 56–65 (in Russian).

10. *Kadyrov G.F., Gorskij M.Yu., Zhdanov K.A., Simchuk E.N.* Issledovanie modulej uprugosti shchebenochno-mastichnogo asfal'tobetona dlya rascheta konstrukcij dorozhnykh odezhd [Study of the elastic moduli of crushed stone-mastic asphalt concrete for the calculation of road pavement structures], Dorogi i mosty, 2023. No. 1(49). Pp. 273–297 (in Russian).

11. *Gorskij M.Yu., Simchuk E.N., Kadyrov G.F., Simchuk A.E.* Ocenka vliyaniya temperaturnykh faktorov na parametry chashi progiba nezhestkikh dorozhnykh odezhd na osnove ispytaniy prochnosti ustanovkami dinamicheskogo nagruzheniya [Assessment of the influence of temperature factors on the deflection parameters of flexible road pavements based on strength tests using dynamic loading installations], Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2023. Vol. 25. No. 4. Pp. 211–225 (in Russian).

12. *Tihonov A.N., Samarskij A.A.* Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka, 1977. 736 p. (in Russian).

13. ODN 218.046-01. Proektirovanie nezhestkikh dorozhnykh odezhd [Design of flexible pavements]. Moscow, Informavtodor, 2001. 104 p. (in Russian).

14. *Radovskij B.S., Tel'taev B.B.* Vyazkouprugie harakteristiki bituma i ih ocenka po standartnym pokazatelyam [Viscoelastic characteristics of bitumen and their assessment using standard indicators]. Almaty, Bilim, 2013. 152 p. (in Russian).

15. GOST R 58401.21-2019 Dorogi avtomobil'nye obshchego pol'zovaniya. Smesi asfal'tobetonnye dorozhnye i asfal'tobeton. Metody opredeleniya dinamicheskogo modulya uprugosti i chisla tekuchesti s ispol'zovaniem ustanovki dinamicheskogo nagruzheniya (AMPT) [Public roads. Mixtures of asphalt concrete road and asphalt concrete. Methods for determining the dynamic modulus of elasticity and yield number using the dynamic loading setup (AMPT)]. Moscow, Standartinform, 2019. 15 p.

УДК 517.95

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ ОДНОМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ

С.П. Баутин^{1,*}, И.А. Вазиева^{1,**}

¹Снежинский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Снежинск, 456776, Россия

*e-mail: spbautin@mail.ru

**e-mail: vazieva.i@yandex.ru

Поступила в редакцию: 24.04.2024

После доработки: 20.05.2024

Принята к публикации: 28.05.2024

В работе рассматривается нелинейное уравнение теплопроводности в одномерном плоскосимметричном случае. Для него на отрезке $[0; \pi]$ ставится задача Коши с непрерывными начальными данными. Эти данные четным образом продолжаются на отрезок $[-\pi; 0]$, а затем с периодом 2π на всю числовую ось. Решение полученной задачи Коши представляется в виде соответствующего тригонометрического ряда по косинусам от пространственной переменной. Коэффициенты ряда являются искомыми функциями от времени. Для этих коэффициентов приведена бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений с соответствующими начальными условиями. Построены конечные отрезки тригонометрических сумм, приближенно передающие решения рассматриваемых задач Коши.

Ключевые слова: нелинейное уравнение теплопроводности, задача Коши, тригонометрические ряды, приближенные решения.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.330

EDN ODCDWC

ВВЕДЕНИЕ

Решения нелинейного уравнений теплопроводности описывают не только процесс передачи тепла от холодного к тепловому, но также описывают процесс фильтрации газа в пористом грунте [1–5].

В настоящее время основным способом построения решений начально-краевых задач для нелинейных уравнений с частными производными являются разностные методы, при которых численно определяется конечное число значений искомых функций в отдельных изолированных точках. Но часто под вопросом остается надежность получаемых разностными методами численных результатов.

Среди аналитических методов получения решений нелинейных уравнений с частными производными одним из основных методов является использование конечных или бесконечных представлений с применением различных систем базисных функций для разных функциональных пространств [6–11].

В работе [12] впервые методика бесконечных тригонометрических рядов была применена для построения решений одного нелинейного урав-

нения, а также нелинейной системы уравнений с частными производными смешанного типа. В работах [13–15] доказана сходимость используемых тригонометрических рядов.

Эти факты и послужили отправной точкой для исследований, представленных в данной работе: построение решений нелинейного уравнения теплопроводности в одномерном плоскосимметричном случае в виде тригонометрических рядов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЕЕ РЕШЕНИЙ

Рассматривается нелинейное уравнение теплопроводности в одномерном плоскосимметричном случае

$$u_t = uu_{xx} + \frac{1}{\sigma} u_x^2, \quad \sigma = \text{const} > 0. \quad (1.1)$$

Для уравнения (1.1) на отрезке $[0; \pi]$ задаются непрерывные начальные условия, которые вначале четным образом продолжаются на отрезок $[-\pi; 0]$, а затем с периодом 2π на всю числовую ось.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ ОДНОМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ

Решение (1.1) ищется в виде

$$u(t, x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} u_k(t) \cos(kx) \quad (1.2)$$

с неизвестными коэффициентами $u_k(t)$, зависящими от t и для которых заданы начальные условия

$$u_k(0) = u_k^0; \quad u_k^0 = \text{const.} \quad (1.3)$$

Решение уравнения (1.1) в виде тригонометрических рядов только по синусам невозможно в силу конкретного вида нелинейности исходного уравнения.

Из вида (1.2) следует, что в точках $x = \pm \pi$ выполняются условия теплоизоляции

$$u_x(t, x) \Big|_{x=\pm\pi} = 0,$$

делающие нулевым поток тепла с концов отрезка $[-\pi; \pi]$. По представлениям (1.2) определяются их частные производные, которые подставляются в уравнение (1.1).

Полученное таким образом соотношение записывается через двойные суммы

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} u'_k(t) \cos(kx) = & - \sum_{k=1}^{\infty} k^2 u_k(t) \cos(kx) - \\ & - \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} m^2 u_k(t) u_m(t) \cos(kx) \cos(mx) + \\ & + \frac{1}{\sigma} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k m u_k(t) u_m(t) \sin(kx) \sin(mx). \end{aligned} \quad (1.4)$$

Это полученное уравнение проецируется на базис

$$\{\cos x, \cos 2x, \cos 3x, \dots\},$$

т.е. это уравнение последовательно умножается на $\cos(lx)$, $l = 1, 2, \dots$ и интегрируется по x на отрезке $[-\pi; \pi]$. Далее учитываются значения конкретных определенных интегралов и вводятся две константы:

$$a_{km(\text{ответов: 1})} = \begin{cases} 1, & \text{если } l = k + m \text{ или } l = |k - m|; \\ 0, & \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

$$b_{km(\text{ответов: 1})} = \begin{cases} 1, & \text{если } l = |k - m|; \\ -1, & \text{если } l = k + m; \\ 0, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

С помощью этих выражений вычисляются следующие интегралы:

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(kx) \cos(mx) \cos(lx) dx &= \frac{\pi}{2} a_{kml}, \\ \int_{-\pi}^{\pi} \sin(kx) \sin(mx) \sin(lx) dx &= \frac{\pi}{2} b_{kml}. \end{aligned}$$

В результате получается бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений, и после умножения каждого уравнения на $1/\pi$ имеет место такая бесконечная система дифференциальных уравнений для бесконечно-го числа искомых функций, записанная в нормальной форме

$$\begin{aligned} u'_l(t) = & -l^2 u_l(t) - \\ & - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} m^2 u_k(t) u_m(t) a_{kml} + \\ & + \frac{1}{2\sigma} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} k m u_k(t) u_m(t) b_{kml}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Здесь $l = 1, 2, \dots$.

По методике, предложенной в работах [13–15], установлена локальная по времени сходимость ряда (1.2). Единственное отличие от рассмотренного в [13] случая состоит в виде итогового мажорантного уравнения, которое в данном случае имеет вид

$$v_t = -v^2 + v_x^2.$$

Для построения приближенных решений уравнения (1.1) используются конечные суммы

$$u(t, x) = 1 + \sum_{k=1}^K u_k(t) \cos(kx), \quad (1.6)$$

где K – выбранное значение числа слагаемых в конечных отрезках рядов.

Тогда бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений перейдет в конечную систему

$$\begin{aligned} u'_l(t) = & -l^2 u_l(t) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^K m^2 u_k(t) u_m(t) a_{kml} + \\ & + \frac{1}{2\sigma} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^K k m u_k(t) u_m(t) b_{kml}, \quad l = 1, \dots, K. \end{aligned}$$

Учет значений констант a_{kml} , b_{kml} и проведение соответствующих эквивалентных преобразований приводит к следующей конечной системе обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов $u_k(t)$:

$$u_l'(t) = -l^2 u_l(t) - \sum_{j=1}^{K-l} \left[\left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) j^2 + \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) jl + \frac{l^2}{2} \right] u_j u_{j+l} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{l-1} \left[\left(1 + \frac{1}{\sigma}\right) i^2 - \frac{il}{\sigma} \right] u_i u_{l-i}, \quad (1.7)$$

где $l = 1, 2, \dots, K$.

Приближенные решения уравнения (1.1) строятся в виде конечных сумм (1.6) при заданном числе K . Для определения слагаемых этих сумм решаются конечные системы дифференциальных уравнений (1.7) при заданных начальных данных

$$u_l(0) = u_l^0; \quad u_l^0 = \text{const}; \quad 1 \leq l \leq K.$$

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены графики коэффициентов $u_k(t)$, $1 \leq k \leq 4$, в случае, когда

$$K = 100, \sigma = 0.5, u_1(0) = 1.0; \quad u_l^0(0) = 0; \quad 2 \leq l \leq K. \quad (1.8)$$

Номера кривых на рис. 1, 2 соответствуют номерам коэффициентов $u_k(t)$.

Коэффициенты $u_k(t)$ достаточно быстро достигают своего локального экстремума, а затем монотонно стремятся к нулю. Значения коэффициентов $u_k(t)$ связаны неравенством:

$$|u_k(t)| > |u_{k+1}(t)|.$$

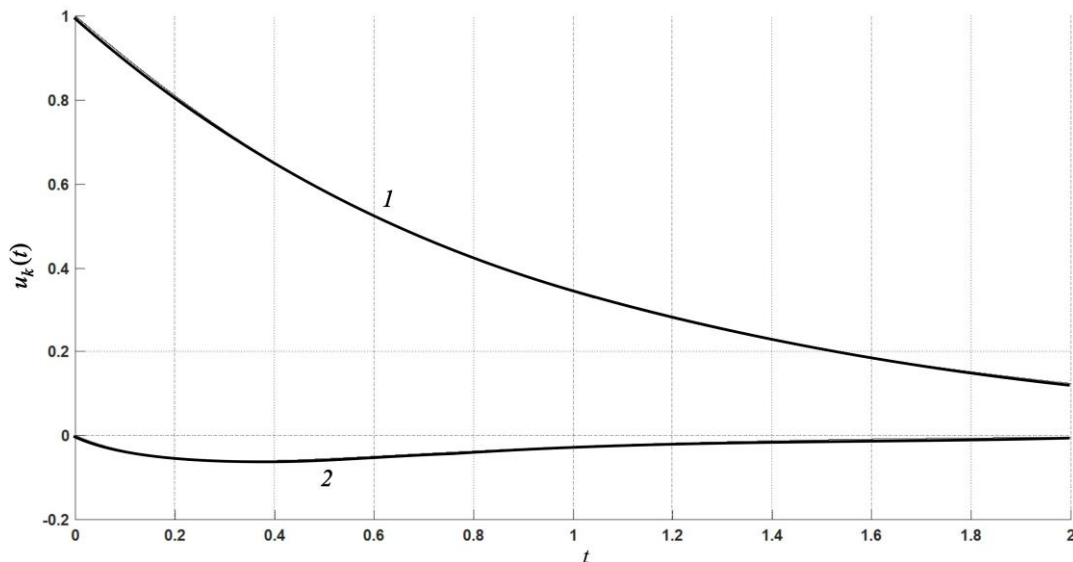


Рис. 1. Графики коэффициентов $u_1(t)$, $u_2(t)$ разложения (1.2)

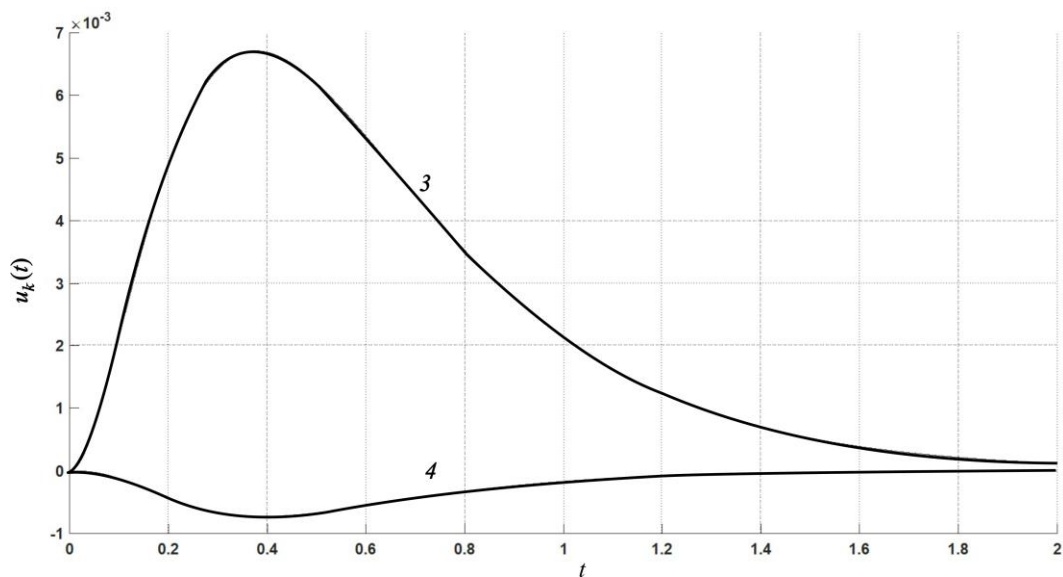


Рис. 2. Графики коэффициентов $u_3(t)$, $u_4(t)$ разложения (1.2)

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ ОДНОМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ

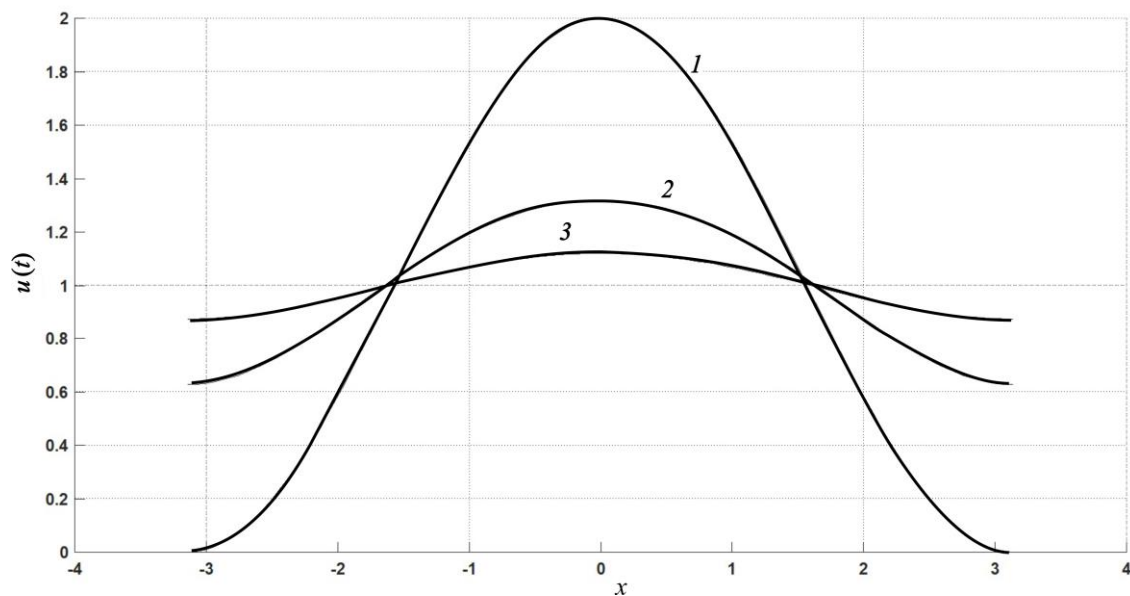


Рис. 3. Приближенные решения задачи (1.8) в различные моменты времени

На графиках рис. 3 представлено изменение с течением времени рассматриваемого приближенного решения задачи (1.8). Линии 1–3 на рис. 3 соответствуют моментам времени $t = 0.0$, 1.0 , 2.0 .

Анализ поведения графиков показывает, что с течением времени температура выравнивается. При этом во все моменты времени площадь фигуры под соответствующей кривой постоянна, что соответствует из начальному свойству сохранения тепла в условиях теплоизоляции на границе рассматриваемой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лейбензон Л.С. Собрание трудов. Т. 2. Подземная газогидродинамика. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 544 с.
2. Олейник О.А., Калашиников А.С., Юй-линь Чжоу. Задача Коши и краевые задачи для уравнений типа нестационарной фильтрации // Известия АН СССР. Серия математика. 1958. Т. 22. Вып. 5. С. 667–704.
3. Ладыженская О.А., Солонников В. А., Уральцева Н.Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. М.: Наука, 1967. 736 с.
4. Баренблатт Г.И., Ентов В. М., Рыжик В.М. Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972. 288 с.
5. Vazquez J.L. The Porous Medium Equation: Mathematical Theory. Oxford: Clarendon Press, 2007, 648 p.
6. Васин В.В., Сидоров А.Ф. О некоторых методах приближенного решения дифференциальных и интегральных уравнений // Известия вузов. Математика, 1983. 7 (254). С. 13–27.
7. Баутин С.П. Применение характеристических рядов для представления решений нелинейных уравнений параболического типа в окрестности линии вырождения // Численные методы механики сплошной среды, 1985, Т. 16. № 5. С. 16–28.
8. Баутин С.П. Существование аналитической тепловой волны, определяемой заданным краевым режимом // Сибирский журнал промышленной математики, 2003. Т. VI. № 1(13). С. 3–11.
9. Баутин С.П. Аналитическая тепловая волна. М.: Физматлит, 2003. 88 с.
10. Рубина Л. И., Ульянов О. Н. Об одном методе решения уравнения нелинейной фильтрации // Сибирский математический журнал, 2012. Том 53. № 5.
11. Казаков А.Л., Лемперт А.А. О существовании и единственности решения краевой задачи для параболического уравнения нестационарной фильтрации // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54. № 2(318). С. 97–105.
12. Баутин С.П., Замыслов В.Е., Скачков П.П. Математическое моделирование тригонометрическими рядами одномерных течений вязкого теплопроводного газа. Новосибирск: Наука; Екатеринбург: УрГУПС, 2014. 91 с.
13. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление решений уравнения Бюргерса тригонометрическими рядами // Вестник НИЯУ МИФИ, 2022. Т. 11. № 4. С. 305–318.
14. Баутин С.П., Карелина О.А., Обухов А.Г. Представление решений системы уравнений движе-

ния с помощью тригонометрических рядов // Вестник НИЯУ МИФИ, 2023. Т. 12. № 1. С. 39–51.

15. Баутин С.П., Карелина О.А., Обухов А.Г. Не-которые нестационарные двумерные течения газа,

определяемые с помощью тригонометрических рядов // Вестник НИЯУ МИФИ, 2023. Т. 12. № 4. С. 223–232.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 3, pp. 154–159

REPRESENTATION OF SOLUTIONS TO THE NONLINEAR HEAT CONDUCTIVITY EQUATION BY TRIGONOMETRIC SERIES

S.P. Bautin^{1,*}, I.A. Vazieva^{1,**}

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk, 456776, Russia

*e-mail: spbautin@mail.ru

**e-mail: vazieva.i@yandex.ru

Received April 24, 2024; revised May 20, 2024; accepted May 28, 2024

The paper considers the nonlinear heat equation in a one-dimensional plane-symmetric case. For him, on the interval $[0; \pi]$ the Cauchy problem with continuous initial data is posed. These data evenly continue to the segment $[-\pi; 0]$, and then with a period of 2π on the entire numerical axis. The solution to the resulting Cauchy problem is represented in the form of a corresponding trigonometric series in cosines from the spatial variable. The coefficients of the series are the desired functions of time. For these coefficients, an infinite system of ordinary differential equations is given with the corresponding initial conditions. Finite segments of trigonometric sums are constructed that approximately convey the solutions of the considered Cauchy problems.

Keywords: nonlinear heat equation, Cauchy problem, trigonometric series, approximate solutions.

REFERENCES

1. Leibenzon L.S. *Sobranie trudov*. Tom 2. Podzemnaya gazogigrodinamika [Collection of works. Vol. 2. Underground gas hydrodynamics]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1953. 544 p.
2. Oleinik O.A., Kalashnikov A.S., Yu-lin Zhou. Zadacha Koshy i kraevye zadachi dlay uravnenii tipa nestacyonarnoi filtratsyi. [The Cauchy problem and boundary value problems for equations of the nonstationary filtration type.] // *Izvestiya AN SSSR. Mathematics series*. 1958. Vol. 22. Iss. 5. Pp. 667–704 (in Russian).
3. Ladyzhenskaya O.A., Solonnikov V. A., Uraltseva N. N. Lineinye i kvazilineinye uravneniya parabolicheskogo vida. [Linear and quasi-linear equations of parabolic type]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 736 p.
4. Barenblatt G.I., Kolesnikov V.M., Ryzhik V.M. Teoriya nestacyonarnoi filtratsyi [Theory of unsteady filtration of liquid and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1972. 288 p.
5. Vazquez J.L. *The Porous Medium Equation: Mathematical Theory*. Oxford: Clarendon Press, 2007. 648 p.
6. Vasin V.V., Sidorov A.F. O necotoryh metodah priblizennogo resheniya differentsialnyh i integralnyh uravnenii. [On some methods of approximate solution of differential and integral equations]. *Izvestiya vuzov. Mathematics*, 1983. No. 7 (254). Pp. 13–27 (in Russian).
7. Bautin S.P. Primenenie harakteristicheskikh raydov dlya predstavleniy reshenii nelineinyh uravnenii parabolicheskogo vida v okrestnosti linii vyrozdeniya [Application of characteristic series to represent solutions of nonlinear parabolic equations in surroundings of the degeneracy line]. *Chislennyye metody mekhaniki sploshnoy sredy*, 1985. Vol. 16. No. 5. Pp. 16–28 (in Russian).
8. Bautin S.P. Sushestvovanie analiticheskoi teplovoy volny, opredelayemoy zadannym kraevym rezymom. [The existence of an analytical heat wave determined by a given boundary regime]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*, 2003. Vol. VI. No. 1(13). Pp. 3–11 (in Russian).
9. Bautin S.P. Analiticheskaya teplovaya volna [Analytical heat wave]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003. 88 p.
10. Rubina L.I., Ulyanov O.N. Ob odnom metode resheniya uravneniya nelineinoy filtratsyi. [On one method for solving the nonlinear filtration equation]. *Sibirskiy matematicheskij zhurnal*, 2012. Vol. 53. No. 5 (in Russian).
11. Kazakov A.L., Lempert A.A. O sushestvovanii i edinstvennosti resheniya kraevoy zadachi dlay parabolicheskogo uravneniya nestacionarnoi filtratsyi [On the existence and uniqueness of a solution to a boundary value problem for a parabolic equation of non-stationary

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ ОДНОМЕРНОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ

filtration]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2013. Vol. 54. No. 2(318). Pp. 97–105 (in Russian).

12. *Bautin S.P., Zamyslov V.E., Skachkov P.P.* Matematicheskoe modelirovanie rignonometricheskimi raydami odnomernyh techenii vayzkogo tehljprovosnogo gaza. [Mathematical modeling of one-dimensional flows of viscous heat-conducting gas using trigonometric series]. Novosibirsk, Nauka Publ.; Yekaterinburg, USURT Publ., 2014. 91 p.

13. *Bautin S.P., Zamyslov V.E.* Predstavlenie resenii uravneniya Burgersa trigonometricheskimi raydami. [Representation of solutions of the Burgers equation by trigonometric series] // *Vestnik NIYaU MIFI*, 2022. Vol. 11. No. 4. Pp. 305–318 (in Russian).

14. *Bautin S.P., Karelina O.A., Obukhov A.G.* Predstavlenie reshenii sistemy uravnenii dvizeniya s pomosh'yu trigonometricheskikh raydov. [Representation of solutions of the system of equations of motion using trigonometric series]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2023. Vol. 12. No. 1. Pp. 39–51 (in Russian).

15. *Bautin S.P., Karelina O.A., Obukhov A.G.* Nekotorye nestachyonarnye dvumernye techeniya gaza, opredelyaemye s pomosh'yu trigonometricheskikh raydov. [Some unsteady two-dimensional gas flows determined using trigonometric series]. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2023. Vol. 12. No. 4. Pp. 223–232.

УДК 658.7

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК И ИХ АКТУАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В РОССИИ

А.Р. Улимаева^{1*}, Д.С. Смирнов¹

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

*e-mail: ulimaeva.ar@yandex.ru

Поступила в редакцию: 14.12.2023

После доработки: 17.04.2024

Принята к публикации: 23.04.2024

В данной статье подробно рассмотрен такой термин, как «управление цепями поставок» (УЦП), день ото дня приобретающий все большую актуальность. Главной целью является проведение анализа системы УЦП в России с акцентом на выявление ключевых тенденций и вызовов, с которыми сталкиваются компании и организации в области логистики. А также подчеркивается важность УЦП как стратегического актива для современных предприятий. Для достижения цели исследования были использованы методы анализа текущего состояния УЦП, а также исследования тенденций в области логистики в российском контексте. Был проведен анализ данных, а также оценка влияния УЦП на эффективность, издержки и удовлетворение клиентов. В ходе исследования были выявлены основные проблемы в системе УЦП в России. УЦП оказалось неотъемлемой частью успешного функционирования предприятий, способствующей оптимизации снабжения, увеличению эффективности и снижению издержек. Это также позволяет компаниям адаптироваться к быстро меняющимся рыночным условиям, управлять рисками и повышать конкурентоспособность. УЦП представляет собой важное стратегическое направление для компаний, позволяя им не только обеспечивать гибкость в экономической среде, но и успешно справляться с возникающими трудностями. Поэтому внимание к системе УЦП является неотъемлемой частью стратегии развития современных организаций.

Ключевые слова: управление цепями поставок, оптимизация, бизнес-процесс, логистика, снабжение.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.296

EDN RCAJVC

ВВЕДЕНИЕ

В эпоху глобализации и неустойчивости рынков эффективное управление цепями поставок, иначе называемых УЦП, становится краеугольным камнем успешной бизнес-стратегии. В контексте Российской Федерации внедрение и развитие системы УЦП превращается в неотъемлемый аспект стремления компаний к устойчивости, конкурентоспособности и удовлетворению потребительских запросов.

Большинство экспертов считает, что причиной появления и развития концепции УЦП было стремление сократить риски и неопределенности, опиравшееся на модели сотрудничества и эшелонированного управления запасами [1, 2], которые находились на активной стадии развития в середине XX в., когда управление запасами выполняется одновременно на нескольких предприятиях. В 70–80-е гг. XX в. также активно развивалась концепция синхронизации процессов поставок, производства, известная как система Just-in-Time, что означает «точно вовремя».

В начале 2000-х в России появились первые русскоязычные переводы работ известных зарубежных авторов Д.М. Кристофера [3], Бауэрсокса и Д. Клосса [4], исследования которых были сосредоточены именно на стратегическом УЦП. В 2003 г. появилась первая книга по УЦП от российского автора Д.А. Иванова [5], в которой были рассмотрены конкретные технологии и задачи планирования УЦП. При этом самая цитируемая публикация [6] (по данным проекта CoLab) по тематике УЦП посвящена проблеме Управления **устойчивыми** цепочками поставок (*Sustainable supply chain management*).

Однако до сих пор среди логистических специалистов нет единого мнения о его полном определении. Некоторые [3, 4, 5, 7] рассматривают УЦП как интеграцию функциональных аспектов логистики, другие [1, 2] видят в нем концепцию управления распределением товаров, в то время как многие связывают это понятие с внедрением современных информационных платформ и методов управления цепью поставок с акцентом на ключевом предприятии. Также стоит отметить актуальную российскую

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК И ИХ АКТУАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В РОССИИ

специфику – логистическую ситуацию, секционное давление и особенности нормативно-правового регулирования, которые накладывают отпечаток на развитие УПЦ в РФ.

Несмотря на большой потенциальный научный фронт работ, в отечественной литературе данная тематика освещена пока крайне слабо. Такой вывод можно сделать исходя из анализа количества публикаций, индексируемых в РИНЦ со связанными ключевыми словами и сравнением с динамикой количества публикаций, рецензируемых в Scopus. Прежде чем перейти к описанию механизмов реализации системы управления цепями поставок, стоит ввести основные определения.

Бережливое Производство (БП) – системный подход к управлению производственными процессами, обеспечивающий конкурентоспособность предприятия за счет выпуска продукции в количестве, необходимом заказчику, при этом обладающим высоким качеством и с минимальными затратами ресурсов.

Цепь Поставок (ЦП) – совокупность компаний (три или более), персонала, информации, напрямую участвующих в процессе преобразования исходного материала в готовый продукт, а после – его доставки от поставщика до конечного потребителя [7].

Управление Цепями Поставок (УЦП) – совокупность наиболее важных бизнес-процессов, направленных на совмещение усилий всех участников ЦП для полного удовлетворения спроса потребителей максимально эффективным путем [3].

Устойчивое управление ЦП – стратегия управления, в которой приоритет уделяется не только экономической эффективности, но и учету воздействия на окружающую среду и социальной ответственности. В основе этой концепции лежит стремление к созданию более устойчивых и сбалансированных бизнес-процессов в цепи поставок, которые способствуют экономическому успеху, охране природы и общественной благополучности.

СОДЕРЖАНИЕ ПОНЯТИЯ «УПРАВЛЕНИЕ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК»

Полностью раскрывая определение, можно добавить, что УЦП – это совокупность таких бизнес-процессов, как:

1. Планирование производства и поставок. Определение объемов производства и поставок на основе спроса и наличия ресурсов.

2. Закупки. Поиск и выбор поставщиков, проведение тендеров и заключение контрактов на поставку товаров и услуг.

3. Логистика – часть управления ЦП. Интеграцию ключевых бизнес-процессов, начинающихся от конечного пользователя и охватывающих всех поставщиков товаров, услуг и информации, добавляющих ценность для потребителей и других заинтересованных лиц [8, 9].

4. Управление запасами. Оптимизация уровня запасов для минимизации затрат и обеспечения надлежащего уровня обслуживания потребителей.

5. Управление качеством. Контроль качества товаров на всех этапах цепочки поставок.

6. Обслуживание клиентов. Обеспечение надлежащего уровня обслуживания клиентов, включая решение проблем и обратную связь.

7. Анализ и оптимизация процессов. Использование данных и аналитики для выявления проблемных зон и оптимизации процессов управления цепью поставок.

8. Риск-менеджмент. Идентификация, анализ и минимизация потенциальных рисков на всех этапах цепи поставок, позволяя компании готовиться к непредвиденным обстоятельствам и быстро адаптироваться к изменяющимся условиям рынка.

9. Омниканальная дистрибуция. Разработка и реализация стратегий для обслуживания различных каналов сбыта и потребителей, обеспечение гибкостью в условиях меняющихся рыночных требований.

10. Кросс-функциональное сотрудничество. Поддержка активного взаимодействия между различными подразделениями и функциями внутри компании, что позволяет объединить усилия и достигать синергии в управлении цепями поставок.

Эволюция методов УЦП представляет собой динамичный и постоянно меняющийся процесс, направленный на достижение нескольких фундаментальных целей, а именно – превратить стратегическое управленческое направление в действующий живой организм, способный адаптироваться и процветать в современных условиях глобальной динамики и трансформации бизнес-пейзажа [10].

Существует несколько основных факторов, являющихся движущей силой, от которых и зависят изменения в цепях поставок.

Во-первых, одной из ключевых целей эволюции УЦП является оптимизация процессов и ресурсов. Организации стремятся минимизиро-

вать издержки, улучшить использование ресурсов, а также снизить время и затраты, необходимые для выполнения заказов и доставки товаров или услуг до конечных потребителей [11].

Во-вторых, эволюция УЦП направлена на повышение гибкости и адаптивности системы. Современные рыночные условия характеризуются быстрыми изменениями в требованиях клиентов и внешней среде, поэтому организации стремятся создать цепи поставок, способные оперативно реагировать на эти изменения, чтобы удовлетворить потребности клиентов и избежать потерь.

В-третьих, важной целью является снижение рисков. УЦП включает в себя множество потенциальных угроз, таких как: задержки в поставках, несоответствие качества продукции, изменения в законодательстве и др. Эволюция в этой области движется в сторону разработки стратегий и инструментов для идентификации, управления и снижения этих рисков [12].

Четвертой целью эволюции УЦП является улучшение сотрудничества и коммуникации внутри самой цепи. Действующие цепи поставок почти всегда включают множество участников, но, при этом, успешное управление требует эффективной коммуникации, обмена информацией и сотрудничества между всеми сторонами, включая поставщиков, производителей и распределителей.

Нельзя забывать об устойчивости и экологии. Растущая забота о планете и социальной ответственности компаний приводит к необходимости создания более экологичных и устойчивых цепочек поставок [13].

Наконец, эволюция управления цепями поставок также направлена на интеграцию современных технологий и инноваций, таких как: интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (ИИ), аналитика данных, блокчейн. Все способствует повышению эффективности, точности прогнозирования, улучшению мониторинга и управления процессами, а также обеспечивает лучшую видимость всей цепи поставок [14].

СТАДИИ РАЗВИТИЯ УЦП

Организация УЦП претерпевает существенные изменения на протяжении всего развития. Выделяют несколько основных этапов развития системы (рис. 1).

На первой стадии эволюции, иначе называемой «Множественной нескоординированностью», компании не имеют четкой стратегии УЦП и не стремятся ставить партнеров в курс

своих действий. Результатом такого подхода являются избыточный запас товаров, высокие затраты на логистику и низкая эффективность производства. Работают реактивно, т.е., реагируют на изменения внешней среды без предварительного планирования, что и приводит к непредсказуемости и неопределенности в работе. Компании на этой стадии не используют технологические инновации и не отслеживают изменения в мировой экономике, что делает их уязвимыми для конкурентов. На их действия также не оказывают влияния социальные и экологические аспекты управления цепями поставок.



Рис. 1. Стадии развития УЦП

На второй стадии – «Полуфункциональное предприятие» – компании уже осознают важность управления своими поставщиками, но еще не полностью координируют свои действия с партнерами, начинают использовать современное оборудование для автоматизации процессов и снижения затрат труда. Таким образом, эффективность производства увеличивается, а затраты снижаются. Однако на этой стадии компании все еще не обмениваются информацией о своих действиях с партнерами, что может привести к избыточным запасам товаров и высоким затратам на логистику. Кроме того, компании могут столкнуться с проблемой несоответствия качества продукции, если не контролировать производственные процессы у своих поставщиков.

Для того чтобы перейти на следующую стадию эволюции УЦП, компании должны начать координировать свои действия с партнерами и обмениваться информацией, следить за изменениями в мировой экономике, чтобы оставаться конкурентоспособными. Это позволит им точ-

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК И ИХ АКТУАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В РОССИИ

нее планировать производственные процессы и снижать затраты на логистику.

Третья стадия – «Интегрированное предприятие» – предполагает использование новых технологий для автоматизации процессов и прозрачности в ЦП и тесное сотрудничество и обмен информацией между компаниями, что позволяет точнее прогнозировать спрос и управлять запасами, а также улучшить качество продукции за счет контроля производственных процессов у поставщиков. На этой стадии компании достигают высокой эффективности и гибкости в УЦП, что позволяет им быстро реагировать на изменения в рыночных условиях и оставаться конкурентоспособными.

Четвертая стадия – «Расширенное предприятие» – ЦП как стратегическое преимущество. Информация и данные распространяются между звеньями ЦП в режиме реального времени с использованием унифицированных интерфейсов обмена информацией между информационными системами предприятий в ЦП, что позволяет компаниям точно прогнозировать спрос, управлять запасами и оптимизировать производственные процессы [15].

На этой стадии интеграции цепи поставок компании также начинают использовать новые технологии для управления качеством продукции. Например, они могут использовать системы автоматического контроля качества, которые мониторят производственные процессы и определяют несоответствия в реальном времени. В результате, расширенное предприятие позволяет компаниям достигать еще более высокой эффективности и гибкости в управлении цепями поставок, что является стратегическим преимуществом на рынке.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ПЕРЕХОДА УЦП НА НОВЫЕ УРОВНИ РАЗВИТИЯ

В ходе анализа были выявлены проблемы перехода УЦП на новые уровни развития, которые включены в концептуальную модель УЦП на рис. 2:

1). Существенное рассогласование текущего и целевого положения развития ЦП на многих предприятиях;

2). Недостаток квалифицированных специалистов в области УЦП, которые могут эффективно использовать новые технологии и инструменты;

3). Высокие затраты на внедрение новых технологий и обучение персонала, что может

ограничить доступ к этим инновациям для малых и средних предприятий;

4). Необходимость изменения корпоративной культуры и бизнес-процессов, чтобы адаптироваться к новым технологиям и инструментам УЦП;

5). Риски безопасности данных, связанные с использованием облачных вычислений и других цифровых технологий;

6). Отсутствие реализации требуемого прогностического инструментария и заявленных целей.

Это может зависеть от нескольких факторов.

Во-первых, недостаток сотрудничества и взаимодействия с поставщиками и другими участниками ЦП, что затрудняет внедрение БП на всех этапах производственного процесса.

Во-вторых, краткосрочная ориентация на прибыль, в ущерб долгосрочной стратегии развития.

В-третьих, отсутствие понимания со стороны потребителей о преимуществах БП, что может привести к низкому спросу на продукцию.

В-четвертых, низкий уровень технологической оснащенности;

7). И, наконец, наблюдаются расхождения между декларируемой приверженностью к бережливому производству и наблюдаемым практикам отказа от них.

Несмотря на то, что огромное количество компаний выражают свою заинтересованность и даже приверженность бережливому производству, их процессы и практики не соответствуют этому подходу. Для понимания причин возникновения данной ситуации стоит более детально рассмотреть плюсы и минусы БП.

БП обладает такими преимуществами, как:

1) увеличение эффективности – принципы БП способствуют оптимизации производственных процессов, что в свою очередь приводит к более эффективному использованию ресурсов и снижению потерь;

2) снижение затрат – БП помогает сократить издержки, такие как запасы, переработка и непроизводительное время, что способствует снижению общих расходов компании [16];

3) повышение качества – фокус на качестве в процессе производства и устранение дефектов позволяют улучшить качество конечных продуктов, что повышает удовлетворенность клиентов;

4) снижение времени выполнения заказов – принципы бережливости способствуют сокращению времени цикла выполнения заказов, что

позволяет быстрее реагировать на изменения в спросе;

5) улучшение условий труда, так как процессы производства становятся более безопасными и комфортными.

Но, при этом, существует ряд причин, по которым компании крайне неохотно относятся к возникающим изменениям в стратегии своего развития:

1. Значительная необходимость инвестиций. Внедрение БП потребует больших финансовых затрат на обновление оборудования и обучение персонала.

2. Отсутствие гибкости. Стремление к минимизации запасов и стандартизации процессов может снизить гибкость предприятия при реагировании на неожиданные изменения в рыночной ситуации.

3. Не всегда применимо. Бережливое производство может быть менее применимым в некоторых отраслях или сферах бизнеса, где процессы не могут быть так легко оптимизированы.

4. Недостаточное внимание к инновациям. Сосредоточенность на снижении затрат иногда может отвлечь внимание от инноваций и развития новых продуктов.

5. Необходимость изменения культуры компании. Особенно явно это можно проследить на примере больших корпораций.

Таким образом, плюсы и минусы «Бережливого Производства» должны быть рассмотрены в контексте конкретных компаний и сфер деятельности, чтобы принять обоснованные решения о его внедрении или дальнейшем развитии.

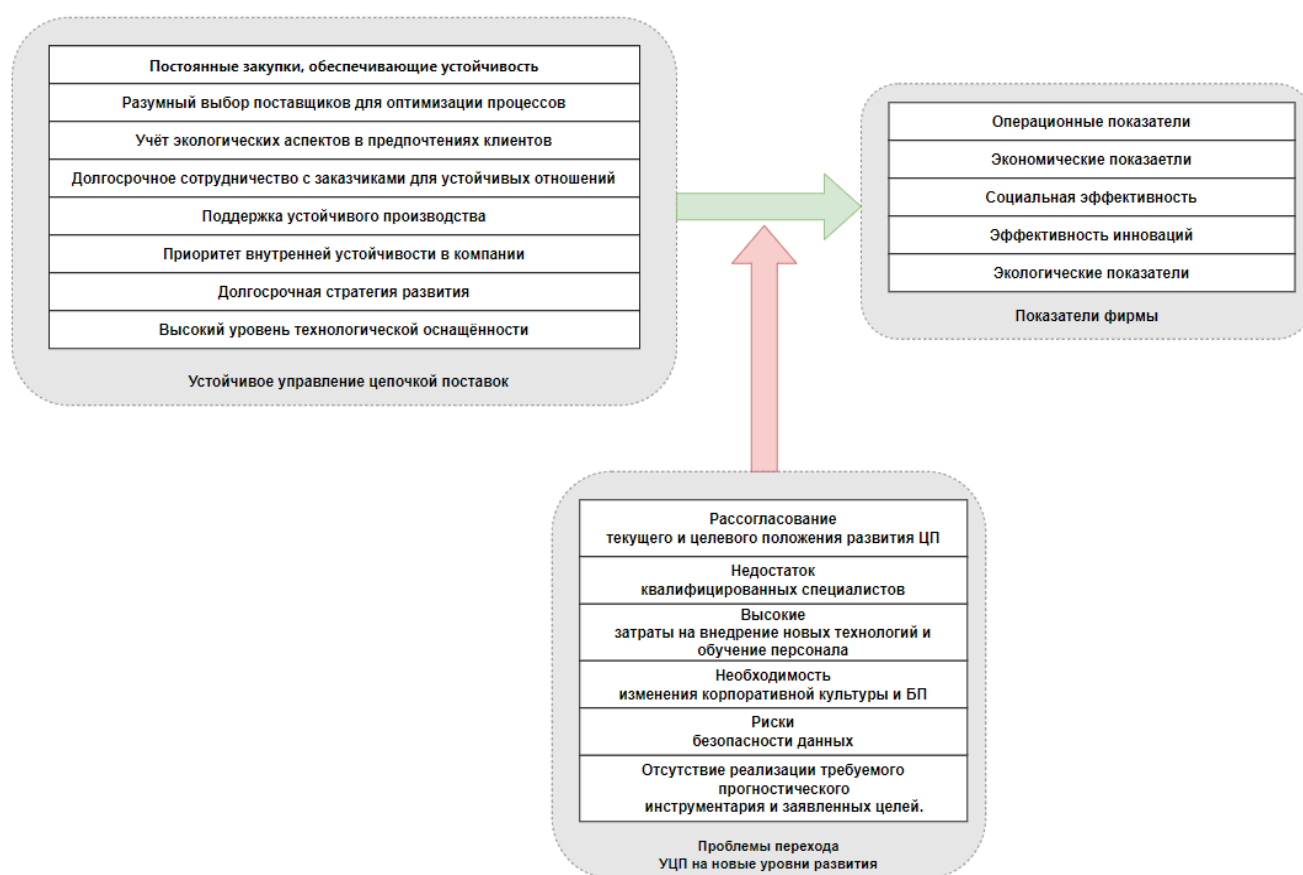


Рис. 2. Концептуальная модель УЦП

АНАЛИЗ НОРМАТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УЦП В РФ

В УЦП в России существует множество законодательных норм и регуляций, которые также оказывают существенное влияние на бизнес-

процессы компаний. Эти нормативные акты создают правовую основу для организации, контроля и оптимизации ЦП в стране. Ниже прописаны ключевые аспекты законодательного и регуляторного окружения, которые оказывают влияние на УЦП в России.

Гражданский кодекс РФ (ГК РФ): содержит основные нормы, регулирующие договоры купли-продажи и поставки товаров. Он определяет права и обязанности сторон и структуру таких договоров¹.

Таможенное законодательство: таможенные правила и нормы ограничивают и контролируют ввоз и вывоз товаров через таможенные границы России. Это включает в себя вопросы таможенной декларации, налогов, таможенных пошлин и контроля.

Налоговое законодательство: законы о налогах, такие как НДС и налог на прибыль, важны для бухгалтерской и налоговой отчетности в контексте цепей поставок².

Закон о контрактной системе в сфере закупок товаров, работ и услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд: регулирует государственные закупки и включает в себя процедуры проведения аукционов и заключения госконтрактов.

Антимонопольное законодательство: законы о конкуренции и монополиях ограничивают антимонопольные практики и способы доминирования на рынке.

Законодательство о защите прав потребителей: устанавливает права потребителей и обязанности поставщиков, включая процедуры возврата и обмена товаров.

Нормативные акты Росстандарта: Росстандарт устанавливает стандарты качества и безопасности продукции.

Логистические и транспортные правила: определяют требования к перевозке и хранению товаров³.

Регулирующие органы: различные государственные и негосударственные организации выпускают нормативные документы и рекомендации, влияющие на УЦП.

Все приведенные выше законы и нормативы формируют сложную среду для УЦП в России, поэтому в обязательном порядке должны учитываться организациями при разработке своих стратегий и процессов УЦП.

¹ Гражданский кодекс Российской Федерации от 26.01.1996 № 14-ФЗ. Часть вторая. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

² Налоговый кодекс Российской Федерации (НК РФ) от 31.07.1998 № 146-ФЗ. Часть первая. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

³ Федеральный закон от 09.02.2007 № 16-ФЗ «О транспортной безопасности». Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

КЛЮЧЕВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Система УЦП играет ключевую роль в современной экономике, обеспечивая эффективное движение товаров и услуг от производителей к потребителям. В России, как и во всем мире, она подвержена воздействию различных факторов, включая технологические инновации, изменения в законодательстве и изменения в потребительских предпочтениях. При подробном рассмотрении и анализе текущих тенденций можно представить прогнозы по развитию УЦП в ближайшем будущем.

Текущее состояние:

1. Цифровая трансформация.

Компании все чаще используют современные технологии (интернет вещей (IoT), аналитика данных, искусственный интеллект (ИИ) и блокчейн) для оптимизации процессов управления цепями поставок, что позволяет улучшить прогнозирование спроса, управление запасами и мониторинг поставок в режиме реального времени [17].

2. Устойчивость цепей поставок.

События, такие как глобальная пандемия COVID-19, подчеркнули важность устойчивости ЦП [18]. Но, несмотря на это, глобальный рынок УЦП растет со среднегодовым темпом роста 11,2 % с 2020 по 2027 гг. (Businesswire, 2020) [19, с. 3–5]. Компании в России стали более внимательными к диверсификации поставщиков и созданию резервных складов для обеспечения непрерывности поставок.

Что касается перспектив развития, то особенно хотелось бы выделить:

1. Развитие технологий.

В ближайшем будущем ожидается продолжение интенсивного развития технологий, в частности, в области искусственного интеллекта и автоматизации процессов. Это позволит компаниям в России более точно прогнозировать спрос, оптимизировать маршруты доставки и управлять запасами.

2. Увеличение уровня сервиса.

Клиенты становятся все более требовательными к качеству обслуживания и скорости доставки. В связи с этим, компании в России будут работать над улучшением уровня сервиса, включая быструю доставку и удобные опции отслеживания товаров.

3. Улучшение управления рисками.

Управление рисками остается приоритетной задачей. Компании будут активно разрабатывать стратегии управления рисками, чтобы

справляться с возможными непредвиденными событиями, такими как санкции, кризисы или изменения в законодательстве [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

УЦП в России продолжает эволюционировать, что предоставляет множество новых возможностей для оптимизации бизнес-процессов и удовлетворения потребностей клиентов для российских компаний. Однако, они также сталкиваются с вызовами в виде управления рисками и обеспечения высокого уровня сервиса. Исходя из данного анализа, можно сделать вывод, что успешными станут те организации, которые будут активно адаптироваться к изменяющейся среде и инвестировать в развитие УЦП, чтобы оставаться конкурентоспособными на рынке России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geoffrion A., Graves G. Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition // *Management Science*, 1974. V. 29. № 5. P. 822–844.
2. Harrison T.P., Lee H.L., Neale J.J. Principles for the strategic design of supply chains // *The Practice of Supply Chain Management*. New York: Springer, 2005. P. 3–12.
3. Кристофер М. Логистика и управление цепочками поставок / Пер. с англ. СПб.: Питер, 2004. С. 29.
4. Бауэрсокс Д., Клосс Д. Логистика. Интегрированная цепь поставок. М.: ЗАО Олимп-бизнес, 2001.
5. Иванов Д.А. Виртуальные предприятия и логистические цепи: комплексный подход к организации и оперативному управлению в новых формах производственной кооперации. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2003.
6. Seuring S., Müller M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management // *Journal of Cleaner Production*, 2008. V. 16. Iss. 15. P. 1699–1710.
7. Харрингтон Дж., Эсселинг К.С., Ван Нимвеген Х. Оптимизация бизнес-процессов. Документирование, анализ, управление, оптимизация. СПб.: Азбука, 2002. 171 с.
8. Дыбская В.В., Зайцев Е.И., Сергеев В.И., Стерлигова А.Н. Логистика: Учебник / Под ред. В.И. Сергеева. М.: Эксмо, 2008. 944 с.
9. Мельников О.Н. Логистика интеллектуально-креативной деятельности при организации выполнения бизнес-проектов // *Российское предпринимательство*, 2013. № 24 (246). С. 153–158.
10. Brau J.C., Fawcett S.E., Morgan L. An empirical analysis of the financial impact of supply chain management on small firms // *Journal of Entrepreneurial Finance, JEF*. V. 12. Iss. 1. 2007. P. 56–81.
11. Emrouznejad A., Abbasi S., Sıcakyüz Ç. Supply chain risk management: A content analysis-based review of existing and emerging topics // *Supply Chain Analytics*, 2023. V. 3. 100031.
12. Aljabhan B. Economic strategic plans with supply chain risk management (SCRM) for organizational growth and development // *Alexandria Engineering Journal*, 2023. P. 411–426.
13. Akhmatovaa M.-S., Deniskinaa A., Akhmatovab D.-M., Kapustkina A. Green SCM and TQM for reducing environmental impacts and enhancing performance in the aviation spares supply chain // *Science Direct*, 2022.
14. Pana Sh., Trentesaux D., McFarlanec D., Montreuil B., Ballot E., Huang G. Q. Digital interoperability in logistics and supply chain management: state-of-the-art and research avenues towards Physical Internet // *Computers in Industry*, 2021.
15. Уотерс Д. Логистика. Управление цепью поставок / Пер. с англ. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. С. 32.
16. Вумек Дж.П., Джонс Д.Т. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. 2-е изд. / Пер. с англ. М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. 473 с.
17. Tsang Y.P., Yang T., Chen Z.S., Wu C.H., Tan K.H. How is extended reality bridging human and cyber-physical systems in the IoT-empowered logistics and supply chain management. *Internet of Things*, 2022.
18. Choudhury N. A., Ramkumar M., Schoenherr T., Singh Sh. The role of operations and supply chain management during epidemics and pandemics: Potential and future research opportunities // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023.
19. Kilpatrick J., Barter L. COVID-19: Managing supply chain risk and disruption. P. 1–2 // *Journal of Service Science and Management*, 2021. V. 14. № 1.
20. Meyer K.E., Fang T., Panibratov A.Y., Peng M.W., Gaur A. International business under sanctions // *Journal of World Business*, 2023.

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF THE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT SYSTEM AND ITS CURRENT STATE IN RUSSIA

A.R. Ulimaeva^{1*}, D.S. Smirnov¹

¹ National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia

*e-mail: ulimaeva.ar@yandex.ru

Received December 14, 2023; revised April 17, 2024; accepted April 23, 2024

The work examines in detail the term «supply chain management» (SCM), which is becoming more and more relevant every day. The main goal of the study is to analyze the SCM system in Russia, focusing on identifying key trends and challenges faced by companies and organizations in the field of logistics. The importance of SCM as a strategic asset for modern enterprises is also highlighted. To achieve this goal, methods such as analyzing the current state of SCM and studying trends in logistics in the Russian context were used. Data analysis and assessment of the impact of SCM on efficiency, costs, and customer satisfaction were conducted. The study also identified the main problems in the SCM system in Russia and demonstrated how SCM is an integral part of successful enterprise operation, contributing to supply optimization and increased efficiency. It also allows companies to adapt to rapidly changing market conditions and manage risks, increasing their competitiveness. SCM is an important strategic direction for companies, providing them with flexibility in the economic environment and helping them to successfully cope with emerging challenges. Therefore, attention to the SCM system is an integral part of the development strategy for modern organizations.

Keywords: Supply Chain Management; optimization; business process; logistics; provision.

REFERENCES

1. Geoffrion A., Graves G. Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition. *Management Science*, 1974. Vol. 29. No. 5. Pp. 822–844.
2. Harrison T.P., Lee H.L., Neale J. J. Principles for the strategic design of supply chains. *The Practice of Supply Chain Management*. New York: Springer, 2005. Pp. 3–12.
3. Kristofer M. Logistika i upravlenie epochkami postavok: per. s angl. [Logistics and supply chain management: transl. from English]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2004. P. 29 [in Russian].
4. Bauersoks D., Kloss D. Logistika. Integrirovannaya cep' po stavok [Logistics. Integrated Supply Chain]. Moscow, ZAO Olimp-biznes Publ., 2001 [in Russian].
5. Ivanov D.A. Virtual'nye predpriyatiya i logisticheskie cepi: kompleksnyj podhod k organizacii i operativnomu upravleniyu v novyh formah proizvodstvennoj kooperacii [Virtual enterprises and supply chains: an integrated approach to organization and operational management in new forms of industrial cooperation]. Saint Petersburg, Izd-vo SPbGUEF Publ., 2003 [in Russian].
6. Seuring S., Müller M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 2008. Vol. 16, Iss. 15. Pp. 1699–1710.
7. Harrington Dzh., Esseling K.C., Van Nimwegen H. Optimizaciya biznes-processov. Dokumentirovanie, analiz, upravlenie, optimizaciya [Optimization of business processes. Documentation, analysis, management, optimization]. Saint Petersburg, Azbuka Publ., 2002. 171 p. [in Russian].
8. Dybskaya V.V., Zajcev E.I., Sergeev V.I., Sterligova A.N. Logistika: Uchebnik / pod red. V.I. Sergeeva [Logistics: Textbook / ed.]. Moscow, Eksmo Publ., 2008. 944 p. [in Russian].
9. Mel'nikov O.N. Logistika intellektual'no-kreativnoj deyatel'nosti pri organizacii vypolneniya biznes-proektov [Logistics of intellectual and creative activities when organizing the implementation of business projects]. *Rossijskoe predprinimatel'stvo*, 2013. No. 24 (246). Pp. 153–158 [in Russian].
10. Brau J.C., Fawcett S.E., Morgan L. An empirical analysis of the financial impact of supply chain management on small firms. *Journal of Entrepreneurial Finance*, JEF, 2007. Vol. 12. Iss. 1. Pp. 56–81.
11. Emrouznejad A., Abbasi S., Sıcakyüz Ç. Supply chain risk management: A content analysis-based review of existing and emerging topics. *Supply Chain Analytics*, 2023. Vol. 3. 100031.
12. Aljabhan B. Economic strategic plans with supply chain risk management (SCRM) for organizational

growth and development. *Alexandria Engineering Journal*, 2023. Pp. 411–426.

13. Akhmatovaa M.-S., Deniskinaa A., Akhmatovab D.-M., Kapustkina A. Green SCM and TQM for reducing environmental impacts and enhancing performance in the aviation spares supply chain. *Science Direct*, 2022.

14. Pana Sh., Trentesaux D., McFarlanec D., Montreuil B., Ballot E., Huang G. Q. Digital interoperability in logistics and supply chain management: state-of-the-art and research avenues towards Physical Internet. *Computers in Industry*, 2021.

15. Uoters D. *Logistika. Upravlenie cep'yu postavok*: per. s angl. [Logistics. Supply chain management: trans. from English]. Moscow, YuNITI-DANA Publ., 2003. P. 32 [in Russian].

16. Vumek Dzh.P., Dzhons D.T. Berezhlivoe proizvodstvo: Kak izbavit'sya ot poter' i dobit'sya procvetaniya vashej kompanii, 2-e izd., per. s angl.

[Lean Manufacturing: How to Eliminate Waste and Make Your Company Prosper. 2nd ed., trans. from English]. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2005. 473 p. [in Russian].

17. Tsang Y.P., Yang T., Chen Z.S., Wu C.H., Tan K.H. How is extended reality bridging human and cyber-physical systems in the IoT-empowered logistics and supply chain management. *Internet of Things*, 2022.

18. Choudhury N.A., Ramkumar M., Schoenherr T., Singh Sh. The role of operations and supply chain management during epidemics and pandemics: Potential and future research opportunities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2023.

19. Kilpatrick J., Barter L. COVID-19: Managing supply chain risk and disruption. P. 1–2. *Journal of Service Science and Management*, 2021. Vol. 14. No. 1.

20. Meyer K.E., Fang T., Panibratov A.Y., Peng M.W., Gaur A. International business under sanctions. *Journal of World Business*, 2023.

УДК 519.254

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

К.Я. Кудрявцев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия
e-mail: KYKudryavtsev@mephi.ru

Поступила в редакцию: 14.04.2024

После доработки: 15.04.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

Предлагается методика применения цифровых фильтров для классификации управляющих сигналов в режиме реального времени. Сигналы могут поступать от различных управляющих датчиков, установленных на управляемом устройстве, например мобильном роботе. Управляющие сигналы поступают от датчиков, подвергаются обработке, классификации, и в дальнейшем используются для управления мобильным робототехническим устройством. Существует большое количество алгоритмов классификации сигналов, в основе которых лежит выделение характерных особенностей сигнала, таких как амплитуда, частота, среднее значение и др. Большинство алгоритмов классифицируют сигналы на основе характеристик (features) во временном домене. В данной работе предлагается использовать частотные характеристики сигнала и на их основе осуществлять классификацию, применяя узкополосные «гребенчатые» цифровые фильтры. Базовые частоты управляющего сигнала находятся на предварительном этапе с помощью быстрого преобразования Фурье. После того как базовые частоты определены, процесс классификации заключается в фильтрации сырого сигнала набором цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров. Такой подход позволяет классифицировать управляющие воздействия «на лету» в режиме реального времени. Цифровые фильтры могут быть использованы для классификации различных видов сигналов, которые в дальнейшем преобразуются в управляющие команды для мобильного робототехнического устройства.

Ключевые слова: цифровая фильтрация, классификация сигналов, преобразование Фурье, Z-преобразование.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.314

EDN RETWVK

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время человеко-машинные интерфейсы на основе голоса, жестов, ВСИ получают все более широкое распространение [1–3], так как позволяют значительно расширить возможности управления мобильными робототехническими устройствами, особенно для людей с ограниченными возможностями. Однако, несмотря на достигнутый значительный прогресс, существует большое количество проблем при реализации подобных интерфейсов. Принцип управления с помощью человеко-машинного интерфейса заключается в классификации исходного сигнала, получаемого с датчиков, и дальнейшей интерпретации результатов такой классификации в виде их отображения на пространство управляющих команд. Основная проблема классификации сигналов заключается в том, что в сигнале содержится большое количе-

ство помех, приводящих к тому, что сигналы становятся трудноразличимы.

Для реализации классификации необходимо из исходного («сырого») сигнала выделить показатели (features), которые позволяют с определенной степенью уверенности соотнести сигнал с определенным классом и командой. В качестве простого примера можно рассмотреть сигналы, возникающие при сгибании пальцев руки. Если максимальные или средние амплитуды сигналов окажутся различными, то амплитуду можно использовать для классификации сигналов. С другой стороны, если базовые частоты сигналов окажутся различными, то базовую частоту также можно использовать для классификации сигналов. Алгоритмов поиска характеристик (features) сигналов существует большое количество [4–8]. Их можно разделить на три основные группы:

- алгоритмы поиска характеристик во временном домене;

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

- алгоритмы поиска характеристик в частотном домене на основе преобразования Фурье;
- алгоритмы поиска характеристик на основе вейвлет-преобразования.

После того как характеристики (features) определены, их можно использовать для классификации и управления мобильным робототехническим устройством. Однако для вычисления характеристик поступающего рабочего сигнала требуется его полностью считать и далее произвести вычисление характеристики, например, найти среднюю амплитуду. В режиме реального времени это может оказаться ресурсоемкой задачей. Поэтому желательно иметь методы вычисления характеристик, не требующих больших временных затрат.

В данной работе предлагается использовать в качестве характеристик управляющего сигнала базовые частоты, которые находятся с помощью быстрого преобразования Фурье. Определение базовых частот для разного типа сигналов осуществляется на предварительном этапе в процессе обучения оператора работе с мобильным робототехническим устройством. После того как базовые частоты определены, процесс классификации заключается в фильтрации сырого сигнала набором цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров. Сигнал высокого уровня будет присутствовать на выходе только того фильтра, который будет пропускать базовые частоты входного сигнала. На выходе остальных фильтров уровень сигнала будет низким. Использование цифровых фильтров позволяет классифицировать управляющие воздействия «на лету» в режиме реального времени. Далее описывается математический аппарат для классификации сигналов с помощью цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров.

ПОИСК ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОМ ДОМЕНЕ

Пусть $x(t)$ – сигнал, считываемый на временном интервале $[t_0, t_1]$, с шагом дискретизации T . Количество отсчетов по времени сигнала $x(t)$ равно $N = \frac{t_1 - t_0}{T}$. Частотное представление сигнала основано на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ) и записывается как [7]

$$X(\omega) = T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-j\omega T n}. \quad (1)$$

Следует отметить, что $X(\omega)$ – периодическая функция с периодом $P = \frac{2\pi}{T}$. Для вычисления

$X(\omega)$ диапазон частот $\left[0, \frac{2\pi}{T}\right]$ разбивается на N интервалов с шагом $\delta = \frac{2\pi}{TN}$, и вычисляются значения $X(\omega_k)$, где $\omega_k = k\delta = k \frac{2\pi}{TN}$, $k = 0, 1, \dots, (N-1)$.

$$\begin{aligned} X(k\delta) &= T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-jk\delta T n} = \\ &= T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-jk \frac{2\pi}{TN} T n} = \\ &= T \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}; \\ k &= 0, 1, \dots, (N-1). \end{aligned} \quad (2)$$

Вычисление ДПФ выполняется с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ), в основе которых лежит свойство периодичности комплексной экспоненты $e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}$ и перегруппировка слагаемых. Итак, если задан временной диапазон и шаг дискретизации по времени T , то спектр сигнала вычисляется с шагом $\delta = \frac{2\pi}{TN}$. Диапазон спектра составляет $\omega \in \left[0, \frac{2\pi}{T}\right]$ или $\omega \in \left[-\frac{\pi}{T}, \frac{\pi}{T}\right]$. При использовании линейной частоты $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ спектр находится в диапазоне $f \in \left[0, \frac{1}{T}\right]$ или $f \in \left[-\frac{1}{2T}, \frac{1}{2T}\right]$. В результате применения БПФ вычисляется спектр сигнала, т.е. набор комплексных величин:

$$\begin{aligned} Spectr &= \left[X(0), X\left(\frac{2\pi}{TN}\right), X\left(2 \frac{2\pi}{TN}\right), \dots, \right. \\ &\quad \left. X\left((N-1) \frac{2\pi}{TN}\right) \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Спектр сигнала находится при значениях «круговых частот»

$$\omega = \left[0, \frac{2\pi}{TN}, 2 \frac{2\pi}{TN}, \dots, (N-1) \frac{2\pi}{TN} \right]. \quad (4)$$

При этом значения «линейных частот» f будут равны

$$f = \left[0, \frac{1}{TN}, 2 \frac{1}{TN}, \dots, (N-1) \frac{1}{TN} \right]. \quad (5)$$

Для комплексных величин спектра нетрудно установить соотношение

$$X((N-k)\delta) = X^*(k\delta). \quad (6)$$

из которого следует, что на интервале $[t_0, t_1]$ наблюдается симметрия амплитуд спектральных величин относительно середины частотного интервала, т.е. относительно частоты $\frac{1}{2T}$.

Если частотный интервал выбрать симметричным относительно нуля, т.е. $f \in \left[-\frac{1}{2T}, \frac{1}{2T}\right]$, то зависимость амплитуды спектра от частоты будет симметрична относительно оси ординат. Что касается зависимости фазы от частоты, то для диапазона частот $f \in \left[-\frac{1}{2T}, 0\right]$ она берется со знаком минус по отношению к фазе в диапазоне $\left[0, \frac{1}{2T}\right]$. В связи с этим ДПФ вычисляют только для диапазона $f \in \left[0, \frac{1}{2T}\right]$.

На предварительном этапе выполняется БПФ исходного сигнала, и выбираются базовые частоты (возможно, это будет только одна частота), которые будут описывать данный сигнал и которые можно рассматривать как характеристики сигнала в частотном домене. Выбор базовых частот выполняется для всех классов сигналов. Таким образом, предварительный этап заканчивается формированием набора базовых частот для каждого класса сигналов. Результаты предварительного этапа можно представить в следующем виде:

Класс_1: $f_{11}; f_{12}; \dots f_{1k}$
 Класс_2: $f_{21}; f_{22}; \dots f_{2k}$
 ...
 Класс_n: $f_{n1}; f_{n2}; \dots f_{nk}$

Данные частоты будут в дальнейшем использоваться для классификации сигналов.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Цель любой фильтрации состоит в выделении «существенной» части сигнала, очистки его от шумов, помех, наложений. В данной работе цифровая фильтрация будет использована для выделения «значимых» частот («значимой» частоты) исходного сигнала и дальнейшей классификации сигналов. В основе данного подхода лежит гипотеза, что каждый класс имеет уникальный набор «характерных» частот [8], которые будут определены на предварительном этапе.

Исходный сигнал одновременно поступает на несколько узкополосных гребенчатых фильтров, каждый из которых настроен на выделение характерных частот определенного жеста. Например, фильтр для класса под номером i будет выделять частоты $f_{i1}; f_{i2}; \dots f_{ik}$. Таким образом, если на вход этого фильтра поступает сигнал, обусловленный классом под номером i , то на выходе этого фильтра будет сигнал с амплитудой, значительно превышающей амплитуду

ды сигналов на выходе других фильтров, так как они настроены на пропуск других частот. Это позволит выполнять фильтрацию «на лету», обеспечив тем самым минимальное время для классификации поступающих сигналов.

Таким образом, с помощью n цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров выделяются «значимые» частоты из сигнала $x(t)$. Амплитуда отфильтрованного сигнала на одном из фильтров должна быть существенно больше остальных. С помощью порогового элемента выбирается данный сигнал, и тем самым осуществляется его классификация.

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ

Для создания цифровых узкополосных «гребенчатых» фильтров предлагается использовать полосовые БИХ-фильтры [9]. Одним из наиболее простых способов расчета коэффициентов таких фильтров является метод размещения нулей и полюсов передаточной функции фильтра.

Как было указано ранее, при шаге дискретизации T необходимо найти передаточную функцию цифрового фильтра в диапазоне «линейных частот»:

$$f \in \left[0, \frac{1}{2T}\right]. \quad (7)$$

Полосовой фильтр должен пропускать сигнал на определенной частоте и подавлять все остальные частоты. Передаточная функция цифрового фильтра в общем случае представима в виде

$$H(z) = \frac{K \prod_{k=1}^n (z - z_k^0)}{\prod_{k=1}^n (z - z_k^p)}, \quad (8)$$

где z_k^0 – нули передаточной функции; z_k^p – полюса передаточной функции $k = 1, 2, \dots, n$; K – константа; $z = e^{j2\pi T f}$ – комплексная переменная.

Положим $n = 2$ и используем передаточную функцию второго порядка:

$$H(z) = \frac{(z - z_1^0)(z - z_2^0)}{(z - z_1^p)(z - z_2^p)}. \quad (9)$$

Для подавления сигнала на краях частотного диапазона $\left[0, \frac{1}{2T}\right]$ предлагается разместить нули при $f = 0$ и $f = \frac{1}{2T}$. Тогда

$$\begin{aligned} z_1^0 &= e^{j2\pi T \cdot 0} = 1, \\ z_2^0 &= e^{j2\pi T \cdot \frac{1}{2T}} = e^{j\pi} = -1. \end{aligned} \quad (10)$$

Для пропуска сигнала при заданной частоте предлагается разместить два комплексно-сопряженных полюса следующего вида:

$$z_1^p = re^{j2\pi T f_p}, \quad z_2^p = re^{-j2\pi T f_p}, \quad (11)$$

где f_p – частота пропускания, $r \approx 1 - ST\pi$, S [Гц] – ширина полосы пропускания полосового фильтра. Таким образом, получаем передаточную функцию цифрового фильтра в виде [10]:

$$H(z) = \frac{(z-1)(z+1)}{(z-re^{j2\pi T f_p})(z-re^{-j2\pi T f_p})}. \quad (12)$$

Для получения коэффициентов цифрового фильтра выполним преобразования $H(z)$:

$$\begin{aligned} H(z) &= \frac{z^2 - 1}{z^2 - zr(e^{j2\pi T f_p} + e^{-j2\pi T f_p}) + r^2} = \\ &= \frac{z^2 - 1}{z^2 - 2zr\cos(2\pi T f_p) + r^2} = \\ &= \frac{1 - z^{-2}}{1 - 2r\cos(2\pi T f_p)z^{-1} + r^2z^{-2}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Разностное уравнение цифровой фильтрации может быть представлено как

$$y(n) = 2r\cos(2\pi T f_p)y(n-1) - r^2y(n-2) + x(n) - x(n-2), \quad (14)$$

где $x(n) = x(nT)$ – входной сигнал; $y(n) = y(nT)$ – отфильтрованный сигнал.

Так, например, для полосового фильтра, который пропускает сигнал на частоте 50 Гц, с шириной полосы пропускания $S = 5$ Гц разностное уравнение цифровой фильтрации будет иметь вид

$$y(n) = -0.877y(n-2) + x(n) - x(n-2), \quad (15)$$

где $x(n)$ – входной сигнал; $y(n)$ – отфильтрованный сигнал.

На рис. 1 представлена амплитудно-частотная характеристика полосового фильтра, который из диапазона [0, 250 Гц] пропускает сигнал на частоте 50 Гц.

При разных частотах пропускания f_p и ширине полосы пропускания S каждый из цифровых фильтров выделяет сигнал на определенной частоте. Если исходный сигнал не содержит заданную частотную составляющую, то на выходе соответствующего фильтра амплитуда отфильтрованного сигнала будет близка к нулю. При классификации выбирается тот канал, на выходе которого сигнал имеет максимальную амплитуду.

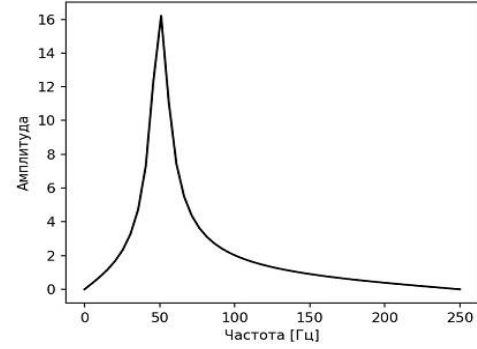


Рис. 1. АЧХ полосового фильтра

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ

Тестирование предложенной методики выполнялось с помощью программы, написанной на языке Python 3.7. Предположим, что каждый класс сигналов представляет собой синусоиду определенной частоты (5, 20, 35, 50 Гц). Было выбрано четыре класса сигналов-синусоид, переключение между которыми осуществлялось нажатием на клавиши <Up>, <Down>, <Left>, <Right>:

<Up> – 5 Гц; <Down> – 20 Гц;
<Left> – 35 Гц; <Right> – 50 Гц.

Сигнал испускался в диапазоне [0, 0.5 с], шаг дискретизации входного сигнала составлял 0,002 с. В соответствии с формулой (14) было создано четыре узкополосных цифровых фильтров с частотой пропускания 5, 20, 35, 50 Гц и шириной полосы пропускания $S = 5$ Гц. Переключение между классами сигналов приводило к тому, что одновременно на выходе только одного из фильтров амплитуда сигнала была существенно выше, чем на выходе остальных. Пример работы программы приведен на рис. 2, 3 и 4. В левом верхнем углу отображается исходный сигнал заданной частоты, в правом верхнем – выходной сигнал соответствующего фильтра, а внизу – выходные сигналы остальных узкополосных цифровых фильтров.

Так, на рис. 2 выбран входной сигнал с частотой 5 Гц, единичной амплитуды. Выход фильтра 1 (Filter_1), который пропускает частоту 5 Гц, имеет также единичную амплитуду. Амплитуда на выходах остальных фильтров на порядок ниже. На рис. 3 выбран входной сигнал с частотой 20 Гц. В этом случае единичную амплитуду имеет сигнал на выходе фильтра 2 (Filter_2), который пропускает частоту 20 Гц. На рис. 4 выбран входной сигнал с частотой 50 Гц. В этом случае единичную амплитуду имеет сигнал на выходе фильтра 4 (Filter_4), который пропускает частоту 50 Гц.

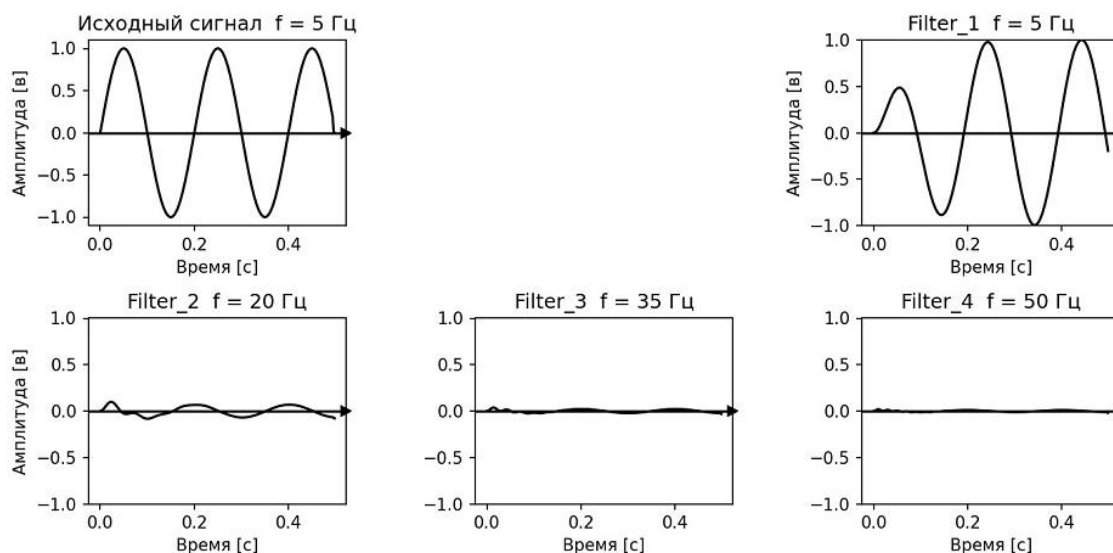


Рис. 2. Фильтрация сигнала на частоте 5 Гц

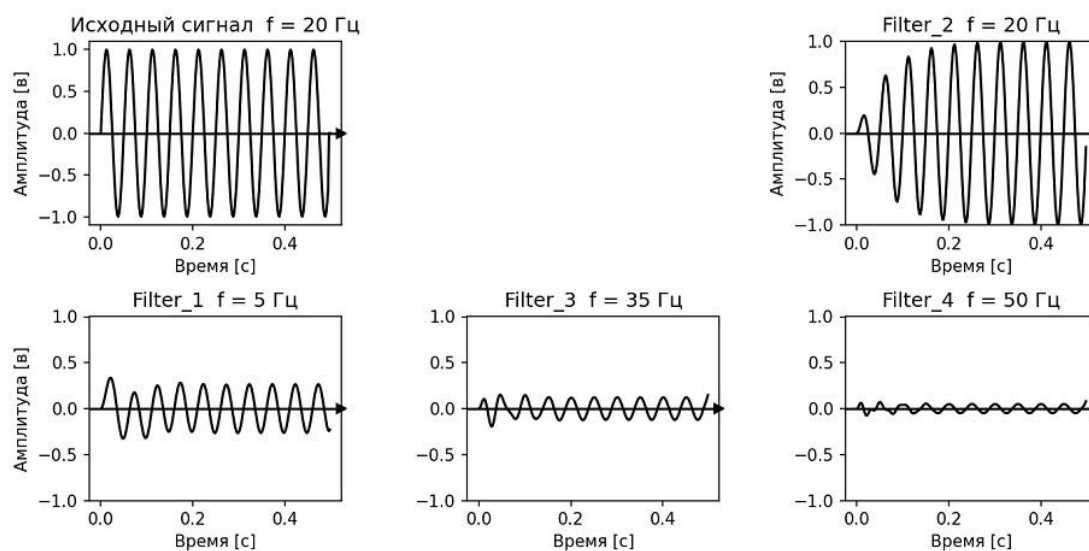


Рис. 3. Фильтрация сигнала на частоте 20 Гц

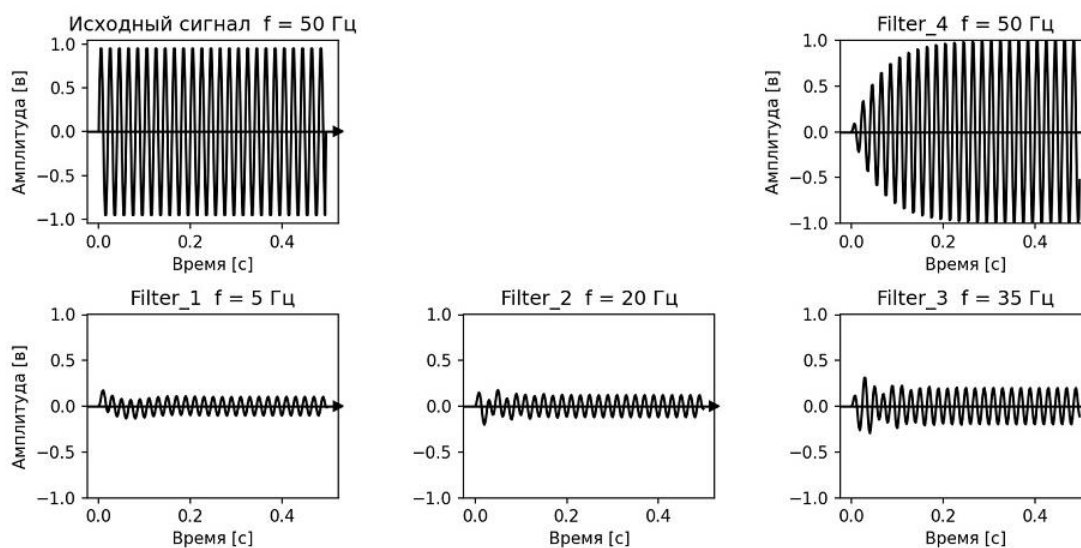


Рис. 4. Фильтрация сигнала на частоте 50 Гц

Тем самым получено экспериментальное подтверждение предложенной методики классификации сигналов в режиме реального времени на основе узкополосных цифровых фильтров.

ВЫВОДЫ

В данной работе предложено и экспериментально проверено использование узкополосных «гребенчатых» цифровых фильтров для классификации сигналов на основе их частотных характеристик. Данный подход позволяет классифицировать сигналы «на лету» в режиме реального времени. Выбор частотных характеристик сигналов и настройка узкополосных «гребенчатых» цифровых фильтров выполняется на предварительном этапе. Данную методику планируется использовать для классификации сигналов, формирующихся в результате жестов и субвокального произношения команд, с дальнейшим преобразованием в управляющие команды для мобильного робототехнического устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kapur A., Kapur S., Maes P. *Alterego*: A personalized wearable silent speech interface // In 23rd International conference on intelligent user interfaces, 2018, P. 43–53. DOI: 10.1145/3172944.3172977.
2. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V. The Decomposition Method of Multi-channel Control System Based on Extended BCI for a Robotic Wheelchair // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, V. 948. P. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_73.
3. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Chepin E.V., Kudryavtsev K.Y. The command interpretation in decomposition method of multi-channel control for a robotic device // *Procedia Computer Science*, 2020. V. 169, P. 152–157. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.127.
4. Khokhar Z.O., Xiao Z.G., Menon C. Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton // *Biomedical engineering online*, 2010. V. 9, № 1, P. 1–17. DOI: 10.1186/1475-925X-9-41.
5. Soledad G. Alternative Feature Selection Methods in Machine Learning. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kdnuggets.com/2021/12/alternative-feature-selection-methods-machinelearning> (дата обращения: 04.04.2022).
6. Brownlee J. How to choose a feature selection method for machine learning // *Machine Learning Mastery*, 2019. V. 10.
7. Тагунов В.В., Кудрявцев К.Я., Петрова А.И., Возненко Т.И. Методика выбора входных признаков для алгоритмов машинного обучения // *Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ*, 2022. Т. 11. № 1. С. 51–58. DOI: 10.56304/S2304487X22010114.
8. Igrevskaia A., Kachina A., Petrova A., Kudryavtsev K. The Research of Characteristic Frequencies for Gesture-based EMG Control Channels. In: Klimov V.V., Kelley D.J. (eds). *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2021*. BICA 2021: 2022, 623 p. DOI: 10.1007/978-3-030-96993-6_14
9. Ifeakor E.C., Jervis B.W. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. Pearson Education, 2002. 933 p.
10. Айфичер Э.С., Джервис У. *Цифровая обработка сигналов: практический подход / Пер. с англ.* М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 992 с.

USING DIGITAL FILTERS FOR REAL-TIME SIGNAL CLASSIFICATION

K.Ya. Kudryavtsev

National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia
e-mail: KYKudryavtsev@mephi.ru

Received April 14, 2024; revised April 15, 2024; accepted May 14, 2024

A technique for using digital filters to classify control signals in real time is proposed. Signals can come from various control sensors installed on a controlled device, such as a mobile robot. Control signals come from sensors, are processed, classified, and are subsequently used to control a mobile robotic device. There are a large number of signal classification algorithms, which are based on identifying the characteristic features of the signal, such as amplitude, frequency, average value, etc. Most algorithms classify signals based on characteristics in the time domain. In this work, it is proposed to use the frequency characteristics of the signal and, on their basis, carry out classification using narrow-band «comb» digital filters. The base frequencies of the control signal are pre-staged using fast Fourier transform. Once the base frequencies are determined, the classification process consists of filtering the raw

signal with a set of digital narrow-band «comb» filters. This approach allows you to classify control actions «on the fly» in real time. Digital filters can be used to classify different types of signals, which are further converted into control commands for a mobile robotic device.

Keywords: Digital filtering, signal classification, Fourier transform, Z-transform.

REFERENCES

1. Kapur A., Kapur S., Maes P. *Alterege*: A personalized wearable silent speech interface. In 23rd International conference on intelligent user interfaces, 2018. Pp. 43–53. DOI:10.1145/3172944.3172977.
2. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V. The Decomposition Method of Multi-channel Control System Based on Extended BCI for a Robotic Wheelchair. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 948. Pp. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_73.
3. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Chepin E.V., Kudryavtsev K.Y. The command interpretation in decomposition method of multi-channel control for a robotic device. *Procedia Computer Science*, 2020. Vol. 169. Pp. 152–157. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.127.
4. Khokhar Z.O., Xiao Z.G., Menon C. Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton. *Biomedical engineering online*, 2010. Vol. 9. No. 1. Pp. 1–17. DOI:10.1186/1475-925X-9-41.
5. Soledad G. Alternative Feature Selection Methods in Machine Learning. Available at: <https://www.kdnuggets.com/2021/12/alternative-feature-selection-methods-machinelearning> (accessed: 04.04.2022).
6. Brownlee J. How to choose a feature selection method for machine learning. *Machine Learning Mastery*, 2019. Vol. 10.
7. Tagunov V.V., Kudryavtsev K.Ya, Petrova A.I., Voznenko T.I. Methodology for selecting input features for machine learning algorithms. *Vestnik NIYaU MIFI*, 2022. Vol. 11. No. 1. Pp. 51–58 (in Russian). DOI: 10.56304/S2304487X22010114.
8. Igreyskaya A., Kachina A., Petrova A., Kudryavtsev K. The Research of Characteristic Frequencies for Gesture-based EMG Control Channels. In: Klimov V.V., Kelley D.J. (eds) *Biologically Inspired Cognitive Architectures 2021. BICA 2021 : Proceedings of the 12th Annual Meeting of the BICA Society*. Springer Nature, 2022. 623p. doi: 10.1007/978-3-030-96993-6_14.
9. Ifeachor E.C., Jervis B.W. *Digital Signal Processing: A Practical Approach*. Pearson Education, 2002. 933 p.
10. Ifeachor E.C., Jervis W. *Digital signal processing: a practical approach*: Trans. from English. Moscow. Williams Publishing House, 2004. 992 p.

УДК 004.5

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ В СРЕДЕ ROS2 С ПОМОЩЬЮ ЖЕСТОВ

В.А. Бабанина¹, А.И. Петрова¹, Т.И. Возненко^{1,*}

¹Институт интеллектуальных кибернетических систем,
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

*e-mail: TVoznenko@mephi.ru

Поступила в редакцию: 21.04.2024

После доработки: 25.04.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

В статье представлена реализация системы управления мобильным роботом в среде ROS2 с помощью статических жестов руки, распознаваемых с помощью сигналов электромиограммы (ЭМГ). Ключевым компонентом данной системы является алгоритм преобразования сырого сигнала ЭМГ в дискретные управляющие команды. В рамках данной реализации рассмотрен принцип формирования команд управления движением мобильного робота для его перемещения в пространстве. При проектировании системы команд были учтены различные особенности жестов, такие как сложность их выполнения и распознавания, а также степень физической усталости оператора при выполнении жеста на протяжении длительного периода времени. Распознавание жестов на основе данных с двух ЭМГ-датчиков реализовано с помощью нейронной сети. Проведена интеграция разработанной системы управления с программным интерфейсом мобильного робота в среде ROS2. Представленная система показала высокую степень надежности в рамках тестирования, а также отмечено удобство ее использования испытуемыми.

Ключевые слова: человеко-машинный интерфейс, электромиография, ROS2, мобильный робот, канал управления.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.317

EDN SIMQQP

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых методов взаимодействия человека и машины актуальна во всех сферах человеческой деятельности: от повседневного использования в «умном доме» до различных областей здравоохранения [1–3]. Одной из таких областей является использование человеко-машинных интерфейсов с применением электромиографии (ЭМГ). ЭМГ представляет собой метод измерения и анализа электрической активности мышц, который может быть использован для управления различными устройствами при помощи жестов [4]. В данной работе рассматривается разработка интерфейса жестового управления роботом на основе ЭМГ с помощью статических жестов руки [5].

Для разработки надежной, эффективной и удобной пользователю системы управления жестами необходимо решить множество актуальных проблем, таких как обеспечение простоты и интуитивности выполнения управляющих команд, высокой скорости и точности распознавания команд в условиях наличия различных шу-

мов и других факторов, влияющих на сигнал [6, 7].

Платформа ROS2 – универсальное решение для развертывания и тестирования прикладного ПО для реальных роботов и их моделей. Интеграция интерфейсов человеко-машинного взаимодействия с узлами ROS2 позволит значительно упростить процесс тестирования интерфейса (а также тренировки пользователей) и обеспечить переносимость решения на различные модели роботов.

В рамках данной статьи рассматривается разработка интерфейса управления колесным роботом и его интеграция с платформой ROS2 для взаимодействия с моделями роботов. Одной из ключевых задач, реализованных в рамках данной работы, является проектирование системы жестовых управляющих команд с учетом интуитивности и удобства использования жестов, а также качества распознавания команд при условии возможного наличия ряда шумов в процессе эксплуатации.

СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ

Задачей интерфейса является обеспечение удобного взаимодействия между пользователем и роботом. Интерфейс принимает на входе измеренный с помощью датчиков ЭМГ-сигнал, а на выходе выдается распознанная команда управления. Этот процесс включает в себя несколько важных этапов:

- сбор и обработка сигналов ЭМГ (размещение датчиков, обработка полученных сигналов для фильтрации шума, усиление и выделение характеристик, которые будут использованы для определения команд управления);
- распознавание и интерпретация полученных данных (преобразование их в конкретные команды для управления роботом);
- интеграция разработанного интерфейса с системой управления роботом, т.е. передача распознанной команды роботу и ее выполнение.

В рамках данной работы в качестве аппаратного обеспечения используются ЭМГ-датчики

Grove EMG Detector (2 шт.), подключенные через микроконтроллер Arduino UNO, с помощью которого собранный с датчиков сигнал передается для дальнейшей обработки на ПК с фиксированной частотой дискретизации 500 Гц (рис. 1,а).

Интеграция с роботом реализована в виде управления программной моделью робота, функционирующей в среде ROS2. Взаимодействие с моделями в данной среде осуществляется через сообщения и топики. Традиционным форматом сообщений управления движением робота является `ros_msgs/Twist`, для повышения универсальности предложенного решения мы также будем использовать данный формат. В рамках интеграции осуществляется преобразование управляющих команд разрабатываемого интерфейса в сообщения `ros_msgs/Twist` и их публикацию в специализированный топик (рис. 1,б). Разработанный пакет `ros_sockets_twist` осуществляет передачу сообщений в ROS2 с помощью протокола WebSocket.



Рис. 1. Схемы взаимодействия: а) аппаратных модулей; б) управляющего ПО и ПО робота

НАБОР ЖЕСТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ ДЛЯ УПРАВЛЯЮЩИХ КОМАНД

Одним из ключевых моментов при создании интерфейса управления является определение набора жестов, которые будут соответствовать управляющим командам для робота. Требования, предъявляемые к жестам в наборе для обеспечения точности и надежности передачи команд: каждый жест должен быть четко определен и легко различим, пользователю должно

быть легко интерпретировать их в конкретное движение мобильного робота. Необходимо учитывать широкий спектр вариаций жестов, их соотношение с мышцами предплечья и типами используемых датчиков. Поскольку в данной работе используются два поверхностных датчика, выбраны две мышцы поверхностного слоя (рис. 2), которые отвечают за самые распространенные движения кисти и пальцев руки. Также необходимо учитывать длительность жестов: в данной работе используется факт появ-

ления жеста управления, после которого идет переход в расслабленную ладонь (нейтральный жест, который не приводит к изменению состояния робота). Таким образом, для запуска робота лучше один раз сжать кулак и расслабить его, чем держать руку напряженной на протяжении всего времени управления.

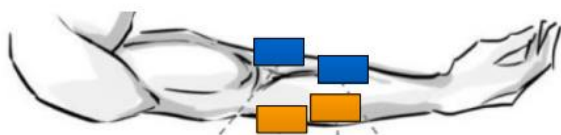


Рис. 2. Размещение электродов двух ЭМГ-датчиков

Наконец, жесты набора должны позволять выполнять все необходимые команды управления роботом. В рамках данной работы рассматриваются основные команды управления дви-

жением колесного робота, ориентированные на перемещение: «Вперед», «Назад», «Налево», «Направо», «Стоп». Для обеспечения удобства управления были также введены команды начала работы системы управления – «Старт», а также команда «Предыдущее состояние» – инструкция роботу не менять текущее состояние.

Исходя из составленного набора управляющих команд было подобрано 5 жестов (рис. 3), которые могут отвечать за 7 различных команд управления мобильным колесным роботом. На рис. 4 представлен граф состояний при выполнении различных команд, на графе узлами являются состояния робота, а выходящие из них ребра представляют собой команды, которые приводят в другие состояния.

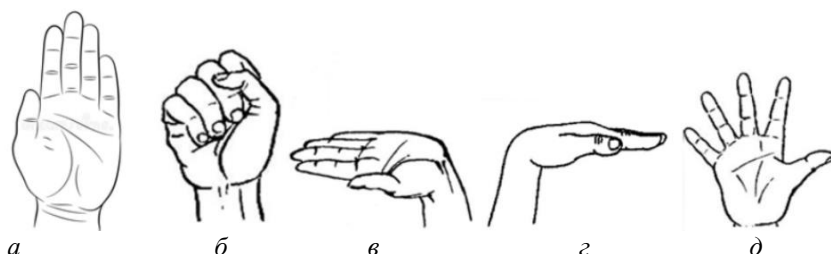


Рис. 3. Набор управляющих жестов: а) расслабленная ладонь; б) сжатый кулак; в) кисть влево; г) кисть вправо; д) широко раскрытая ладонь

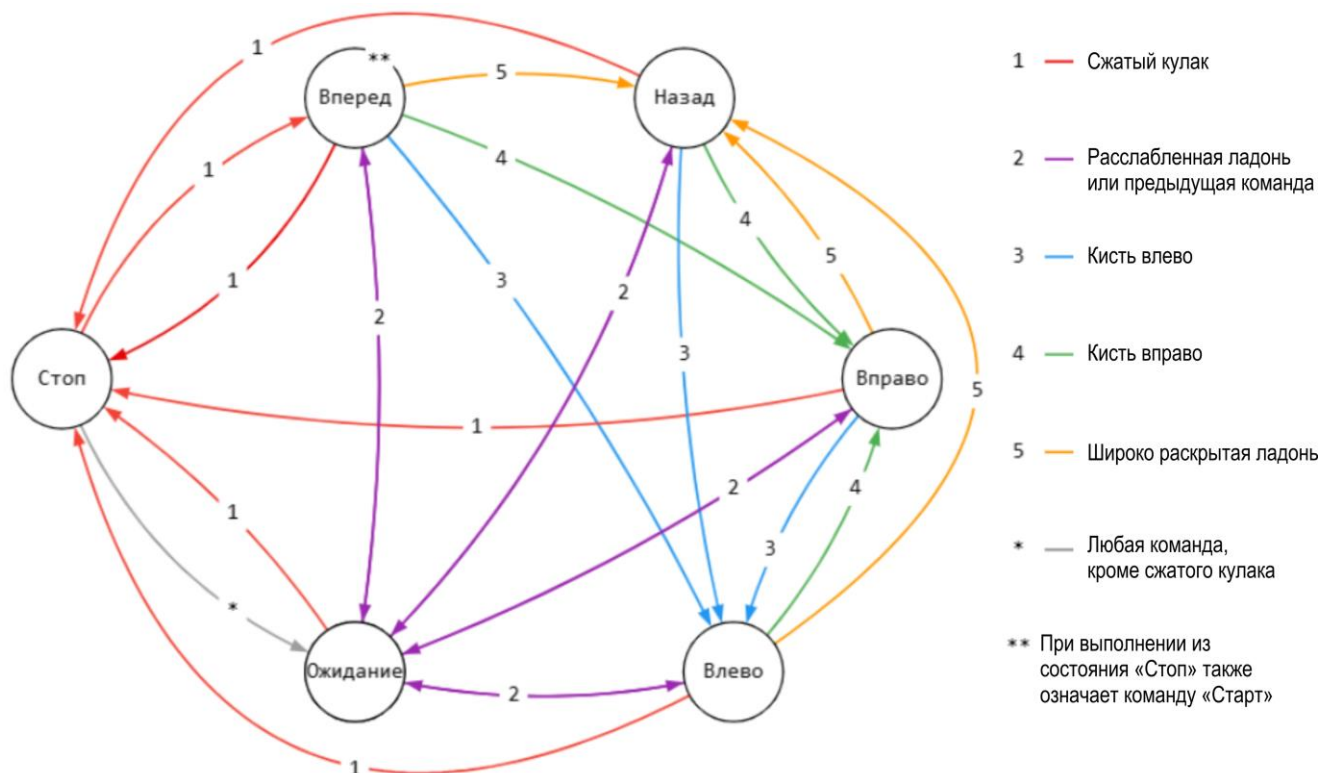


Рис. 4. Граф, описывающий управляющие команды при распознавании того или иного жеста с учетом предыдущего состояния

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ ЭМГ-ПАТТЕРНОВ УПРАВЛЯЮЩИХ ЖЕСТОВ

В данной работе для распознавания и классификации управляющих команд используется модель машинного обучения. В качестве модели был выбран многослойный перцептрон. Поступающие в систему ЭМГ-данные невозможны для распознавания паттернов в «сыром» виде, поэтому ЭМГ-сигнал также нуждается в предобработке. В рамках предобработки в данной работе осуществляется фильтрация сигнала (удаление нежелательных частот: полосовой фильтр, пропускающий частоты от 10 до 100 Гц; устранение электрических помех: обнуление частот 50 и 100 Гц), а также стандартизация и извлечение характеристик.

В рамках выбора входных характеристик для нейросети было рассмотрено множество вари-

антов, при выборе важно учитывать как различимость данных по одному каналу, так и их различимость между каналами. В конечном итоге по данным критериям были выбраны: среднее абсолютное значение (MAV), среднеквадратическое отклонение (STD) и разница абсолютного среднего значения (DAMV) [8]. Значения MAV, STD и DAMV вычислялись отдельно для двух датчиков, размещение которых указано на рис. 2.

Выходными данными для модели распознавания команд является вектор, содержащий пять значений, каждым из которых является вероятностное определение каждого управляющего жеста на заданном наборе входных данных.

Используемая структура нейронной сети представлена на рис. 5.

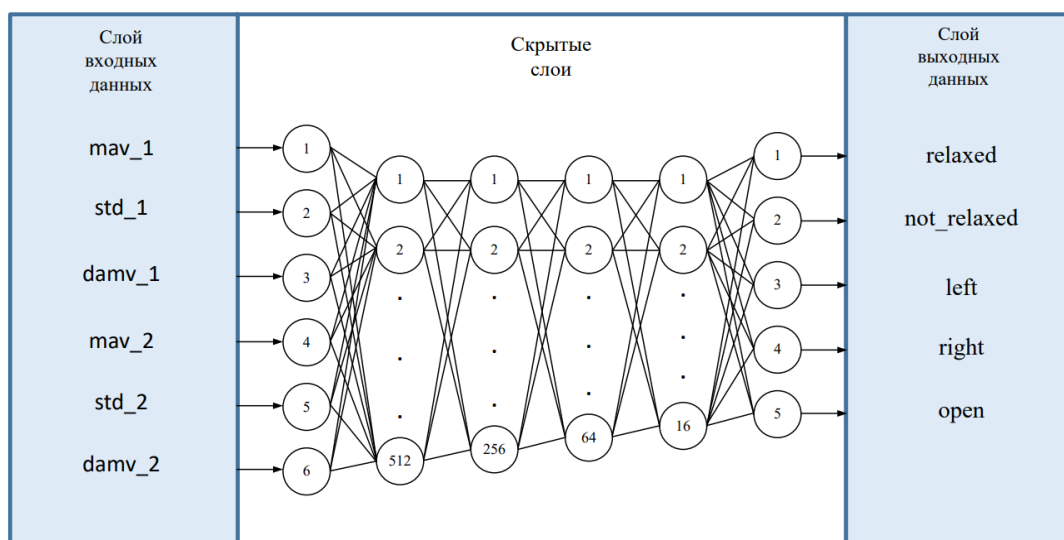


Рис. 5. Используемая структура нейронной сети

Для обработки команды в реальном времени поступающий сигнал исследовался в скользящем окне размерностью 250 значений (или 500 мс). В качестве шага скользящего окна были выбраны значения от 20 до 50. Такие параметры обеспечивают хорошее распознавание жестов, но не могут гарантировать идеальной точности в каждые 100 мс срабатывания (при шаге в 50).

Также для устранения единичных ложных срабатываний, связанных, например, с переходным процессом от одного жеста к другому, была реализована пост-обработка: окончательное принятие решения о распознанном жесте осуществляется на основе наиболее часто встреча-

ющихся всех типов жестов, распознанных за определенный момент времени.

ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

Для предварительного обучения модели была проведена серия экспериментов по сбору обучающего датасета, в котором приняли участие 15 человек, средний возраст – 30 лет. В рамках каждого этапа эксперимента испытуемые последовательно выполняли по 10 секунд управляющие жесты (см. рис. 3). Всего для каждого человека было проведено 10 таких этапов. Сбор данных проводился в одинаковых условиях, испытуемым были даны одинаковые указания в одинаковой последовательности.

Оценка точности работы модели проводилась в два этапа. На первом этапе оценивалась точность в рамках индивидуализированного подхода, при котором модель обучалась и тестировалась на данных каждого испытуемого отдельно, при этом в тренировочный набор данных вошли данные девяти этапов эксперимента, а данные десятого этапа были использованы в качестве тестового. Результат представ-

лен в табл. 1. Второй этап оценки точности работы модели использовал общий подход для проверки способности модели к обобщению данных по всем испытуемым и распознаванию общих для различных людей паттернов. При данном подходе модель была предобучена на данных, собранных для 14 добровольцев, а в качестве тестового датасета были взяты данные пятнадцатого. Результат представлен в табл. 2.

Таблица 1. Метрики тестирования модели при индивидуализированном подходе

Управляющий жест	TP	TN	FP	FN	Precision	Recall	F1-score
Расслабленная ладонь	22	88	3	0	0.88	1.00	0.94
Сжатый кулак	21	88	0	1	1.00	0.95	0.97
Кисть влево	20	88	0	2	1.00	0.91	0.95
Кисть вправо	21	87	1	1	0.95	0.95	0.95
Широко раскрытая ладонь	19	85	3	3	0.86	0.86	0.86

Таблица 2. Метрики тестирования модели при общем подходе

Управляющий жест	TP	TN	FP	FN	Precision	Recall	F1-score
Расслабленная ладонь	22	87	2	0	0.92	1.00	0.86
Сжатый кулак	17	81	7	6	0.71	0.74	0.72
Кисть влево	19	85	4	3	0.83	0.86	0.84
Кисть вправо	21	88	1	1	0.95	0.95	0.95
Широко раскрытая ладонь	14	85	4	8	0.84	0.84	0.83

Отдельно было проведено тестирование «Квадрат», в рамках которого испытуемые работали со всей реализованной системой в комплексе. Для данного этапа тестирования в качестве модели управляемого робота был использован пакет turtlesim, входящий в состав платформы ROS2: благодаря графическому интерфейсу turtlesim, испытуемые могли наблюдать в режиме «вид сверху» траекторию, которую проходит робот-черепашка во время управления им. Задачей испытуемых было провести робота

по траектории «квадрат» против часовой стрелки. В тестировании «Квадрат» приняли участие трое испытуемых, ранее не участвовавших в тестировании. Для распознавания команд была использована предобученная модель, полученная на предыдущем этапе эксперимента; также было проведено дообучение (калибровка) модели для каждого испытуемого на данном этапе. Результаты тестирования в виде полученных траекторий представлены на рис. 6.

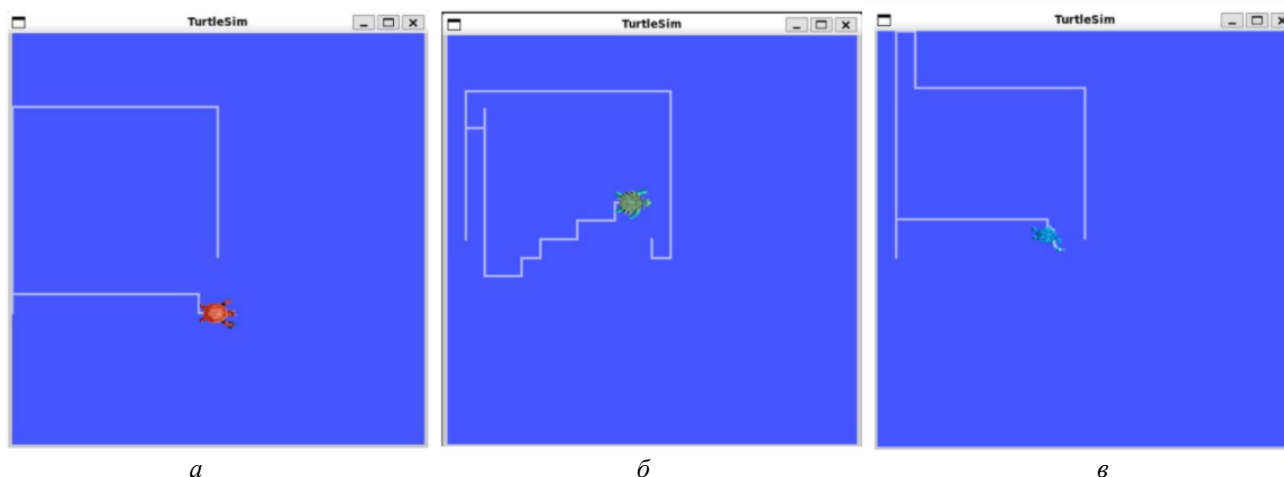


Рис. 6. Результаты тестирования «Квадрат»: траектории, полученные участниками тестирования

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках тестирования были проведены проверки того, насколько корректно разработанная система распознает отдельные команды, а также насколько данная система является удобной для пользователей при выполнении задания по перемещению мобильного робота.

Тестирование распознавания отдельных команд показало, что разработанная модель с высокой долей точности распознает паттерны управляющих жестов, в том числе модель показала хорошую обобщающую способность в рамках общего тестирования. При этом в рамках эксплуатации интерфейса точность модели может быть повышена за счет дополнительного ее дообучения перед началом работы с целью калибровки под каждого пользователя индивидуально.

В рамках тестирования «Квадрат», помимо качественных выводов о работе интерфейса, были получены отзывы испытуемых. При прохождении теста первым добровольцем было отмечено удобство использования интерфейса, произошла заминка на попытке перенаправить модель робота к траектории «Вниз» с помощью жеста «широко раскрытая ладонь», из-за чего модель сделала несколько лишних шагов влево (рис. 6,а). Однако, когда нужное положение руки для отправки команды «вниз» было найдено, завершить управление моделью получилось успешно.

При прохождении теста вторым добровольцем было отмечено затруднение в использовании интерфейса при попытке отправить команду «Направо». Важно заметить, что у пользователя ранее была травма руки, из-за чего имеются затруднения при движении кистью. Пользователь заметил, что при обнаружении неверной траектории модели робота «вверх» вместо «направо» (на рис. 6,б данный момент замечен справа), он «запаниковал и растерялся». На этом моменте пользователь решил расслабить руку, чтобы «дать ей отдохнуть», после чего снова собрался и завершил траекторию по нижнему левому углу квадрата.

При прохождении теста третьим добровольцем было отмечено удобство и легкость при использовании интерфейса. Самым сложным оказался жест «широко раскрытая ладонь» для подачи команды «Вниз». Пользователю пришлось «немного покрутить запястьем и найти верное положение для команды», чтобы исправить неверный маршрут (рис. 6,в).

Самой проблемной для выполнения оказалась команда «Вниз», которая отправляется с помощью жеста «широко раскрытая ладонь», особенно, когда пользователь использовал ее впервые. После привыкания пользователя к управлению моделью робота трудности в выполнении данной команды практически исчезли.

ВЫВОДЫ

В данной статье была рассмотрена реализация системы управления мобильным роботом с помощью жестов руки, представлены принципы формирования набора жестов для управления и проектирования набора управляющих команд. Произведена интеграция с моделью в среде ROS2. По итогам тестирования модель распознавания жестов показала высокие результаты точности, в особенности с учетом дообучения для повышения степени индивидуализированности и калибровки под каждого пользователя. Тестирование на модели с участием испытуемых, не имеющих никакого практического опыта управления с помощью ЭМГ-интерфейсов, также прошло успешно. Система управления обеспечивает распознавание жестов и передачу управляющих команд от пользователя роботу в режиме реального времени. Отмечено удобство в использовании. Потенциальными возможностями для развития интерфейса являются расширение набора жестов, интеграция данного интерфейса в качестве одного канала системы управления с несколькими интерфейсами [9–11] и проведение большего количества экспериментов в различных условиях окружающей среды для достижения наибольшей точности при распознавании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gopal P., Gesta A., Mohebbi A. A Systematic Study on Electromyography-Based Hand Gesture Recognition for Assistive Robots Using Deep Learning and Machine Learning Models // *Sensors*, 2022, V. 22. № 10. 3650. DOI: 10.3390/s22103650.
2. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V. The Decomposition Method of Multichannel Control System Based on Extended BCI for a Robotic Wheelchair // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. V. 948. P. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_73.
3. Han J.S., Song W.K., Kim J.S., Bang W.C., Lee H., Bien Z. New EMG pattern recognition based on soft computing techniques and its application to control a rehabilitation robotic arm // *Proc. of 6th international*

conference on soft computing (IIZUKA2000), 2000. P. 890–897.

4. Лобов С.А., Миронов В.И., Кастальский И.А., Казанцев В.Б. Совместное использование командного и пропорционального управления внешними робототехническими устройствами на основе электромиографических сигналов // Современные технологии в медицине. 2015. Т. 7. № 15. С. 30–38.

5. Reifinger S., Wallhoff F., Ablassemeier M., Poitschke T., Rigoll G. Static and Dynamic Hand-Gesture Recognition for Augmented Reality Applications // Human-Computer Interaction. HCI Intelligent Multimodal Interaction Environments, 2007. V. 4552. P. 728–737. DOI: 10.1007/978-3-540-73110-8_79.

6. Исмайлова К.Ш. Факторы, влияющие на искажение измерительной информации в электромиографии // Наука, техника и образование. 2017. №10. С. 21–23.

7. Zhang X., Huang H. A real-time, practical sensor fault-tolerant module for robust EMG pattern recogni-

tion // Journal of neuroengineering and rehabilitation, 2015. V. 12. P. 1–16. DOI: 10.1186/s12984-015-0011-y.

8. Phinyomark A., Phukpattaranont P., Limsakul C. Feature reduction and selection for EMG signal classification // Expert systems with applications, 2012. V. 39. № 8. P. 7420–7431. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.102.

9. Gridnev A.A., Voznenko T.I., Chepin E.V. The decision-making system for a multi-channel robotic device control // Procedia computer science, 2018. V. 123, P. 149–154. DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.024.

10. Kim D., Jung H., Shin S. System and method of controlling mobile robot using inertia measurement unit and electromyogram sensor-based gesture recognition. Patent KR. No. 20170030139, 2015.

11. Petrova A.I., Voznenko T.I., Chepin E.V. The Impact of Artifacts on the BCI Control Channel for a Robotic Wheelchair // Mechanisms and Machine Science (book series), 2020. V. 80, P. 105–111. DOI: 10.1007/978-3-030-33491-8_12.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 3, pp. 176–183

GESTURE-BASED CONTROL SYSTEM FOR MOBILE ROBOT IN ROS2 ENVIRONMENT

V.A. Babanina¹, A.I. Petrova¹, T.I. Voznenko^{1,*}

¹Institute of Cyber Intelligence Systems,
National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow, 115409, Russia

*e-mail: TVoznenko@mephi.ru

Received April 21, 2024; revised April 25, 2024; accepted May 14, 2024

The article presents the implementation of a control system for a mobile robot in ROS2 environment using static hand gestures recognized using electromyogram (EMG) signals. The key component of this system is the algorithm for converting raw EMG signal into discrete control commands. In this implementation, the principle of generating control commands to handle mobile robot movement is considered. Also, various characteristics of gestures, such as their complexity of execution and recognition, as well as the degree of physical fatigue of the operator when performing a gesture for a long period of time, have been considered in the design of the command system. Gesture recognition based on data from 2 EMG sensors is implemented using a neural network. The developed control system was integrated with the software interface of the mobile robot in the ROS2 environment. The presented system has shown a high degree of reliability in testing, as well as the convenience of its use by test subjects.

Keywords: human-machine interface, electromyography, ROS2, mobile robot, control channel.

REFERENCES

1. Gopal P., Gesta A., Mohebbi A. A Systematic Study on Electromyography-Based Hand Gesture Recognition for Assistive Robots Using Deep Learning and Machine Learning Models. *Sensors*, 2022. Vol. 22. No. 10, 3650. DOI: 10.3390/s22103650.

2. Voznenko T.I., Gridnev A.A., Kudryavtsev K.Y., Chepin E.V. The Decomposition Method of Multi-channel Control System Based on Extended BCI for a Robotic Wheelchair. *Advances in Intelligent Systems*

and Computing, 2020, Vol. 948. Pp. 562–567. DOI: 10.1007/978-3-030-25719-4_73.

3. Han J.S., Song W.K., Kim J.S., Bang W.C., Lee H., Bien Z. New EMG pattern recognition based on soft computing techniques and its application to control a rehabilitation robotic arm. *Proc. of 6th international conference on soft computing (IIZUKA2000)*, 2000. Pp. 890–897.

4. Lobov S.A., Mironov V.I., Kastal'skij I.A., Kazancev V.B. Sovmestnoe ispol'zovanie komandnogo i proporcional'nogo upravleniya vneshnimi roboto-

teknicheskimi ustrojstvami na osnove elektromiograficheskikh signalov [Sharing command and proportional control of external robotic devices based on electromyographic signals]. *Sovremennye tekhnologii v medicine*, 2015. Vol. 7. No. 15. Pp. 30–38 (in Russian).

5. *Reifinger S., Wallhoff F., Ablassmeier M., Poitschke, T., Rigoll, G.* Static and Dynamic Hand-Gesture Recognition for Augmented Reality Applications. *Human-Computer Interaction. HCI Intelligent Multimodal Interaction Environments*, 2007. Vol. 4552. Pp. 728–737. DOI: 10.1007/978-3-540-73110-8_79.

6. *Ismajlova K.Sh.* Faktory, vliyayushchie na iskazhenie izmeritel'noj informacii v elektromiografii [Factors influencing distortion of measurement information in electromyography]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2017. No. 10. Pp. 21–23 (in Russian).

7. *Zhang X., Huang H.* A real-time, practical sensor fault-tolerant module for robust EMG pattern recognition. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 2015. Vol. 12. Pp. 1–16. DOI: 10.1186/s12984-015-0011-y.

8. *Phinyomark A., Phukpattaranont P., Limsakul C.* Feature reduction and selection for EMG signal classification. *Expert systems with applications*, 2012. Vol. 39. No. 8. Pp. 7420–7431. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.102.

9. *Gridnev A. A., Voznenko T. I., Chepin E. V.* The decision-making system for a multi-channel robotic device control. *Procedia computer science*, 2018. Vol. 123. Pp. 149–154. DOI: 10.1016/j.procs.2018.01.024.

10. *Kim D., Jung H., Shin S.* System and method of controlling mobile robot using inertia measurement unit and electromyogram sensor-based gesture recognition. Patent KR. No. 20170030139, 2015.

11. *Petrova A.I., Voznenko T.I., Chepin E.V.* The Impact of Artifacts on the BCI Control Channel for a Robotic Wheelchair. *Mechanisms and Machine Science (book series)*, 2020. Vol. 80. Pp. 105–111. DOI: 10.1007/978-3-030-33491-8_12.

УДК 621.039

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОТРАБОТАВШИХ ЗАКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ХРАНИЛИЩ БЕСКОНТЕЙНЕРНОГО ХРАНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

Н.В. Чегонов^{1, 2*}, Е.А. Ванина^{1, 2}, А.Ю. Кузнецов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Объединенный эколого-технологический
и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды»,
Москва, 119121, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, 115409, Россия

*e-mail: NVChegonov@radon.ru

Поступила в редакцию: 27.04.2024

После доработки: 03.05.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

В статье представлены возможные способы извлечения отработавших закрытых источников ионизирующего излучения из хранилищ бесконтейнерного хранения, размещенных в пунктах хранения радиоактивных отходов ФГУП «РАДОН», обозначены проблемные моменты, сопутствующие решению данной задачи. Показаны важность и актуальность рассматриваемой темы в рамках реализации программы реабилитации объектов «ядерного наследия» при отсутствии опыта извлечения отработавших закрытых источников ионизирующего излучения из хранилищ подобного типа в современных условиях. Приведено краткое описание и имеющиеся конструктивные особенности хранилищ бесконтейнерного хранения отработавших закрытых источников ионизирующего излучения, размещенных на территории пунктов хранения радиоактивных отходов. Представлены сведения о проведенных и планируемых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, направленных на реализацию способов извлечения отработавших закрытых источников ионизирующего излучения из хранилищ бесконтейнерного хранения. Описано практическое применение способов извлечения отработавших закрытых источников ионизирующего излучения из хранилищ бесконтейнерного хранения в рамках реализации проектов вывода из эксплуатации пунктов хранения радиоактивных отходов. Сделаны выводы о перспективах, получаемых при реализации представленных способов извлечения отработавших закрытых источников ионизирующего излучения из хранилищ бесконтейнерного хранения.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации, пункты хранения радиоактивных отходов, хранилища бесконтейнерного хранения, отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.325

EDN VAINBQ

ВВЕДЕНИЕ

В состав Федерального государственного унитарного предприятия «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды» (далее – ФГУП «РАДОН») входят пункты хранения радиоактивных отходов (далее – ПХ РАО), расположенные в 18 регионах Российской Федерации. ПХ РАО были введены в эксплуатацию в 60–70 гг. XX в. Их назначение – хранение РАО, отработавших закрытых источников ионизирующего излучения, образующихся в результате производственной деятельности предприятий и организаций.

В настоящее время в рамках реализации программы реабилитации объектов «ядерного наследия» производится подготовка и вывод из эксплуатации (далее – ВЭ) пунктов хранения РАО, включающие извлечение РАО из хранилищ, демонтаж оборудования, дезактивацию зданий и сооружений для перевода этих объектов в радиационно-безопасное состояние^{1,2}.

¹НП-091-14. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Общие положения». М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2014. 15 с.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОТРАБОТАВШИХ ЗАКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ХРАНИЛИЩ БЕСКОНТЕЙНЕРНОГО ХРАНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

При проектировании ПХ РАО вопрос вывода их из эксплуатации не рассматривался, в проектной документации отсутствуют решения по демонтажу оборудования и выводу объектов из эксплуатации. Таким образом, разработка инновационных, экономичных и безопасных технологий ВЭ является одним из приоритетных направлений научных исследований [1].

В состав ПХ РАО ФГУП «РАДОН» входят хранилища бесконтейнерного хранения (далее – ХБХ), которые в соответствии с типовыми проектами были предназначены для размещения отработавших закрытых источников ионизирующего излучения (далее – ОЗИИИ). Извлечение ОЗИИИ из ХБХ в проектной документации также не предусматривалось. Актами первичной регистрации ОЗИИИ, размещенные в ХБХ, признаны удаляемыми РАО^{3,4}. Опыт извлечения РАО из хранилищ подобного типа в современных условиях отсутствует.

Комплексное решение вопроса вывода из эксплуатации ПХ РАО, включающих ХБХ, тесно связано с безопасным обращением с извлекаемыми радиоактивными отходами и ОЗИИИ, причем обеспечение радиационной безопасности является важнейшим условием реализации проекта ВЭ.

Полученные в ходе проведения работ по извлечению ОЗИИИ из ХБХ теоретические и практические наработки будут использованы при планировании и выполнении мероприятий по ВЭ аналогичных хранилищ в будущем.

КРАТКАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ХБХ ОЗИИИ

В настоящий момент в отделениях и филиалах ФГУП «РАДОН» эксплуатируется 44 ХБХ

²НП-097-16. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. «Требования к обеспечению безопасности при выводе из эксплуатации пунктов хранения радиоактивных отходов». М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. 17 с.

³Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» (с изменениями и дополнениями).

⁴Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями).

ОЗИИИ, сооруженных по типовым проектам ТП-416, ТП-6069. В этих хранилищах размещено около 250000 шт. ОЗИИИ, максимальная суммарная активность одного хранилища по учетным данным составляет $9.51 \cdot 10^{15}$ Бк. В 25 хранилищах ОЗИИИ включены в металлическую матрицу (сплав Вуда) путем послойного омоноличивания.

Хранилища, находящиеся в составе ПХ РАО, представляют собой заглубленные бетонные колодцы, которые имеют различные характеристики. Отличия заключаются в основном в диаметрах колодцев (от 0.5 до 1.3 м), их глубине расположения ниже уровня земли (от 3 до 10 м), а также в размерах приемных емкостей, размещенных внутри колодцев. Основные конструктивные элементы, входящие в состав ХБХ, как правило, не отличаются.

Стенки колодцев хранилищ выполнены из сборной железобетонной трубы повышенной прочности, установленной на бетонное основание. В верхней части каждого хранилища смонтирована железобетонная площадка для размещения контейнера с донной разгрузкой. В соответствии с проектной документацией внутренний объем колодцев хранилищ должен быть заполнен песком, однако, по предварительным данным, полученным в ходе анализа эксплуатационной документации, отдельные колодцы на площадках отделений заполнены бетоном. Актуализировать данные по актуальному состоянию конструкций ХБХ планируется в ходе проведения комплексного инженерно-радиационного обследования (далее – КИРО).

Разрез ХБХ в одном из вариантов исполнения показан на рис. 1.

Внутри колодца установлена приемная емкость, представляющая собой цилиндр из нержавеющей стали, соединенный с приемной воронкой загрузочной трубой змеевикового типа. Верхняя плоскость размещения емкостей находится на различной глубине – от 1.5 до 7.5 м от поверхности земли. Емкости имеют различную высоту и диаметр. В большей части хранилищ емкости располагаются в одном экземпляре, непосредственно на бетонном основании колодца. ХБХ Благовещенского отделения имеет конструктивную особенность, которая состоит в том, что внутри колодца находятся три емкости для хранения ОЗИИИ, две из которых представляют собой эллиптические цилиндры, размещенные на глубине от 4.5 до 6 м, а третья – цилиндр, размещенный на глубине от 7.5 до 9 м, при глубине колодца 10 м.

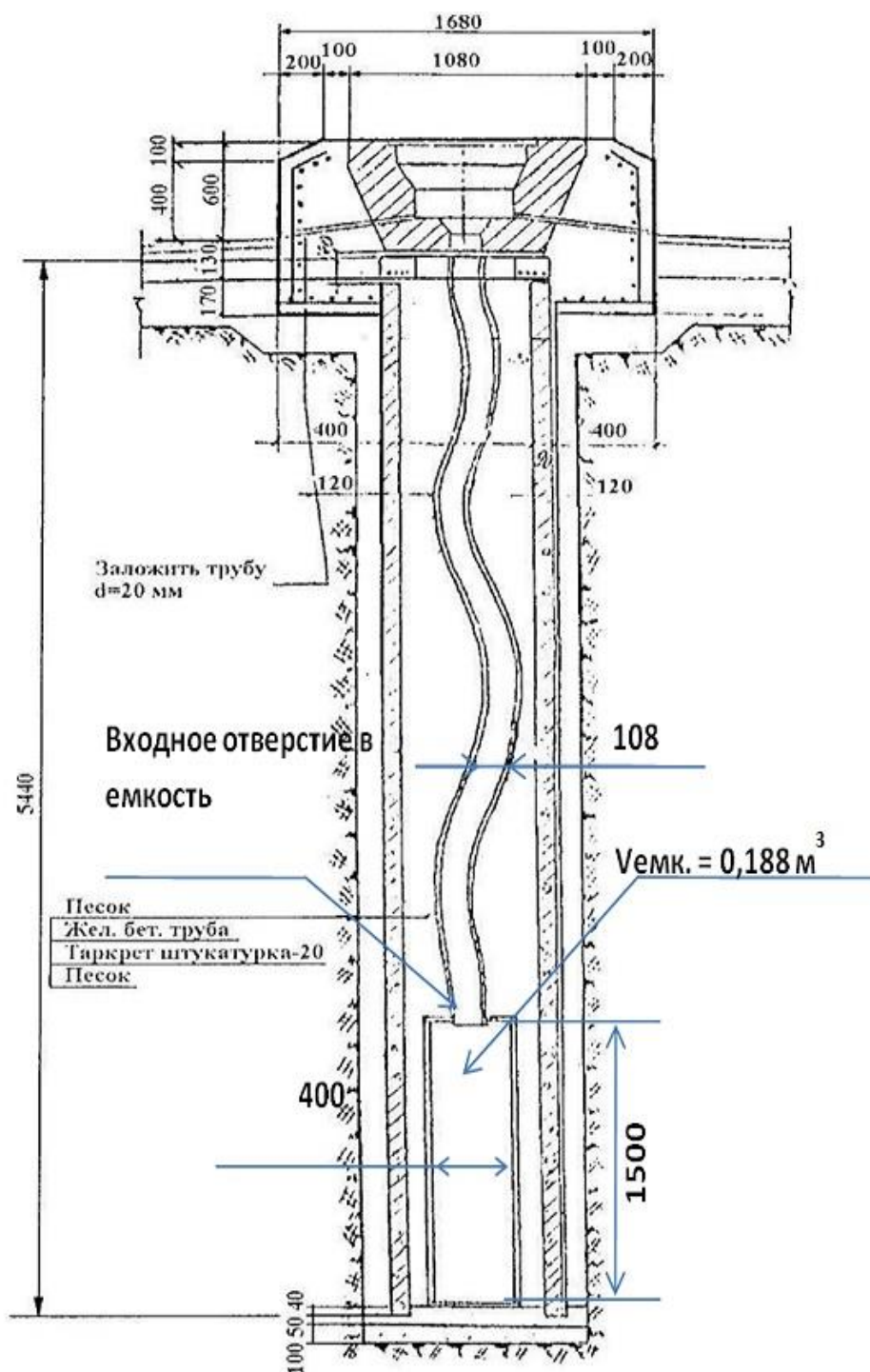


Рис. 1. Разрез хранилища ОЗИИИ

СПОСОБЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОЗИИИ ИЗ ХБХ

Во ФГУП «РАДОН» подготовкой и ВЭ объектов «ядерного наследия» занимается блок по выводу из эксплуатации. В ближайших по времени проектах планируется ВЭ ПХ РАО Благовещенского отделения Приволжского филиала,

Уральского филиала, Самарского отделения филиала «Приволжский территориальный округ», Волгоградского отделения филиала «Южный территориальный округ» ФГУП «РАДОН». Во всех перечисленных ПХ РАО присутствуют ХБХ ОЗИИИ.

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОТРАБОТАВШИХ ЗАКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ХРАНИЛИЩ БЕСКОНТЕЙНЕРНОГО ХРАНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

В ходе проработки технологических решений по реализации проекта ВЭ для данных хранилищ определены два перспективных подхода к извлечению ОЗИИИ из хранилищ:

1) извлечение ОЗИИИ вместе с приемной емкостью целиком в рамках реализации проекта ВЭ ПХ РАО;

2) поштучное извлечение ОЗИИИ при помощи манипуляционной роботизированной системы (далее – МРС).

В настоящее время для реализации описанных подходов по извлечению ОЗИИИ из ХБХ имеются проблемные вопросы:

1. Отсутствуют критерии приемлемости для захоронения и пункты захоронения ОЗИИИ (отложенный этап переработки/кондиционирования ОЗИИИ);

2. Отсутствует апробированная технология извлечения емкостей ХБХ;

3. Отсутствует сертифицированный контейнер для транспортирования, временного хранения и захоронения приемных емкостей с ОЗИИИ;

4. Отсутствует апробированная на практике технология поштучного извлечения ОЗИИИ при помощи МРС.

СПОСОБ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОЗИИИ ВМЕСТЕ С ПРИЕМНОЙ ЕМКОСТЬЮ ЦЕЛИКОМ

На примере ХБХ Благовещенского отделения рассмотрим технологические решения по извлечению ОЗИИИ вместе с приемной емкостью целиком в рамках работ по ВЭ ПХ РАО.

В настоящий момент в двух емкостях ХБХ Благовещенского отделения размещено порядка 24000 шт. ОЗИИИ. В ходе анализа характеристик ОЗИИИ, размещенных в приемных емкостях, установлено, что в СГУК РВ и РАО значения суммарной активности по состоянию на декабрь 2023 г. учтены согласно паспортным данным на источники на момент их размещения в хранилища и составляют $1.56 \cdot 10^{15}$ Бк для ХБХ № 1 и $2.89 \cdot 10^{13}$ для ХБХ № 2.

В 2016 г. в Благовещенском отделении была проведена научно-исследовательская работа (далее – НИР) «Разработка и обоснование безопасного метода извлечения приемных емкостей-хранилищ бесконтейнерного типа, включая разработку технических условий на изготовление транспортно-упаковочного комплекта (далее – ТУК) и технологической оснастки».

В ходе проведения данной НИР была обоснована безопасность извлечения приемных ем-

костей ХБХ Благовещенского отделения, разработаны отчет по обоснованию радиационной безопасности по извлечению ОЗИИИ, технологический регламент безопасного извлечения емкостей с ОЗИИИ, а также технические условия на изготовление ТУК и технологической оснастки.

Емкости с ОЗИИИ предполагалось извлекать при помощи специально разработанного приспособления для захвата и подъема, удалив загрузочные гнезда и каналы, а также песчаную засыпку из колодцев. Извлеченные емкости в соответствии с технологическим регламентом должны были помещаться в ТУК, установленный сверху на опорную площадку хранилища, после чего ТУК перемещался краном в контейнер типа КМЗ. Разрезы приспособления для захвата и подъема емкости и ТУК показаны на рис. 2,а и 2,б.

Следует отметить, что выявленные различия в суммарной активности согласно учетных данных и расчетных значений существенно влияют на формирование технических условий для разработки ТУК и, как следствие, влекут за собой увеличение затрат на изготовление, а также увеличенные массо-габаритные характеристики для контейнера с ОЗИИИ, имеющими суммарную активность на два порядка выше расчетной. Согласно рассчитанным в ходе НИР оценочным значениям, суммарная активность емкостей с ОЗИИИ Благовещенского отделения, по состоянию на 2016 г. составляла $1.77 \cdot 10^{13}$ Бк для ХБХ № 1 и $3.3 \cdot 10^{13}$ Бк для ХБХ № 2. Кроме того в ХБХ № 1 размещены источники нейтронного излучения с выходом нейтронов порядка $4 \cdot 10^8$ нейтр/с.

Также следует учитывать, что, исходя из истории эксплуатации объекта и результатов проведенной НИР, имеются сведения о наличии в ХБХ № 1 источников нейтронного излучения. С целью подтверждения данной информации были проведены измерения с помощью прибора ДКС-96 с блоком для измерения нейтронного излучения, мощность дозы нейтронного излучения составила 0.28 мкЗв/ч. Более точные результаты по радионуклидному составу в ХБХ № 1 будут получены при проведении КИРО. Результаты проведенной НИР на практике не применялись, прототип контейнера для извлекаемых емкостей с ОЗИИИ не изготавливался, испытания и сертификацию не проходил, однако описанные наработки дали возможность рассматривать данную технологию как один из возможных способов извлечения ОЗИИИ из

хранилищ. В ходе анализа технических характеристик хранилищ колодезного типа установлено, что максимальные размеры приемных емкостей хранилищ ОЗИИИ составляют 2 м в высоту и 0,5 м в диаметре.

Эти данные, а также данные по радионуклидному составу в хранилищах с ОЗИИИ, были использованы при анализе номенклатурной линейки сертифицированных контейнеров для РАО, для их возможного применения в целях обращения с извлекаемыми ОЗИИИ. Кон-

тейнеров с заданными характеристиками, пригодных для транспортирования, временного хранения и захоронения емкостей с ОЗИИИ, на настоящий момент не найдено. Таким образом, для транспортирования, временного хранения и захоронения емкостей с ОЗИИИ ХБХ необходимо разработать контейнер, также необходимо разработать технологию безопасного извлечения приемных емкостей ХБХ и размещение их в контейнере.

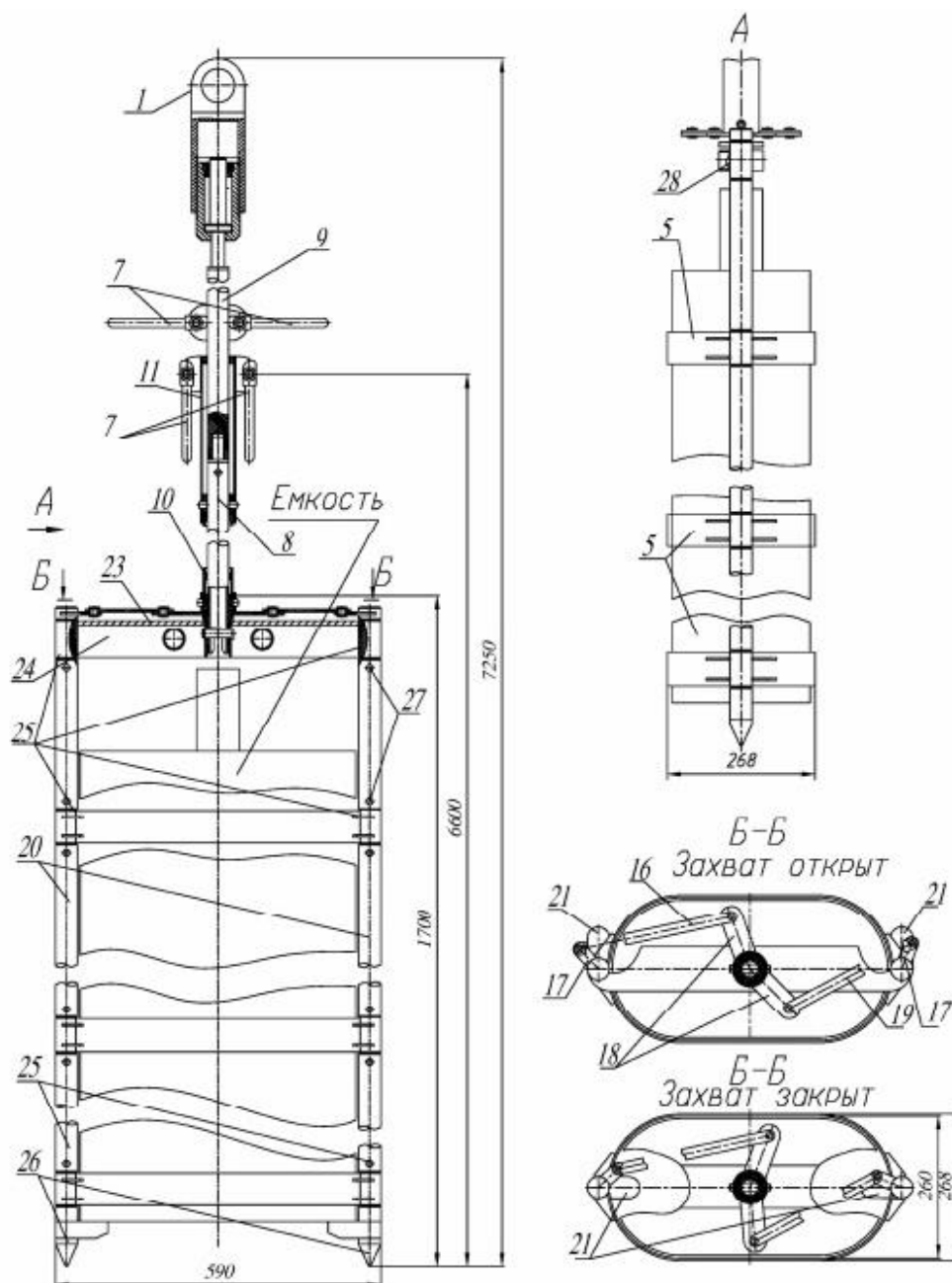


Рис. 2,а. Разрез приспособления для захвата и подъема емкости: 1 – петля; 2 – гайка; 3 – втулка; 4 – упор; 5 – хомут; 6 – шпилька; 7 – ручка; 8 – тяга; 9 – вставка; 10 – труба; 11 – втулка; 12 – направляющая; 13 – втулка; 14 – втулка; 15 – ось; 16 – рычаг; 17 – рычаг; 18 – рычаг; 19 – рычаг; 20 – стойка; 21 – захват; 22 – штифт; 23 – пластина; 24 – ребро; 25 – втулка; 26 – наконечник; 27 – штифт; 28 – втулка

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОТРАБОТАВШИХ ЗАКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ИЗ ХРАНИЛИЩ БЕСКОНТЕЙНЕРНОГО ХРАНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

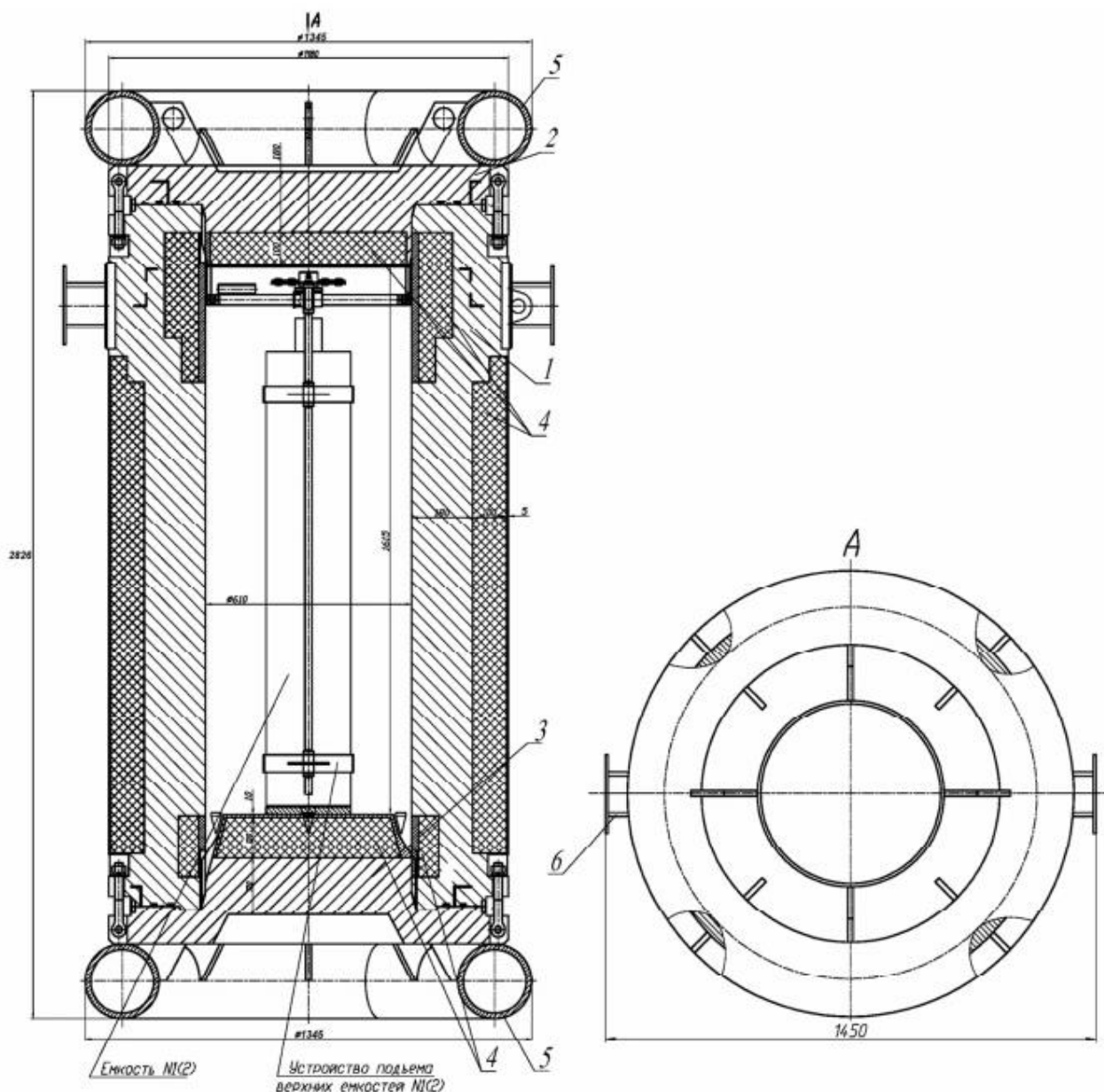


Рис. 2,б. Разрез ТУК: 1 – корпус; 2 – крышка верхняя; 3 – крышка нижняя; 4 – защита нейтронная; 5 – амортизатор; 6 – цапфа

СПОСОБ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОЗИИИ ПРИ ПОМОЩИ МРС

Современные знания о робототехнических системах, работающих в высоких полях ионизирующих излучений, позволяют констатировать возможность создания МРС для извлечения ОЗИИИ из ХБХ, мощность экспозиционной дозы гамма-излучения в которых может оставлять 1.5–2 Зв/ч [2]. Основой МРС является роботизированная «рука-захват» и система машинного зрения, позволяющая при удаленном управлении последовательно извлекать ОЗИИИ, с даль-

нейшим их размещением в сертифицированном контейнере.

В результате выполнения комплекса НИОКР необходимо разработать опытно-промышленный образец МРС, на модельных образцах проверить эффективность роботизированной «руки-захвата», установить производительность МРС, разработать и апробировать технологию извлечения ОЗИИИ на реальном хранилище колодезного типа.

К плюсам применения технологии последовательного извлечения ОЗИИИ можно отнести: отсутствие необходимости вскрывать хранили-

ще, возможность многократного использования МРС на хранилищах других объектов, снижение риска переоблучения персонала.

Слабыми сторонами технологии с использованием МРС являются: возможное невысокое время эксплуатации системы машинного зрения в высоких полях гамма-излучения, отсутствие данных о производительности системы, довольно высокая стоимость создания опытно-промышленного образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вывод из эксплуатации объектов «ядерного наследия» является достаточно сложным и долгосрочным комплексом мероприятий, направленным на приведение ЯРОО к характеристикам, отвечающим требованиям руководящих документов, позволяющим в будущем использовать площадки данных объектов для нужд промышленности [3].

Несомненно, при решении задач ВЭ возникают сложности, связанные с отсутствием технической и эксплуатационной практик по выполнению того или иного вида работ, проектных решений по ВЭ элементов ЯРОО, квалифицированного персонала, в связи с новизной прово-

димых работ и т.п. Для решения задач ВЭ объектов ядерного наследия проводится постоянная кропотливая работа сотрудников организаций атомной отрасли, отвечающих за планирование и реализацию мероприятий ВЭ ЯРОО. После решения задач по извлечению ОЗИИИ из ХБХ будет осуществлен ВЭ ПХ РАО, в которых имеются данные хранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диордий М.Н., Чабанюк А.И. Практический опыт ФГУП «РАДОН» по выводу из эксплуатации ЯРОО и реабилитации территории // Радиоактивные отходы, 2020. № 2 (11). С. 25–35.
2. Спасский Б.А., Попов А.В., Далаев И.Ю. Применение средств робототехники при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии: текущее состояние и перспективы развития // Робототехника и техническая кибернетика. Т. 10. № 4. Санкт-Петербург: ЦНИИ РТК, 2022. С. 246–254.
3. Основные практические работы по ликвидации ядерного наследия в 2022 году. [Электронный ресурс]. URL: <https://xn---btb4bfm9d.xn--p1ai/society/news/osnovnye-prakticheskie-raboty-po-likvidatsii-yadernogo-naslediya-v-2022-godu/> (дата обращения: 18.04.2024).

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 3, pp. 184–191

EXTRACTION OF SPENT SEALED SOURCES OF IONIZING RADIATION FROM CONTAINERLESS OBJECT STORAGE STORAGE NUCLEAR LEGACY

N.V. Chegonov^{1, 2*}, E.A. Vanina^{1, 2}, A.Yu. Kuznetsov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «United Ecological Scientific and Research Centre of decontamination of Radioactive Waste and Environmental Protection»,
Moscow, 119121, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, Russia

*e-mail: NVChegonov@radon.ru

Received April 27, 2024; revised May 3, 2024; accepted May 14, 2024

The article presents possible methods for extracting spent sealed sources of ionizing radiation from non-container storage facilities located at radioactive waste storage facilities of the Federal State Unitary Enterprise «RADON», and identifies problematic issues associated with solving this problem. The importance and relevance of the topic under consideration is shown within the framework of the implementation of the program for the rehabilitation of «nuclear heritage» objects in the absence of experience in removing spent sealed sources of ionizing radiation from storage facilities of this type in modern conditions. A brief description and existing design features of containerless storage facilities for spent sealed sources of ionizing radiation located on the territory of radioactive waste storage facilities are provided. Information is presented on completed and planned research and development work aimed at implementing methods for extracting spent sealed sources of ionizing radiation from containerless storage facilities. The practical application of methods for retrieving spent sealed sources of ionizing radiation from containerless storage facilities within the framework of the implementation of projects for the decommissioning of radioac-

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОТРАБОТАВШИХ ЗАКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ ХРАНИЛИЩ БЕСКОНТЕЙНЕРНОГО ХРАНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ

tive waste storage facilities is described. Conclusions are drawn about the prospects obtained by implementing the presented methods for extracting spent sealed sources of ionizing radiation from containerless storage facilities.

Keywords: decommissioning, radioactive waste storage facilities, containerless storage facilities, spent sealed sources of ionizing radiation.

REFERENCES

1. *Diordij M.N., CHabanyuk A.I.* Prakticheskij opyt FGUP «RADON» po vyvodu iz ekspluatsii YAROO i reabilitatsii territorii [Practical experience of FSUE «RADON» in decommissioning nuclear hazardous waste and rehabilitating the territory]. Radioaktivnye otdel'nyye otdel'nyye, 2020. No. 2 (11). Pp. 25–35 (in Russian).

2. *Spasskij B.A. Popov A.V., Dalyaev I.Yu.* Prime-nenie sredstv robototekhniki pri vyvode iz ekspluatsii ob'ektov ispol'zovaniya atomnoj energii: tekushchee sostoyanie i perspektivy razvitiya [Application of robot-

ics during decommissioning of nuclear energy facilities: current status and development prospects]. Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika. Vol. 10. No 4. Saint Petersburg, CNII RTK Publ., 2022. Pp. 246–254 (in Russian).

3. Osnovnye prakticheskie raboty po likvidatsii yadernogo naslediya v 2022 godu. [Basic practical work to eliminate the nuclear legacy in 2022]. Available at: <https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/society/news/osnovnye-prakticheskie-raboty-po-likvidatsii-yadernogo-naslediya-v-2022-godu/> (accessed 18.04.2024).

УДК 517

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ DIGITAL DECOMMISSIONING ДЛЯ ЦИФРОВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОИАЭ

В.Л. Тихоновский^{1,*}, А.А. Бундин¹

¹Группа компаний «НЕОЛАНТ», ООО, Москва, 105062, Россия

e-mail: tikhonovsky@neolant.group

Поступила в редакцию: 25.04.2024

После доработки: 25.04.2024

Принята к публикации: 14.05.2024

Рассматривается методология применения платформы Digital Decommissioning для цифрового сопровождения этапов вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Основное внимание уделяется базовым принципам платформы в части обязательности создания и применения исполнительных трехмерных моделей ОИАЭ на всех этапах его подготовки к выводу и непосредственно вывода из эксплуатации. Описывается применение модулей платформы Digital Decommissioning на этапах подготовки и вывода из эксплуатации (ВЭ) ОИАЭ для создания цифровых исполнительных инженерных и цифровых исполнительных инженерно-радиационных моделей объектов и последующего цифрового проектирования их вывода из эксплуатации, а также для эффективного механизма повторного использования лучших инженерных практик при разработке проектов вывода из эксплуатации для последующих объектов.

Ключевые слова: Digital Decommissioning, вывод из эксплуатации, цифровая информационная модель, цифровая исполнительная инженерная модель, цифровая исполнительная инженерно-радиационная модель.

DOI: 10.26583/vestnik.2024.324

EDN ZPSLJM

Платформа Digital Decommissioning создана как результат интеграции возможностей базовых программных продуктов управления инженерными данными, разрабатываемых группой компаний «НЕОЛАНТ» и более чем пятнадцатилетнего опыта работы в сфере применения цифровых технологий для решения инженерных задач ВЭ ОИАЭ. Первоначальная разработка платформы Digital Decommissioning была инициирована в 2017 г. компанией «НЕОЛАНТ» в партнерстве с Национальным исследовательским Томским политехническим университетом (НИ ТПУ). Одновременно компания «НЕОЛАНТ» в составе международного консорциума приступила к выполнению работ по разработке проектной документации на ВЭ 1–4 блоков АЭС «Козлодуй» (АЭС с блоками ВВЭР-440 в Республике Болгария), что обеспечило наличие актуальной основы и данных для тестирования платформы.

В рамках первоначальной разработки платформы Digital Decommissioning был проведен анализ требований нормативных и руководящих документов, рекомендаций МАГАТЭ, на основе

которого были разработаны требования к платформе цифрового сопровождения заключительной стадии жизненного цикла ОИАЭ. Также в партнерстве со специалистами НИ ТПУ были разработаны первоначальные математические подходы к решению «обратной» задачи – определению радиационных характеристик элементов помещений ОИАЭ на основе геометрически привязанных к пространству исполнительной трехмерной инженерной модели помещения точек измерения МЭД гамма-излучения.

Опыт компании «НЕОЛАНТ» в части создания и применения информационных моделей был отмечен как лучшая практика в техническом отчете МАГАТЭ IAEA-TECDOC-1919 [1]. Также, согласно отчету, опубликованному в 2021 г. исследовательским проектом Евросоюза SHARE [2] и посвященному разработке дорожной карты развития технологий и методик ВЭ ОИАЭ на ближайшие 15–20 лет, цифровая платформа Digital Decommissioning была выделена как одна из ведущих в мире для реализации цифрового формата сопровождения этапов ВЭ ОИАЭ. Кроме того, платформа Digital

Decommissioning упоминается как передовая инновационная практика в отчетах аналитических центров¹ отраслевых организаций [3].

Основным принципом, на котором основывается платформа Digital Decommissioning является применение трехмерной исполнительной модели ОИАЭ на всех этапах его подготовки к выводу и вывода из эксплуатации. При этом модель должна включать не только геометрическую составляющую, но и весь массив инженерных характеристик элементов объекта, а также данные измерений радиационной обстановки. Геометрическая составляющая модели является важнейшей частью информации об объекте ВЭ, так как процессы, технологии и риски при ВЭ во многом обусловлены геометрической (топологической) сложностью объектов, что совместно с фактором радиационного загрязнения их оборудования и конструкций требует многомерного мультивариативного анализа при разработке проектно-технологических решений по ВЭ.

Вторым базовым принципом платформы Digital Decommissioning является обязательность создания и применения именно исполнительных моделей ОИАЭ, так как реинжиниринг, имеющийся в архивах эксплуатирующих и проектных организаций бумажных чертежей, не позволит получить актуальные модели объектов: в подавляющем большинстве случаев документация сильно не соответствует реальному состоянию объекта. В наибольшей степени это свойственно для ОИАЭ, сооруженных в 40–90 гг. XX в. Обеспечить геометрическую точность модели позволяет применение современных технологий лазерного сканирования и сферического фотографирования. Проектная и эксплуатационная документация в бумажном формате используется как справочный материал, а так же как основа для заполнения данными атрибутов объектов в составе цифровой модели. При этом создание цифровой исполнительной модели ОИАЭ включает обязательную процедуру валидации данных, вносимых в атрибутивно-классовую иерархию цифровой модели. Валидация данных является важнейшей, но крайне трудоемкой задачей при создании циф-

ровой исполнительной модели ОИАЭ, требующей основных временных затрат на ее создание. Выполнение валидации данных требует сопоставления информации из множества источников (различных версий проектно-конструкторской документации из архивов объекта, проектных, конструкторских организаций, эксплуатационной документации), взаимодействия с поставщиками заводами-изготовителями, активного вовлечения цехов и подразделений объекта, подключения ветеранов ОИАЭ, вышедших на пенсию.

В настоящее время платформа Digital Decommissioning находится в стадии активного развития, практическое выполнение проектов с ее применением позволяет формировать богатую основу для совершенствования и расширения платформы. На сегодняшний день цифровая платформа Digital Decommissioning включает 12 модулей:

- «Цифровая информационная модель»;
- «КИРО»;
- «Мобильный клиент КИРО»;
- «Радиационные расчеты»;
- «Проектирование ВЭ»;
- «Банк данных для проектирования ВЭ»;
- «Локальная концепция»;
- «Имитационное моделирование»;
- «Подготовка персонала»;
- «Практические работы»;
- «Мобильный клиент для практических работ»;
- «Опыт вывода из эксплуатации».

Модули платформы Digital Decommissioning являются комплексами связанных функциональных компонентов – программ. Модули и их компоненты реализованы на основе базовых программных решений, разработанных и активно развиваемых группой компаний «НЕОЛАНТ» в течение последних 15 лет.

В платформе Digital Decommissioning под общим термином цифровая информационная модель (ЦИМ) ОИАЭ понимаются модели двух видов: цифровая исполнительная инженерная модель (ЦИИМ), цифровая исполнительная инженерно-радиационная модель (ЦИИРМ).

Для создания полнофункциональной ЦИИМ должно быть выполнено: лазерное сканирование и сферическое фотографирование помещений объекта, его вспомогательных зданий и сооружений, промплощадки, распознавание данных лазерного сканирования с формированием базовых 3D-САПР-моделей, сбор и валидация данных из проектно-конструкторской и эксплу-

¹ Отчет «Актуализация лучших российских и мировых практик, а также перспективных направлений развития технологий, оборудования, цифровых решений в области организации и выполнения работ по ВЭ ЯРОО»: Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». М.: АО «ВНИИНМ», 2019 г.

атационной документации, баз данных информационных систем, применяемых на объекте. Интеграция этих данных обеспечивает создание ЦИИМ. Необходимо отметить, что для формирования интегральной исполнительной трехмерной модели в составе модуля «Цифровая информационная модель» могут быть использованы все ведущие отечественные и зарубежные форматы 3D-САПР.

Выполнение валидации данных одновременно с лазерным сканированием и сферическим фотографированием позволяет иметь уверенность в том, что ЦИИМ содержит актуальную информацию об элементах ОИАЭ не только с точки зрения их геометрического соответствия, но и с точки зрения актуальности вводимых в ЦИИМ сведений об их характеристиках.

С учетом временных и ресурсных затрат на создание ЦИИМ ОИАЭ наиболее целесообразным временем начала формирования ЦИИМ является срок за два года перед началом разработки локальной концепции ВЭ и формирования программы ВЭ ОИАЭ, что обеспечит достоверность информации, расчетов и выводов в указанных основополагающих документах. При разработке указанных документов целесообразно применять модули «Локальная концепция» и «Опыт вывода из эксплуатации». При этом даже если в последующем конфигурация ОИАЭ претерпит изменения, например из-за принятия решения о продлении срока службы и проведении соответствующей модернизации, наличие ЦИИМ позволит создать надежную основу для интеграции всех данных процесса продления срока службы и передачи достоверной актуализированной информации об ОИАЭ на стадию ВЭ, которая в любом случае должна быть реализована. В случае же принятия решения об останове ОИАЭ, его конфигурация, очевидно, уже не претерпит в дальнейшем серьезных изменений, а ЦИИМ будет служить основой для детализированного обоснованного планирования КИРО и его последующего проведения в цифровом формате. По результатам выполнения инженерной части КИРО ЦИИМ должна быть соответствующим образом дополнена, а по результатам выполнения радиационной части КИРО на основе ЦИИМ должна быть сформирована ЦИИРМ – цифровая исполнительная инженерно-радиационная модель ОИАЭ.

ЦИИРМ является развитием ЦИИМ за счет вычисления радиационных характеристик элементов в помещениях на основе наличия в ЦИИМ всех необходимых материальных данных об его элементах и геометрически привязанных

к пространству исполнительной модели помещения результатов измерений МЭД гамма-излучения. Изначально в среде модуля «Цифровая информационная модель» платформы Digital Decommissioning формируется ЦИИМ ОИАЭ, которая в дальнейшем средствами модулей «КИРО», «Мобильный клиент КИРО» и «Радиационные расчеты» трансформируется в цифровую исполнительную инженерно-радиационную модель, элементы которой имеют заполненные значения атрибута «Удельная активность», что открывает возможности мультивариативного оптимизационного проектирования с учетом радиационного фактора, обеспечивает повышенную точность определения объемов образования РАО, расчет динамики изменения дозовых нагрузок на персонал при выполнении практических работ по ВЭ, точность оценки потребных трудовых, временных и машинных ресурсов для осуществления работ.

На выходе процесса проектирования средствами платформы Digital Decommissioning формируется цифровой проект ВЭ (ЦПВЭ), который развивает ЦИИМ/ЦИИРМ в направлении насыщения разнообразными электронными данными, документами, формируемыми на этапе разработки проектной документации, а также инструментами для отображения и работы с ними. ЦПВЭ содержит итоговый комплект разработанной проектной документации в электронном виде.

Помимо этого платформа Digital Decommissioning позволяет решить существующую проблему сферы ВЭ – отсутствие эффективного механизма повторного использования лучших инженерных практик при разработке проектов ВЭ для последующих объектов. Модуль «База данных оборудования» позволяет заказчику (эксплуатирующей организации) проанализировать разработанный ЦПВЭ и вычленив из него цифровые описания оптимальных технологических процессов, элементарных технологических операций, оборудования и расходных материалов, контейнеров, средств индивидуальной защиты и другого вспомогательного оснащения для сохранения в каталоги модуля в целях применения при разработке цифровых проектов ВЭ для последующих объектов. Это позволяет реализовывать заказчику единую техническую политику при ВЭ.

В настоящее время ведутся работы по дальнейшему усовершенствованию платформы Digital Decommissioning, связанные с повышением автоматизации сбора и обработки данных в ходе проведения инженерной и радиационной ча-

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАТФОРМЫ DIGITAL DECOMMISSIONING ДЛЯ ЦИФРОВОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫХ СТАДИЙ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОИАЭ

стей КИРО. По результатам проведенных комплексных междисциплинарных исследований разработан и запатентован способ построения ЦИИРМ остановленного для ВЭ ОИАЭ, важным элементом которого является подсистема сбора геометрических и радиационных данных в привязке к локальным координатам ограниченного пространства произвольной геометрии объекта, состоящая из множества автономных движущихся устройств (роботов, дронов), оснащенных датчиками для сбора данных, управляющей станции, модуля запуска-останова автономных движущихся устройств, подсистемы построения ЦИИМ и ЦИИРМ [4]. Применение такого способа позволит существенно повысить качество проведения КИРО, точность построения ЦИИРМ и, как следствие, качество проектирования ВЭ и организации практических работ по ВЭ ОИАЭ.

Таким образом, заложенная в платформу Digital Decommissioning методология основана на полученном опыте применения цифровых технологий для ВЭ ОИАЭ и позволяет решать самый широкий спектр задач, связанный с подготовкой и непосредственно выводом из эксплуатации таких объектов – от концептуального планирования до детальной разработки практических работ и управления проектом. По состоянию на 2024 г. платформа достигла технологической зрелости и является уникальным решением как в России, так и за рубежом, обеспечивая значительное повышение эффективности и

сокращение затрат при реализации проектов по ВЭ ОИАЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Atomic Energy Agency. Application of Plant Information Models to Manage Design Knowledge through the Nuclear Power Plant Life Cycle. Vienna: IAEA-TECDOC-1919, IAEA, 2020 г. 98 p.
2. Pancotti F. D3.1: Report detailing applicable technologies/ methodologies. SHARE. H2020 NFRP-2018 CSA: Coordination and Support Action. Grant Agreement № 847626, 2020, 499 p. [Электронный ресурс]. URL: https://share-h2020.eu/wp-content/uploads/2021/05/SHARE_D3.1-Report-detailing-applicable-technologies-methodologies.pdf (дата обращения 25.03.2024).
3. Мансуров О.А., Птицын П.Б. Вывод из эксплуатации ядерно- и радиационноопасных объектов: рынки, финансово-экономические аспекты, стратегии ВЭ и перспективные технологии (Аналитический отчет). М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2021. 162 с.
4. Тихоновский В.Л., Кононов П.В., Мендельбаум М.А., Юшицын К.В. Способ построение цифровой исполнительской инженерно-радиационной модели остановленного для вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии при выполнении комплексного инженерного и радиационного обследования указанного объекта и система для реализации указанного способа. Патент РФ, № 2815600 от 19.03.2024 г. <https://fips.ru/EGD/5b5cd772-f37d-4640-a755-56fa65ca34b1>.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2024, vol. 13, no. 3, pp. 192–196

METHODOLOGY BASICS FOR UTILIZING THE DIGITAL DECOMMISSIONING PLATFORM FOR DIGITAL SUPPORT OF NUCLEAR BACK-END ACTIVITIES

V.L. Tikhonovsky^{1,*}, A.A. Bundin¹

¹NEOLANT Group of Companies, Moscow, 105062, Russia

*e-mail: tikhonovsky@neolant.group

Received April 25, 2024; revised April 25, 2024; accepted May 14, 2024

The methodology for utilizing the Digital Decommissioning platform for digital support during the various stages of decommissioning nuclear facilities is considered. The primary focus is putted on the fundamental principles of the platform, specifically the mandatory building and utilization of detailed 3D-models of the nuclear facilities throughout the preparation and execution of decommissioning. The usage of Digital Decommissioning platform modules during the preparation and execution stages of nuclear facility decommissioning is described, including the building of detailed digital engineering and digital engineering and radiation models of the facilities, as well as the

subsequent digital design of their decommissioning and for reusing valuable engineering practices during the development of decommissioning projects for future facilities that are out of service.

Keywords: Digital Decommissioning Platform, decommissioning nuclear facilities, digital engineering model, digital engineering and radiation model.

REFERENCES

1. International Atomic Energy Agency. Application of Plant Information Models to Manage Design Knowledge through the Nuclear Power Plant Life Cycle. Vienna: IAEA-TECDOC-1919, IAEA, 2020 г. 98 p.
2. *Pancotti F.* D3.1: Report detailing applicable technologies/ methodologies. SHARE. H2020 NFRP-2018 CSA: Coordination and Support Action. Grant Agreement № 847626, 2020, 499 p. Available at: https://share-h2020.eu/wp-content/uploads/2021/05/SHARE_D3.1-Report-detailing-applicable-technologies-methodologies.pdf (accessed 25.03.2024).
3. *Mansurov O.A., Ptitsyn P.B.* Vyvod iz ekspluatsii yaderno- i radiacionno-opasnyh ob"ektov: rynki, finansovo-ekonomicheskie aspekty, strategii VE i perspektivnye tekhnologii (Analiticheskij otchet) [Decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities: markets, financial and economic aspects, renewable energy strategies and promising technologies (Analytical report)] / M.: CAIR, Chastnoe uchrezhdenie «Nauka i innovacii» Publ., 2020. 162 p.
4. *Tihonovskij V.L., Kononov P.V., Mendel'-baum M.A., Yushicin K.V.* Sposob postroenie cifrovoj ispolnitel'noj inzhenerno-radiacionnoj modeli ustanovlennogo dlya vyvoda iz ekspluatsii ob"ekta ispol'zovaniya atomnoj energii pri vypolnenii kompleksnogo inzhenernogo i radiacionnogo obsledovaniya ukazannogo ob"ekta i sistema dlya realizacii ukazannogo sposoba. [A method for constructing a digital executive engineering radiation model of an atomic energy facility stopped for decommissioning when performing a comprehensive engineering and radiation survey of the specified facility and a system for implementing the specified method]. Patent RF, no. 2815600, 19.03.2024. <https://fips.ru/EGD/5b5cd772-f37d-4640-a755-56fa65ca34b1>.