

*Журнал «Научное обозрение. Технические науки»
зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС77-57440
выдано 27.03.2014.
ISSN 2500-0799*

**Двухлетний импакт-фактор РИНЦ – 0,695
Пятилетний импакт-фактор РИНЦ – 0,319**

*Учредитель, издатель и редакция:
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,*

*Почтовый адрес: 101000, г. Москва, а/я 47
Адрес учредителя, издателя: 410056, г. Саратов,
ул. им. Чапаева В.И., д. 56
Адрес редакции: 410035, г. Саратов,
ул. Мамонтовой, д. 5*

**Founder, publisher and edition:
LLC SPC Academy of Natural History,**

**Post address: 101000, Moscow, p.o. box 47
Founder's, publisher's address: 410056, Saratov,
56 Chapaev V.I. str.
Editorial address: 410035, Saratov,
5 Mamontovoi str.**

*Подписано в печать 30.04.2025
Дата выхода номера 30.05.2025
Формат 60×90 1/8*

*Типография
ООО НИЦ «Академия Естествознания»,
410035, г. Саратов, ул. Мамонтовой, д. 5*

**Signed in print 30.04.2025
Release date 30.05.2025
Format 60×90 8.1**

**Typography
LLC SPC «Academy Of Natural History»
410035, Saratov, 5 Mamontovoi str.**

*Технический редактор Доронкина Е.Н.
Корректор Галенкина Е.С., Дудкина Н.А.*

*Распространяется по свободной цене
Тираж 1000 экз. Заказ НО 2025/2
Подписной индекс в электронном каталоге
«Почта России»: ПА518
© ООО НИЦ «Академия Естествознания»*

Журнал «НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ» выходил с 1894 по 1903 год в издательстве П.П. Сойкина. Главным редактором журнала был Михаил Михайлович Филиппов. В журнале публиковались работы Ленина, Плеханова, Циолковского, Менделеева, Бехтерева, Лесгафта и др.

Journal «Scientific Review» published from 1894 to 1903. P.P. Soykin was the publisher. Mikhail Filippov was the Editor in Chief. The journal published works of Lenin, Plekhanov, Tsiolkovsky, Mendeleev, Bekhterev, Lesgaft etc.



М.М. Филиппов (M.M. Philippov)

С 2014 года издание журнала возобновлено
Академией Естествознания

**From 2014 edition of the journal resumed
by Academy of Natural History**

Главный редактор: М.Ю. Ледванов
Editor in Chief: M.Yu. Ledvanov

Редакционная коллегия (**Editorial Board**)

А.Н. Курзанов (**A.N. Kurzanov**)

Н.Ю. Стукова (**N.Yu. Stukova**)

М.Н. Бизенкова (**M.N. Bizenkova**)

Н.Е. Старчикова (**N.E. Starchikova**)

Т.В. Шнуровозова (**T.V. Shnurovovozova**)

НАУЧНОЕ ОБОЗРЕНИЕ • ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SCIENTIFIC REVIEW • TECHNICAL SCIENCES

www.science-education.ru

2025 г.



***В журнале представлены научные обзоры,
статьи проблемного
и научно-практического характера***

***The issue contains scientific reviews,
problem and practical scientific articles***

СОДЕРЖАНИЕ

Технические науки

СТАТЬИ

ДИСПЕРСИЯ ОБЪЕМНЫХ СТРУЙНО-ПЕЧАТНЫХ И ЛАМИНИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ РАДИАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ЛИНЗ <i>Грейсх Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г.</i>	5
АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛА ТЕХНОЛОГИЙ WEBSOCKET И LONG POLLING ПРИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЧАТ-ПРИЛОЖЕНИЙ <i>Ильичев В.Ю., Иванов Н.В.</i>	12
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВІМ-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ОБСЛЕДОВАНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ <i>Качаев А.Е., Турапин С.С.</i>	18
АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФА ДЛЯ НАВИГАЦИИ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА STRAIGHT SKELETON <i>Котенко Н.А., Белов Ю.С.</i>	24
ПРОВЕДЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ <i>Лискин В.А., Егоров А.В., Нерсесов Б.А.</i>	29
ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СПОСОБА КОМПОНОВКИ РАБОЧЕГО КРИСТАЛЛА ПРОЦЕССОРА ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ <i>Павлидис В.Д., Азизов В.Э.</i>	34
РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ РАВНОВЕСИЯ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ <i>Сатыбалдыев А.Б., Ташполотов Ы., Ибраимов Т.К.</i>	39
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРКОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ <i>Тархов С.В., Шакирьянов И.Р.</i>	47
ПЕРЕХОД К ЦИФРОВОМУ УПРАВЛЕНИЮ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ <i>Хвостиков А.С.</i>	56
ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ <i>Шелехов И.Ю., Шелехова А.И., Лоскутов А.И., Непомнящих А.В.</i>	61

Физико-математические науки

СТАТЬЯ

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АДАПТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПРОСОВ В МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЕ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ <i>Золотухина Д.Ю.</i>	66
--	----

CONTENTS

Technical sciences

ARTICLE

DISPERSION OF THREE-DIMENSIONAL INKJET PRINTED AND LAMINATED MATERIALS OF RADIAL-GRADIENT INDEX LENSES <i>Greysukh G.I., Levin I.A., Ezhov E.G.</i>	5
ANALYSIS OF FUNCTIONALITY OF WEBSOCKET AND LONG POLLING TECHNOLOGIES WHEN THEY ARE USED FOR DEVELOPMENT OF CHAT APPLICATIONS <i>Ilichev V.Yu., Ivanov N.V.</i>	12
USE OF BIM-TECHNOLOGIES IN VISUAL AND INSTRUMENTAL INSPECTION OF HYDRAULIC STRUCTURES <i>Kachaev A.E., Turapin S.S.</i>	18
AN ALGORITHM FOR CONSTRUCTING A GRAPH FOR INDOOR NAVIGATION USING THE STRAIGHT SKELETON METHOD <i>Kotenko N.A., Belov Yu.S.</i>	24
CONDUCTING GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES OF THE FORMATION CONDITIONS OF GAS HYDRATES IN THE ARCTIC REGION <i>Liskin V.A., Egorov A.V., Nersesov B.A.</i>	29
OPTIMIZATION OF THE CHOICE OF THE METHOD OF LAYOUT OF THE WORKING PROCESSOR CRYSTAL FOR COMPLETING ELECTRONIC DEVICES <i>Pavlidis V.D., Azizov V.E.</i>	34
DEVELOPMENT OF A MODIFIED EQUILIBRIUM MODEL FOR COMPLEX FORMATION <i>Satybaldyev A.B., Tashpolotov Y., Ibraimov T.K.</i>	39
DESIGN OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR MANAGING A COMPUTER EQUIPMENT FLEET <i>Tarkhov S.V., Shakir`yanov I.R.</i>	47
STUDY OF ALUMINUM ALLOY ROLLING OIL ANTIFRICTION PROPERTIES BY ULTIMATE REDUCTION METHOD <i>Khvostikov A.S.</i>	56
RESEARCH AND ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF EXISTING SOFTWARE SUITES FOR SOLVING THE TASK OF BUILDING ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT <i>Shelekhov I.Yu., Shelekhova A.I., Loskutov A.I., Nepomnyaschikh A.V.</i>	61

Physical and mathematical sciences

СТАТЬЯ

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ADAPTIVE DISTRIBUTION OF REQUESTS IN MICROSERVICE ARCHITECTURE TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC CHARACTERISTICS OF NODES <i>Zolotukhina D.Yu.</i>	66
---	----

СТАТЬИ

УДК 535.5

ДИСПЕРСИЯ ОБЪЕМНЫХ СТРУЙНО-ПЕЧАТНЫХ И ЛАМИНИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ РАДИАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ЛИНЗ

¹Грейсух Г.И., ²Левин И.А., ¹Ежов Е.Г.

¹ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры
и строительства», Пенза, e-mail: grey@pguas.ru;

²ПАО «Красногорский завод имени С.А. Зверева», Красногорск,
e-mail: i.a.levin@mail.ru

Цель работы – сопоставить возможности управления фокусирующими и дисперсионными свойствами неоднородных материалов радиально-градиентных линз в зависимости от представляющих сегодня наиболее перспективными аддитивных технологий их изготовления: 3D-струйной печати с использованием нанокompозитных оптических чернил и метода ламинирования, заключающегося во взаимной термической диффузии слоев при спекании многокомпонентной заготовки. Материалы исследования – дисперсионные свойства материалов радиально-градиентных линз видимого и инфракрасного диапазонов, изготавливаемых 3D-струйной печатью и методом ламинирования. Методы исследования – теоретический анализ в рамках геометрической оптики. Представлены формулы для числа Аббе и частной дисперсии материалов радиально-градиентных линз видимого и инфракрасного диапазонов, изготавливаемых 3D-струйной печатью и методом ламинирования. Показано, что если технология 3D-струйной печати предоставляет возможность независимого управления фокусирующими и дисперсионными свойствами радиально-градиентных линз с помощью подбора концентрации и числа компонентов с высокими и низкими показателями преломления, то метод ламинирования в этом плане ограничен ассортиментом реальных оптических материалов с требуемым достаточно широким диапазоном значений показателя преломления, близкими значениями температурных коэффициентов теплового расширения, а также совместимыми профилями вязкости. Результаты статьи демонстрируют реализуемость тех широких потенциальных возможностей простых по конструкции оптических систем, которые благодаря расширению их элементной базы, в частности за счет градиентных элементов, описаны в целом ряде статей, опубликованных за последние несколько лет.

Ключевые слова: радиально-градиентная линза, число Аббе, частная дисперсия, 3D-струйная печать, метод ламинирования, нанокompозитные оптические чернила

Исследование выполнено за счет субсидии из федерального бюджета Российской Федерации на реализацию государственного задания Минобрнауки РФ № FSGS-2024-0005.

DISPERSION OF THREE-DIMENSIONAL INKJET PRINTED AND LAMINATED MATERIALS OF RADIAL-GRADIENT INDEX LENSES

¹Greysukh G.I., ²Levin I.A., ¹Ezhov E.G.

¹Penza State University of Architecture and Construction, Penza, e-mail: grey@pguas.ru;

²PJSC Krasnogorsky Zavod named after S.A. Zverev, Krasnogorsk, e-mail: i.a.levin@mail.ru

The purpose of the work. To compare the possibilities of controlling the focusing and dispersion properties of inhomogeneous materials of radial gradient index lenses depending on the most promising additive technologies for their manufacture today: 3D inkjet printing using nanocomposite optical inks and the lamination method, which consists in mutual thermal diffusion of layers during sintering of a multicomponent workpiece. Materials and methods of research. Dispersion properties of materials of radial gradient index lenses of the visible and infrared ranges manufactured by 3D inkjet printing and the lamination method. Theoretical analysis within the framework of geometric optics. Results and discussion. Formulas for the Abbe number and partial dispersion of materials of radial gradient index lenses of the visible and infrared ranges manufactured by 3D inkjet printing and the lamination method are presented. It is shown that if the 3D-inkjet printing technology provides the ability to independently control the focusing and dispersion properties of radial-gradient index lenses by selecting the concentration and number of components with high and low refractive indices, then the lamination method in this regard is limited by the range of real optical materials. These materials must have a sufficiently wide range of refractive index values, close values of temperature coefficients of thermal expansion, as well as compatible viscosity profiles. Conclusion. The results of the article demonstrate the feasibility of those broad potential capabilities of simple optical systems, which, due to the expansion of their element base and, in particular, due to gradient index elements, are described in a number of articles published in the last few years.

Keywords: radial gradient index lens, Abbe number, partial dispersion, 3D inkjet printing, nanocomposite optical ink, lamination method

The study was carried out using a subsidy from the federal budget of the Russian Federation for the implementation of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FSGS-2024-0005.

Введение

В оптике однородных сред, элементную базу которой составляют линзы со сферическими и асферическими поверхностями, выполненные из однородных оптических материалов, зеркала и дифракционные линзы (ДЛ), параметром, достаточным для характеристики каждого из оптических элементов при ахроматической коррекции оптической системы, является коэффициент дисперсии, известный как число Аббе [1].

Напомним, что ахроматическая коррекция направлена на достижение равенства оптических сил системы на двух крайних длинах волн рабочего спектрального диапазона. Число Аббе однородного оптического материала получают, используя значения показателя преломления на трех реперных длинах волн и в общем случае для диапазона волн от λ_{short} до λ_{long} оно описывается выражением

$$v = \frac{n_{\lambda_{\text{mid}}} - 1}{n_{\lambda_{\text{short}}} - n_{\lambda_{\text{long}}}}, \quad (1)$$

где индексы λ_{mid} , λ_{short} и λ_{long} относятся к центральной, короткой и длинной волнам ($\lambda_{\text{short}} \leq \lambda_{\text{mid}} \leq \lambda_{\text{long}}$) заданного диапазона.

Большинство оптических материалов обладают положительной (нормальной) дисперсией, при которой показатель преломления уменьшается с ростом длины волны.

Чтобы скорректировать вторичный спектр при апохроматической коррекции, направленной на достижение равенства оптических сил оптической системы на трех длинах волн рабочего спектрального диапазона, используется дополнительная характеристика, называемая частной дисперсией [1]. Частная дисперсия для определенного интервала длин волн от λ_i до λ_j имеет вид

$$P(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{n_{\lambda_i} - n_{\lambda_j}}{n_{\lambda_{\text{short}}} - n_{\lambda_{\text{long}}}}, \quad (2)$$

где $\lambda_{\text{short}} \leq \lambda_i < \lambda_j \leq \lambda_{\text{long}}$.

Если оптическая сила однородной линзы определяется показателем преломления ее материала, кривизнами рабочих поверхностей и толщиной, то в случае неоднородной линзы к этим параметрам добавляется градиент ее показателя преломления.

Сегодня наиболее распространенным типом среди неоднородных линз являются радиально-градиентные линзы (РГЛ). В общем случае закон изменения показателя преломления РГЛ описывается степенным рядом с базовым показателем прелом-

ления $n_0(\lambda)$ и коэффициентами радиального градиента $n_i(\lambda)$:

$$n(\lambda, \rho) = n_0(\lambda) + \sum_i n_i(\lambda) \rho^{2i}, \quad (3)$$

где λ и ρ – длина волны и расстояние от оптической оси.

Если на любой фиксированной длине волны показатель преломления $n(\lambda, \rho)$ определяет вклад в оптическую силу и в составляющие сферической аберрации РГЛ, то зависимости базового показателя преломления и коэффициентов радиального градиента от длины волны определяют дисперсионные свойства неоднородного материала РГЛ.

В случае оптики неоднородных сред и при условии, что оптическая сила элемента определяется только его толщиной и градиентом показателя преломления, характеристика аналогичная числу Аббе имеет вид [2, 3]

$$v_{\text{GIM}} = \frac{\Delta n_{\text{mid}}}{\Delta n_{\text{short}} - \Delta n_{\text{long}}}, \quad (4)$$

где Δn_{short} , Δn_{mid} и Δn_{long} – изменение показателя преломления от центра к краю РГЛ на трех реперных длинах волн. Аналогично частная дисперсия может быть определена для неоднородного материала как [2, 3]

$$P_{\text{GIM}}(\lambda_i, \lambda_j) = \frac{\Delta n_{\lambda_i} - \Delta n_{\lambda_j}}{\Delta n_{\text{short}} - \Delta n_{\text{long}}}. \quad (5)$$

Стандартные дисперсии, описываемые уравнениями (1) и (2), и в оптике неоднородных сред используются при оценке хроматического приращения оптической силы, за которую отвечают, в частности, кривизны рабочих поверхностей линзы. В этом случае показатель преломления в указанных уравнениях относится к вершине поверхности. Отсюда следует, что РГЛ обладает двумя различными механизмами формирования как оптической силы, так и дисперсии.

Возможность независимого управления фокусирующими и дисперсионными свойствами РГЛ делает такой элемент наиболее универсальным и эффективным корректором одновременно как монохроматических, так и хроматических аберраций. Даже ближайшая к РГЛ ДЛ не может сравниться с ней коррекционными возможностями. Действительно у ДЛ оптическая сила и составляющие сферической аберрации на фиксированной длине волны легко управляются законом чередования кольцевых зон микро-структуры. При этом оптическая сила ДЛ на любой длине волны

$$\Phi_{DL} = \frac{\lambda}{\lambda^*} \Phi_{DL}^*, \quad (6)$$

где Φ_{DL}^* – оптическая сила на расчетной длине волны λ^* , на которой для заданной Φ_{DL}^* рассчитывались радиусы кольцевых зон микроструктуры ДЛ.

Что касается первичного хроматизма ДЛ, то его, как и дисперсию однородного стекла, характеризуют коэффициентом дисперсии [4]. Он имеет вид

$$v_D^* = \lambda^* / (\lambda_{\min} - \lambda_{\max}). \quad (7)$$

То есть коэффициент дисперсии от микроструктуры ДЛ не зависит, а следовательно, и не управляется, целиком определяясь шириной заданного спектрального диапазона.

Возвращаясь к РГЛ и принимая во внимание всю историю развития градиентной оптики, следует констатировать, что реальная возможность управления теми или иными свойствами градиентных оптических элементов зависит от технологии получения неоднородных материалов этих элементов.

Целью исследования является сопоставление возможностей управления фокусирующими и дисперсионными свойствами неоднородных материалов РГЛ видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов в зависимости от представляющихся сегодня наиболее перспективными аддитивных технологий их изготовления: 3D-струйной печати с использованием нанокompозитных оптических чернил и метода ламинирования, заключающегося во взаимной термической диффузии слоев при спекании многокомпонентной заготовки.

Материалы и методы исследования

Дисперсионные свойства материалов РГЛ видимого и ИК диапазонов, изготавливаемых 3D-струйной печатью и методом ламинирования. Теоретический анализ в рамках геометрической оптики.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Возможности управления дисперсией нанокompозитных РГЛ видимого диапазона

Фундаментальные свойства традиционно используемых оптических материалов и технологические проблемы до недавнего времени ограничивали возможность независимого управления оптическими свойствами синтезируемых неоднородных материалов, такими как показатель преломления и дисперсия. Создание пригодных для 3D-струйной печати нанокompозитных материалов, получивших назва-

ние «оптических чернил», различающихся концентрацией мономеров и нескольких нанонаполнителей, в сочетании с усовершенствованной технологией самой струйной печати сняло это ограничение и позволило независимо управлять градиентом показателя преломления и дисперсией формируемых неоднородных оптических материалов [5].

Сами нанокompозитные чернила изготавливают путем внедрения в заданной концентрации в смесь фотоотверждающихся мономеров с низкой вязкостью одной или нескольких органических или неорганических наночастиц. Каждая наночастица имеет размер менее 10 нм, что составляет примерно 1/30 от самой короткой длины волны света, проходящего через оптическое устройство, и химически покрыта для устранения агломерации, так что рассеяние Рэлея и Ми незначительно [6]. Кроме того, чернила обладают реологическими свойствами, необходимыми для точной печати [7].

Формула (3), описывающая закон изменения показателя преломления РГЛ, не может непосредственно использоваться для оптимизации оптического материала этой линзы. Во-первых, коэффициенты радиального градиента, входящие в эту формулу, не отражают композитного характера неоднородного оптического материала. Во-вторых, коэффициенты $n_0(\lambda)$ и $n_i(\lambda)$ зависят от длины волны, и хроматическая дисперсия каждого коэффициента различна. Она является функцией как дисперсий компонентов композитного материала, так и соотношения их концентраций. Поэтому закон изменения показателя преломления РГЛ следует выразить через показатели преломления компонентов композитного материала и через их концентрации. Это позволяет сделать описанная в работах [3, 5, 8] простая линейная модель бинарных (состоящих из двух компонентов) чернил. В соответствии с ней чернила плавно превращаются из одного компонента в другой путем изменения концентраций. В линейной модели показатель преломления композитного материала описывается как линейная комбинация показателей преломления его компонентов:

$$n = C_1 n_1 + C_2 n_2, \quad (8)$$

где n – показатель преломления композитного материала, n_1 и n_2 – показатели преломления первого и второго компонентов соответственно; C_1 и C_2 – доли первого и второго компонентов такие, что

$$C_1 + C_2 = 1. \quad (9)$$

Величину C_i можно принять за объемную долю компонента i или считать относительной концентрацией компонента i . Поэтому уравнение (8) можно также записать как

$$n(C_2, \lambda) = n_1(\lambda) + C_2(n_2(\lambda) - n_1(\lambda)). \quad (10)$$

Ниже покажем, как коэффициенты радиального градиента РГЛ могут быть выражены через концентрации компонентов композитного материала.

Для исключения путаницы в обозначениях, следуя работе [3], закон изменения показателя преломления РГЛ перепишем в виде

$$N(\rho) = N_{00} + N_{10}\rho^2 + N_{20}\rho^4 + N_{30}\rho^6 + \dots \quad (11)$$

По форме таким же рядом можно записать распределение концентрации

$$C(\rho) = C_{00} + C_{10}\rho^2 + C_{20}\rho^4 + C_{30}\rho^6 + \dots \quad (12)$$

Комбинируя уравнения (11), (12) и (10), можно получить следующее соотношение для коэффициентов полинома распределения показателя преломления:

$$N_{i0}(\lambda) = (n_2(\lambda) - n_1(\lambda))C_{i0} + n_1(\lambda), \quad i = 0$$

$$N_{i0}(\lambda) = (n_2(\lambda) - n_1(\lambda))C_{i0}, \quad i \neq 0. \quad (13)$$

Линейная модель композитного материала является наиболее простой и дает удовлетворительный результат практически во всех случаях, поэтому она наиболее часто используется как для демонстрации хроматических свойств отдельных элементов, так и при расчете оптических систем с такими элементами [3, 8]. При этом линейное уравнение (8) не является идеальным приближением, также могут применяться квадратичная формула и формула Лоренца – Лоренца [3].

Действительно, двухкомпонентная линейная модель композитного материала предоставляет разработчику оптики инструменты для оценки числа Аббе v_{GIM} и частной дисперсии P_{GIM} любых как реально существующих, так и гипотетических неоднородных материалов. При известных значениях показателей преломления компонентов в конечных точках диапазонов их изменений и на реперных длинах волн v_{GIM} и P_{GIM} соответственно равны

$$v_{\text{GIM}} = \frac{n_{2,\lambda_{\text{mid}}} - n_{1,\lambda_{\text{mid}}}}{(n_{2,\lambda_{\text{short}}} - n_{1,\lambda_{\text{short}}}) - (n_{2,\lambda_{\text{long}}} - n_{1,\lambda_{\text{long}}})}, \quad (14)$$

$$P_{\text{GIM}} = \frac{(n_{2,\lambda_i} - n_{1,\lambda_i}) - (n_{2,\lambda_j} - n_{1,\lambda_j})}{(n_{2,\lambda_{\text{short}}} - n_{1,\lambda_{\text{short}}}) - (n_{2,\lambda_{\text{long}}} - n_{1,\lambda_{\text{long}}})}, \quad (15)$$

где индексы λ_{mid} , λ_i , λ_j , λ_{short} и λ_{long} относятся к тем длинам волн, на которых зафиксированы показатели преломления первого и второго компонентов.

Технология 3D-струйной печати с использованием нанокompозитных оптических чернил позволяет легко варьировать их дисперсионными характеристиками, подбирая концентрацию и число компонентов с высокими и низкими показателями преломления. Это и обеспечивает возможность независимого управления фокусирующими и дисперсионными свойствами изготавливаемых РГЛ.

Завершая раздел, приведем одно из реальных достижений в создании РГЛ струйной 3D-печатью. Это результаты работы компании NanoVox Optics [9], которая использует мономеры с высоким и низким показателями преломления, наполненные наночастицами. Компания изготовила машину для опытного производства, способную иметь до восьми печатающих головок с особыми чернилами в каждой. Эта система третьего поколения регулирует дозирование чернил, чтобы создавать оптику, в которой показатель преломления меняется с переходом от одного небольшого объема к другому.

Потенциальные области применения градиентной оптики, созданной по технологии струйной печати, включают, в частности, камеры мобильных телефонов. Благодаря РГЛ количество оптических элементов удастся сократить с восьми-девяти до четырех. Еще одной областью применения может быть разработка очков виртуальной и дополненной реальности, где критически важно учитывать расстояние между глазами наблюдателя. 3D-печать позволяет осуществлять персонализацию быстро и в конечном счете без дополнительных затрат.

2. Возможности управления фокусирующими и дисперсионными свойствами РГЛ ИК-диапазона с ламинированным градиентным материалом

Вторая рассматриваемая здесь технология получения композитных градиентных материалов основана на методе ламинирования, заключающемся во взаимной термической диффузии слоев при спекании многокомпонентной заготовки. Под данную технологию разработана специальная серия новых марок халькогенидных стекол, прозрачных в широком диапазоне ИК-спектра (от 0,9 до 14 мкм). Показатель преломления этих стекол охватывает интервал от 2,38 до 3,17, и при этом они обладают близкими значениями температурных коэффициентов теплового расширения, а также совместимыми профилями вязкости [10–12].

Диапазон оптических характеристик и количество марок этих новых стекол позволяет с достаточной гибкостью варьировать значением градиента показателя преломления формируемого неоднородного материала. При этом параметры технологического процесса коаксиального ламинирования могут быть подобраны так, чтобы зависимость показателя преломления от расстояния от оптической оси РГЛ описывалась гладкой функцией и при этом на заданном расстоянии от оптической оси сохранялся неизменным показатель преломления стекла, используемого для данного слоя [13]. Важно также отметить, что халькогенидные стекла относятся к материалам, допускающим прецизионное прессование в качестве метода формообразования поверхности оптического элемента [14]. Это в совокупности с методом ламинирования открывает возможности создания градиентного материала для линз с оптимизированными под конкретное схемное решение оптическими свойствами.

Если закон изменения показателя преломления РГЛ, ограниченной асферическими или даже сферическими поверхностями, описывается формулой (3) при $i \geq 3$ и при произвольном соотношении n_1 и n_0 , то фокусирующие и дисперсионные свойства описываются громоздкими выражениями, трудно поддающимися анализу. В то же время, если на РГЛ накладываются ограничения, введенные в работе [3], это приводит к разделению параметров, а главное – к описанию фокусирующих и дисперсионных свойств относительно простыми аналитическими выражениями. Указанные ограничения предполагают у РГЛ параболический закон изменения показателя преломления

$$n(\lambda, \rho) = n_0(\lambda) + n_1(\lambda)\rho^2, \quad (16)$$

То есть $n_2 = n_3 = 0$ и малый аргумент синуса

$$\sin\left(d\sqrt{-2n_1/n_0}\right) \approx d\sqrt{-2n_1/n_0} \leq 0,1. \quad (17)$$

В этом случае оптическая сила РГЛ равна сумме сил однородной линзы φ_{HL} (с показателем преломления n_0 , осевой толщиной d , кривизнами преломляющих поверхностей c_1, c_2) и φ_{GIM} – радиально-градиентной плоскопараллельной пластины (шайбы) толщиной d :

$$\varphi_{RGL} \approx \frac{\varphi_{HL}(\lambda_c) + \varphi_{GIM}(\lambda_c)}{\varphi_{HL}(\lambda_{min}) + \varphi_{GIM}(\lambda_{min}) - \varphi_{HL}(\lambda_{max}) - \varphi_{GIM}(\lambda_{max})} = \frac{\varphi_{HL}(\lambda_c) + \varphi_{GIM}(\lambda_c)}{\Delta\varphi_{HL} + \Delta\varphi_{GIM}}, \quad (26)$$

$\varphi(\lambda_c), \varphi(\lambda_{min}), \varphi(\lambda_{max})$ – оптическая сила на центральной, минимальной и максимальной длинах волн рабочего спектрального диапазона соответственно.

$$\varphi_{RGL} \approx \varphi_{HL} + \varphi_{GIM}, \quad (18)$$

где

$$\varphi_{HL} = (n_0 - 1)(c_1 - c_2) + d(n_0 - 1)^2 c_1 c_2 / n_0; \quad (19)$$

$$\varphi_{GIM} \approx -2dn_1. \quad (20)$$

При этом общее изменение показателя от края элемента ($\rho = \rho_{max}$) к его центру ($\rho = 0$), то есть к оптической оси, пропорционально n_1 :

$$\Delta n = n(\rho_{max}) - n(0) = n_e - n_o = n_1 \rho_{max}^2, \quad (21)$$

или

$$n_1 = (n_e - n_o) / \rho_{max}^2. \quad (22)$$

В (21) и (22)

$$\rho_{max} \approx 0,5f' / (F / \#), \quad (23)$$

где f' – фокусное расстояние оптической системы, в состав которой входит РГЛ, а $F/\#$ – ее диафрагменное число.

Оговоренные выше ограничения целесообразно дополнить соотношением, установленным авторами настоящей статьи на основе предшествующего опыта расчета ИК-объективов с РГЛ, показывающим, что оптимальные решения содержат, как правило, РГЛ, чья положительная составляющая оптической силы, обусловленная градиентом показателя преломления, составляет лишь небольшую (порядка одной двадцатой) часть от полной оптической силы этой линзы ($\varphi_{GIM} / (\varphi_{HL} + \varphi_{GIM}) = 1/20$). В результате нетрудно получить

$$\left. \begin{aligned} d\sqrt{-2n_1/n_0} &\leq 0,1 \\ -38dn_1 &= (n_0 - 1) / f' \end{aligned} \right\}. \quad (24)$$

Система уравнений (24) позволяет подобрать оптические материалы, способные обеспечить на выбранной длине волны требуемый градиент показателя преломления РГЛ.

В соответствии с обобщенным определением числа Аббе [3]

$$v = \varphi(\lambda_c) / [\varphi(\lambda_{min}) - \varphi(\lambda_{max})] \quad (25)$$

и благодаря вышеприведенным ограничениям, формула для числа Аббе РГЛ, входящего в уравнения коррекции хроматизма, также принимает относительно простой вид

Учитывая, что в соответствии с (25) и (26) числа Аббе для однородной и градиентной составляющих оптических сил РГЛ равны

$$\begin{aligned} v_{HL} &= \varphi_{HL}(\lambda_c) / \Delta \varphi_{HL}, \\ v_{GIM} &= \varphi_{GIM}(\lambda_c) / \Delta \varphi_{GIM}, \end{aligned} \quad (27)$$

и вводя коэффициент, равный отношению составляющий этих оптических сил,

$$K = \varphi_{GIM}(\lambda_c) / \varphi_{HL}(\lambda_c), \quad (28)$$

для числа Аббе РГЛ нетрудно получить

$$v_{RGL} \approx \frac{v_{HL} v_{GIM} (1 + K)}{v_{GIM} + K v_{HL}}. \quad (29)$$

Далее, возвращаясь к формуле (26) и полагая, что одна из преломляющих поверхностей РГЛ плоская, то есть $c_1 c_2 = 0$, для числа Аббе этой линзы получим

$$v_{RGL} \approx \frac{\varphi_{HL}(\lambda_c) - 2dn_1(\lambda_c)}{\varphi_{HL}(\lambda_c) \frac{n_0(\lambda_{\min}) - n_0(\lambda_{\max})}{(n_0(\lambda_c) - 1)} - 2d[n_1(\lambda_{\min}) - n_1(\lambda_{\max})]}, \quad (30)$$

или

$$v_{RGL} \approx \frac{\varphi_{HL}(\lambda_c) - 2d[n_e(\lambda_c) - n_0(\lambda_c)] / \rho_{\max}^2}{\varphi_{HL}(\lambda_c) \frac{n_0(\lambda_{\min}) - n_0(\lambda_{\max})}{(n_0(\lambda_c) - 1)} - 2d[n_e(\lambda_{\min}) - n_e(\lambda_{\max}) - n_0(\lambda_{\min}) + n_0(\lambda_{\max})] / \rho_{\max}^2}. \quad (31)$$

Формула числа Аббе, полученная аналогичным образом, но для РГЛ с двумя неплоскими преломляющими поверхностями (и, в частности, при $c_2 = -c_1$ и $c_1 c_2 = -c_1^2$), показала, что относительная погрешность, обусловленная переходом от плоско-выпуклой к двояково-выпуклой РГЛ, при аналитическом расчете числа Аббе во всех практически значимых случаях не превышает 1,5 %, а при лучевом расчете – 2 %.

Частная дисперсия РГЛ с учетом формул (2) и (31) описывается выражением

$$P_{RGL} \approx \frac{\{\varphi_{HL}(\lambda_i) - 2d[n_e(\lambda_i) - n_0(\lambda_i)] - \varphi_{HL}(\lambda_j) + 2d[n_e(\lambda_j) - n_0(\lambda_j)]\} / \rho_{\max}^2}{\varphi_{HL}(\lambda_c) \frac{n_0(\lambda_{\min}) - n_0(\lambda_{\max})}{(n_0(\lambda_c) - 1)} - 2d[n_e(\lambda_{\min}) - n_e(\lambda_{\max}) - n_0(\lambda_{\min}) + n_0(\lambda_{\max})] / \rho_{\max}^2}. \quad (32)$$

Из формул (31) и (32), так же как и из формул (4) и (5), следует, что прямое воздействие на число Аббе и частную дисперсию рассматриваемой РГЛ законом распределения показателя преломления невозможно. Эти характеристики зависят от соотношения оптических сил однородной и градиентной составляющих оптической силы РГЛ K , а также дисперсионных свойств стекол, использованных для внутреннего цилиндрического стержня $n_0(\lambda)$ и внешнего трубчатого слоя $n_e(\lambda)$ ламинированного набора.

Завершая раздел, приведем два из опубликованных реальных достижений в области создания неоднородных материалов методом ламинирования. В работе [15] сообщалось о том, что разработана серия диффузионно совместимых халькогенидных стекол для изготовления градиентной оптики для сплошного ИК-диапазона от коротковолновой до длинноволновой области с перепадом показателя преломления $\Delta n \leq 0,4$. Было продемонстрировано, что толщины слоев, допускающие диффузионное сглаживание кривой изменения показателя

преломления могут достигать 1400 мкм. Кроме того, из разработанной серии халькогенидных стекол была изготовлена заготовка толщиной 3,5 мм с осевым приблизительно линейным распределением показателя преломления и его перепадом $\Delta n \approx 0,2$.

Что касается неоднородных материалов с радиальным распределением показателя преломления, то в работе [12] сообщалось о разработке и отладке процесса, в ходе которого вместо плоских листов тонкие ИК-стеклянные трубки термически склеиваются и диффундируют. Достигнутый диаметр заготовки составляет 13,8 мм, а перепад показателя преломления $\Delta n \approx 0,2$.

Заключение

Градиентная оптика, которой посвящена настоящая статья, имеет конкретную дату рождения. Это дата опубликования в 1854 г. Дж. Максвеллом первой работы, описывающей среду со сферически симметричным распределением показателя преломления, получившую название «рыбий глаз» и являющуюся абсолютным прибором, в кото-

ром отображение осуществляется преобразованием инверсии. За прошедшие более полутора веков ученые и специалисты многократно пытались использовать градиент показателя преломления для совершенствования оптических приборов. И каждый раз реализовать в полной мере найденные решения не удавалось из-за отсутствия требуемых оптических материалов и технологических ограничений.

Тезис, под которым возрождался интерес к градиентной оптике в 1980-е гг., утверждавший, что химические и физико-химические технологии окажутся эффективнее механической обработки оптических поверхностей, не оправдался. Появилось алмазное точение, специальные сорта стекол, допускающие прецизионную штамповку линз с асферическими поверхностями, и т.д.

Очень хочется надеяться, что созданные в последние годы аддитивные технологии получения неоднородных материалов с осевым, радиальным и сферическим распределениями показателя преломления вдохнут новую жизнь в градиентную оптику и окажутся коммерчески востребованными, что обеспечит финансовую базу ее дальнейшего развития.

Настоящая статья адресована широкому кругу читателей – от студентов соответствующих специальностей до разработчиков и производителей оптических приборов. Она знакомит читателя с возможностями, открывающимися в градиентной оптике видимого диапазона благодаря 3D-струйной печати, использующей нанокompозитные оптические чернила, а также в градиентной оптике ИК-диапазона благодаря методу ламинирования, заключающемуся во взаимной термической диффузии слоев при спекании многокомпонентной заготовки.

Рассмотренные в данной работе технологии изготовления градиентных материалов демонстрируют реализуемость тех широких потенциальных возможностей простых по конструкции оптических систем, которые достигнуты благодаря расширению их элементной базы, в частности за счет градиентных элементов, и описаны в целом ряде статей, опубликованных за последние несколько лет.

Список литературы

1. Саражевский А.М. Оптика. Полный курс: учебное пособие для студентов физических специальностей уни-

верситетов. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Едиториал УРСС. 2018. 607 с.

2. Corsetti J.A. Design of ZnS/ZnSe gradient-index lenses in the mid-wave infrared and design, fabrication, and thermal metrology of polymer radial gradient-index lenses: diss. PhD. Rochester, 2017. 216 p.

3. McCarthy P.W. Gradient-index materials, design, and metrology for broadband imaging systems: diss. PhD. Rochester, 2015. 219 p.

4. Wood A., Babington J. Diffractive lens design: theory, design, methodologies and applications. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2023. 300 p.

5. Williams G.M., Harmon J.P. Dispersion controlled nanocomposite gradient index lenses. *Optics Continuum*. 2023. Vol. 2, Is 2. P. 456–472. DOI: 10.1364/OPTCON.481205.

6. Williams G.M., Akhavan H., Dupuy C., Harmon P. Additive manufacturing of freeform optics for defense applications. *IEEE Research and Applications of Photonics in Defense Conference (RAPID)*. 2021. P. 1–2. DOI: 10.1109/RAPID51799.2021.9521386.

7. Liu Y.F., Tsai M.H., Pai Y.F., Hwang W.S. Control of droplet formation by operating waveform for inks with various viscosities in piezoelectric inkjet printing // *Applied Physics A*. 2013. Vol. 111, Is. 2. P. 509–516. DOI: 10.1007/s00339-013-7569-7.

8. Yang T., Lippman D.H., Chou R.Y., Kochan N.S., Desai A.X., Schmidt G.R., Bentley J.L., Moore D.T. Material optimization in the design of broadband gradient-index optics // *Proceedings of SPIE, International Optical Design Conference*. 2013. Vol. 12078. P. 120780Z. DOI: 10.1117/12.2603644.

9. Nanovox Optics. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nano-vox.com/> (дата обращения: 22.02.2025).

10. Bayya S., Gibson D., Nuygen V., Sanghera J., Kotov M., Drake G., Deegan J., Lindberg G. Design and fabrication of multispectral optics using expanded glass map // *Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XLI*. 2015. Vol. 9451. P. 94511N. DOI: 10.1117/12.2177289.

11. Beadie G., Stover E., Gibson D. Temperature-dependent dispersion fitting for a recent infrared glass catalog. *Proceedings of SPIE, Advanced Optics for Imaging Applications: UV through LWIR IV*. 2019. Vol. 10998. P. 1099804. DOI: 10.1117/12.2518494.

12. Gibson D., Bayya S., Nguyen V., Sanghera J., Kotov M., Drake G. GRIN optics for multispectral infrared imaging // *Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XLI*. 2015. Vol. 9451. P. 94511P. DOI: 10.1117/12.2177136.

13. Грейсх Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г. Сверхсветосильный тепловизионный триплет с градиентной линзой: этапы моделирования композитного градиентного материала и потенциальные возможности оптической схемы // *Оптический журнал*. 2024. Т. 91. № 3. С. 5–13. DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-03-5-13.

14. Грейсх Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г. Методика проектирования инфракрасных объективов с однородными, градиентными и дифракционными элементами // *Оптический журнал*. 2025. Т. 92. № 3. С. 68–78. DOI: 10.17586/1023-5086-2025-92-03-68-78.

15. Gibson D., Bayya S., Nguyen V., Sanghera J., Kotov M., McClain C., Deegan J., Lindberg G., Unger B., Vizgaitis J. IR GRIN optics: design and fabrication // *Proceedings of SPIE, Advanced Optics for Defense Applications: UV through LWIR II*. 2017. Vol. 10181. P. 101810B. DOI: 10.1117/12.2262706.

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛА ТЕХНОЛОГИЙ WEBSOCKET И LONG POLLING ПРИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЧАТ-ПРИЛОЖЕНИЙ

Ильичев В.Ю., Иванов Н.В.

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, e-mail: patrol8@yandex.ru

На современном этапе развития технологий чат-приложения получили огромную популярность благодаря ряду их неоспоримых достоинств при организации обмена информацией, таких как: удобство использования, групповое общение, обеспечение конфиденциальности, доступность, возможность обмена любым мультимедийным контентом. В отличие от традиционных форм коммуникации, чат-приложения позволяют вести диалоги в реальном времени, что значительно ускоряет обмен информацией. Целью исследования является выбор наилучшей технологии из двух популярных: WebSocket и Long Polling – для создания чат-приложений различного назначения. Разработанная методика выбора технологии основана на эксперименте, состоящем из определения основной метрики работы чат-приложений, созданных с использованием данных технологий, – времени доставки сообщения от отправителя к получателю. Для реализации процедур отправки и получения чат-сообщений выбраны программные средства языка Python (в частности, фреймворк Django), позволившие создать чат-приложения, основанные на разных принципах функционирования. В пределах разработки методики составлены листинги программ, реализующие представленные технологии, в том числе организацию выбранной структуры баз данных и логических принципов работы. Проведено нагрузочное тестирование приложений с варьированием количества устанавливаемых подключений. С помощью средств языка Python также реализована визуализация результатов тестирования, позволившая выполнить анализ полученных результатов. Сделан вывод, в каких случаях целесообразнее и эффективнее использовать WebSocket, а в каких – Long Polling. Результаты данной работы могут оказать существенную помощь разработчикам чат-приложений разнообразной направленности.

Ключевые слова: чат-приложение, WebSocket, Long Polling, язык Python, нагрузочное тестирование, время доставки сообщения

ANALYSIS OF FUNCTIONALITY OF WEBSOCKET AND LONG POLLING TECHNOLOGIES WHEN THEY ARE USED FOR DEVELOPMENT OF CHAT APPLICATIONS

Illichev V.Yu., Ivanov N.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: patrol8@yandex.ru

At the present stage of technology development, chat applications have gained immense popularity due to number of indisputable advantages in organizing the exchange of information: usability, group communication, ensuring confidentiality, accessibility, ability to exchange multimedia content. Unlike traditional forms of communication, chat applications allow real-time dialogue, which significantly speeds up the exchange of information. The purpose of the study is to choose the best technology from two popular ones: WebSocket and Long Polling, for creating chat applications for various purposes. The developed technology selection methodology is based on an experiment consisting of determining main metric of chat applications created using these technologies - the time of delivery of a message from sender to recipient. To implement procedures for sending and receiving chat messages, Python software tools (in particular, Django framework) were selected, which made it possible to create chat applications based on different principles of functioning. Within the development of methodology, listings of programs are compiled that implement presented technologies, including the organization of selected database structure and logical principles of operation. Load testing of applications was carried out with a variation in the number of connections to be established. With help of Python language tools, visualization of test results is also implemented, which made it possible to analyze the results obtained. It was concluded in which cases it is more expedient and more efficient to use WebSocket, and in which Long Polling. The results of this work can provide significant assistance to developers of chat applications of various orientations.

Keywords: chat application, WebSocket, Long Polling, Python language, message delivery time, load testing

Введение

В современном мире чат-приложения стали неотъемлемой частью общения. Они не только упрощают взаимодействие между людьми, но и открывают новые горизонты для бизнеса, образования и социальных связей [1].

Чат-приложения находят применение в самых различных сферах: в бизнесе

они служат для оперативного обмена информацией и координации командной работы (например, с помощью Slack и Microsoft Teams); в образовании – для организации дистанционного обучения (например, с использованием Zoom и Google Classroom); а в социальной сфере – для поддержания связей с друзьями и семьей (например, в приложениях WhatsApp и Viber).

Исходя из этого, в отрасли веб-разработки чат-приложения стали неотъемлемой частью множества серьезных онлайн-проектов, и это объясняется несколькими ключевыми факторами. Во-первых, чат-приложения предоставляют возможность мгновенной обратной связи, позволяя пользователям задавать вопросы, получать поддержку и обмениваться информацией без задержек. Это особенно важно для онлайн-магазинов, сервисов поддержки клиентов и образовательных платформ.

Во-вторых, интеграция чат-приложений в веб-проекты способствует созданию более персонализированного опыта. Пользователи могут общаться с представителями компании или друг с другом, что создает ощущение сообщества и вовлеченности.

Кроме того, чат-приложения могут служить мощным инструментом для сбора данных о поведении пользователей. Анализ взаимодействий в чате позволяет компаниям лучше понимать потребности своей аудитории и адаптировать свои предложения под эти потребности. При этом возможна автоматизация процессов с помощью чат-ботов.

Наконец, с учетом роста популярности мобильных устройств, чат-приложения становятся важным элементом мобильных версий сайтов и приложений.

Таким образом, интеграция чат-приложений в веб-разработку не только отвечает требованиям пользователей к скорости и удобству общения, но и открывает новые возможности для бизнеса в плане взаимодействия с клиентами и анализа их поведения. В результате они становятся важным инструментом для повышения конкурентоспособности онлайн-проектов в условиях быстро меняющегося цифрового ландшафта.

Различные отрасли предъявляют к чат-приложениям большое количество все-

возможных требований, поэтому веб-разработчики постоянно сталкиваются с проблемой выбора того или иного подхода. Среди таких подходов особой популярностью пользуются технологии WebSocket [2] и Long Polling [3].

WebSocket – это технология, обеспечивающая полноценную двустороннюю, асинхронную связь между клиентом и сервером в режиме реального времени, что позволяет обмениваться данными в обе стороны без необходимости постоянной отправки HTTP-запросов.

Long Polling – это метод, при котором клиент отправляет HTTP-запрос на сервер и держит соединение открытым до тех пор, пока не получит ответ или пока не истечет тайм-аут.

Каждое из двух рассмотренных решений имеет как достоинства, так и недостатки, которые всегда зависят от конкретной реализации.

Целью работы является сравнительный анализ двух описанных подходов к реализации чат-приложений путем разработки двух рабочих вариантов чат-приложений и проведения нагрузочного тестирования.

Материалы и методы исследования

В данной работе в качестве показателя для выбора технологии для создания чат-приложений выбрана одна из важнейших характеристик (метрик) – время, за которое сообщение доходит до получателя [4].

В качестве программных средств разработки чат-приложений были выбраны язык программирования Python [5] и наиболее используемый веб-фреймворк Django для него [6].

Реализация Django-приложения состоит из трех этапов: инициализация проекта и используемых библиотек, реализация структуры базы данных, реализация логики.

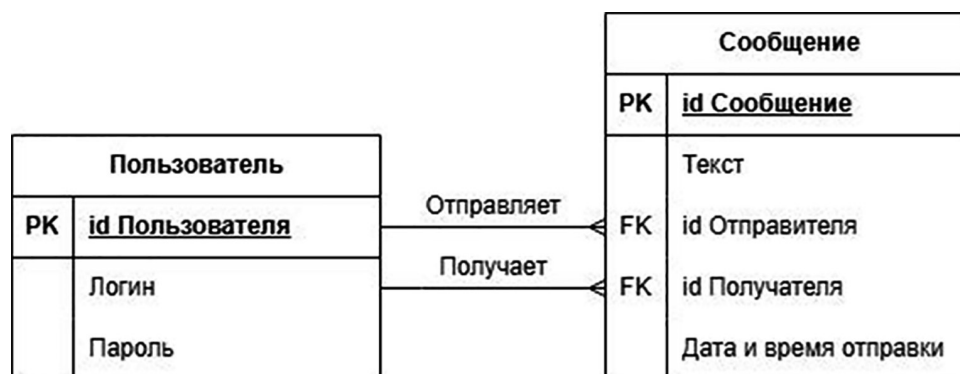


Рис. 1. Схема базы данных чат-приложения
Источник: составлено авторами

Вначале рассмотрим процедуру создания Long Polling чата. Первый описанный этап является одинаковым для всех Django-приложений, поэтому он не заслуживает особого внимания.

На рисунке 1 приведена схема, отображающая минимальную конфигурацию базы данных чат-приложения, обеспечивающую стабильную работу разрабатываемой системы.

Для реализации чата достаточно двух основных сущностей: «Пользователь» и «Сообщение». Пользователь имеет возможность авторизоваться и выбрать получателя сообщения. Получатель имеет доступ ко всем отправленным ему сообщениям. В качестве системы управления базой данных (СУБД) используется PostgreSQL [7].

После реализации базы данных можно приступить к реализации логики. Long Polling предполагает использование протокола HTTP, то есть основных запросов GET, POST и т.д. [8]. Вначале был реализован запрос создания сообщения. Данный запрос является стандартным POST, без каких-либо особенностей. Далее реализован запрос GET для получения новых сообщений. Именно он будет иметь непосредственное отношение к Long Polling. Разделим его реализацию на несколько этапов:

- 1) определение получателя из запроса;
- 2) определение последнего полученного сообщения, чтобы можно было узнать, какие сообщения являются новыми;
- 3) ожидание новых данных. На данном этапе происходит основная часть Long Polling соединения: на протяжении 20 секунд (стандартное значение) запрос ожидает новых сообщений. Если же новых сообщений не найдено, соединение прерывается. В проектной реализации Long Polling при отсутствии новых сообщений соединение необходимо инициализировать заново, но в рамках тестирования авторы старались избежать возникновения такой ситуации.

После реализации основных функций приложения производилось тестирование системы. В качестве инструмента для тестирования выбрана библиотека Locust [9]. Она предоставляет удобный веб-интерфейс для нагрузочного тестирования и способна дать необходимые для сравнения двух чат-приложений метрики. Locust тест представляет собой так называемые задачи, которые вызываются со случайной задержкой (в данном случае 0,5–1,5 с) во время работы теста. Также Locust предоставляет возможность выбора количества подключений к серверу

и темпа прироста подключений (по умолчанию составляет 1 в секунду).

Для имитации Long Polling соединения была создана задача, в которой пользователь отправляет сообщение другому пользователю. Все запросы вызываются асинхронно с помощью средств библиотеки Gevent [10, 11], так как при отправке HTTP запрос блокирует свой поток.

Метрикой является время от отправки сообщения до получения его пользователем.

Далее рассмотрим процедуру реализации WebSocket чата. Первые два этапа создания WebSocket чат-приложения полностью идентичны созданию Long Polling чат-приложения. Стоит лишь добавить, что для реализации WebSocket в Django предусмотрена библиотека Django Channels, которая и является основой разрабатываемого приложения.

Для чистоты сравнения конфигурацию базы данных оставим такой же, как и в первом приложении.

WebSocket – это технология, предполагающая реализацию нескольких основных асинхронных методов. Первый из них – connect запрос, отвечающий за создание соединения между пользователями. Далее следует запрос disconnect, разрывающий соединение. И, наконец, два основных запроса – WebSocket – receive и send, совершающих главную работу. Они работают в следующем порядке:

- 1) отправка сообщения (send);
- 2) принятие и сохранение сообщения в базе данных (receive);
- 3) отправка информации о новом сообщении получателю (receive).

Также стоит отметить, что в приложение был интегрирован брокер сообщений – база данных Redis. Это позволило осуществить асинхронный прием сообщений, что разгружает веб-сервер и улучшает общую производительность. Данное решение является стандартным для WebSocket чат-приложения.

Для тестирования была создана Locust задача, в которой пользователь отправляет сообщение, а адресат принимает его. Так же как и в первом приложении, при тестировании фиксировалось время от отправки до получения сообщения.

Результаты исследования и их обсуждение

Для каждого из двух созданных чат-приложений проведено тестирование в 3 этапа по 5 повторений. Каждый этап характеризуется разным количеством подключений: 1, 20, 100 – и временем проведения: 5 минут для каждого повторения.

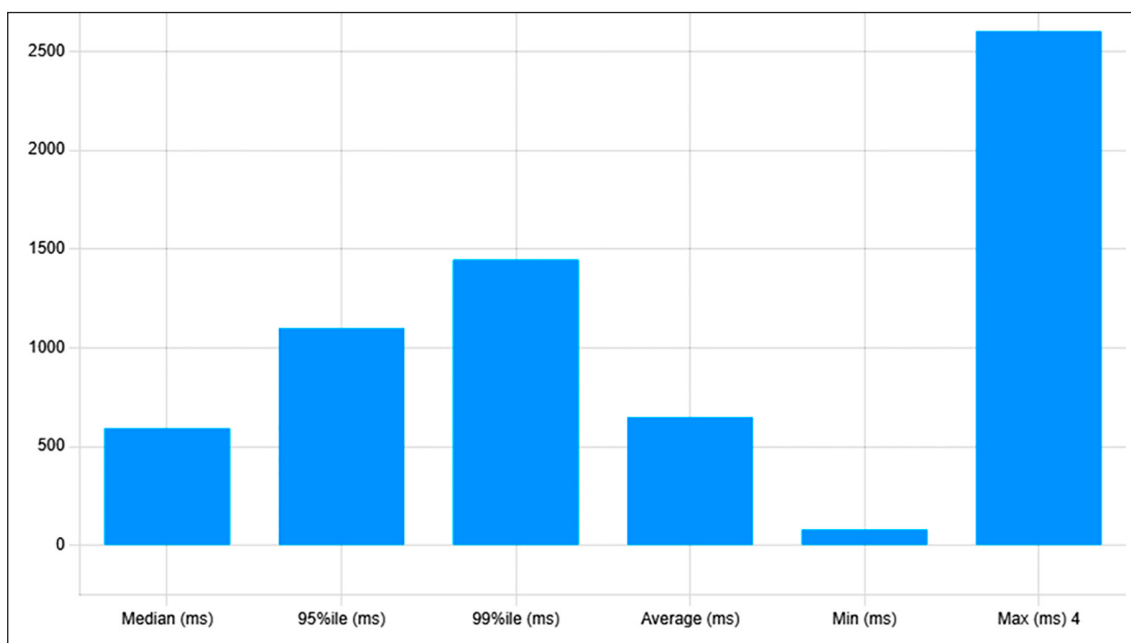


Рис. 2. Результаты метрик при тестировании Long Polling чат-приложения с одним подключением
Источник: составлено авторами

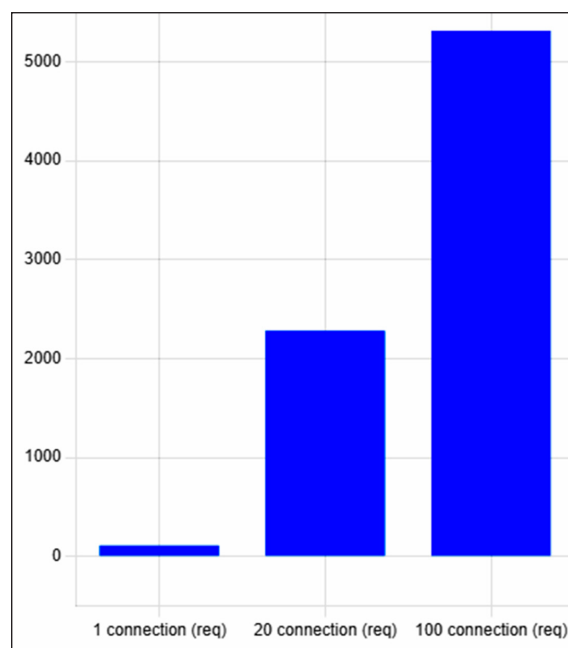


Рис. 3. Количество обработанных запросов Long Polling в зависимости от числа подключений
Источник: составлено авторами

Затем для каждого этапа вычислены значения метрик времени доставки сообщения (median – медианной, 95%ile – 95-процентильной, 99%ile – 99-процентильной, average – средней, min – минимальной, max – максимальной).

Результаты полученных значений данных метрик при тестировании Long Polling

чат-приложения с одним подключением представлены на рисунке 2.

Аналогичное тестирование было проведено для Long Polling чат-приложения с 20 и 100 подключениями. Полученное количество обработанных запросов Long Polling в зависимости от числа подключений приведено на рисунке 3.

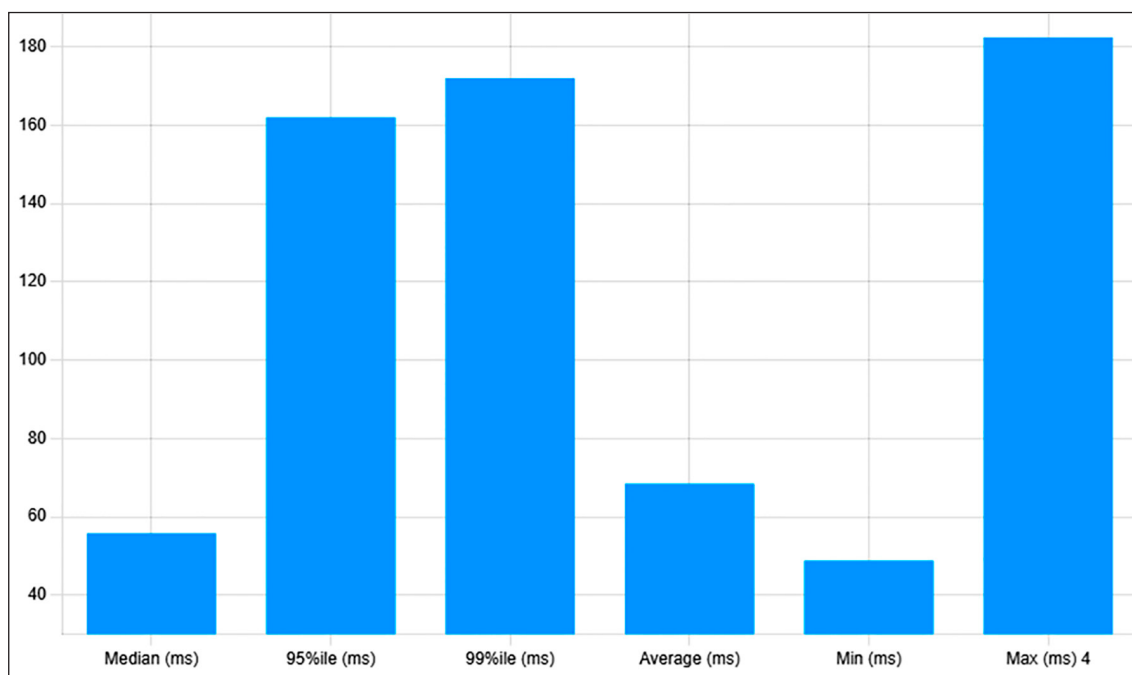


Рис. 4. Результаты метрик при тестировании WebSocket чат-приложения с одним подключением
Источник: составлено авторами

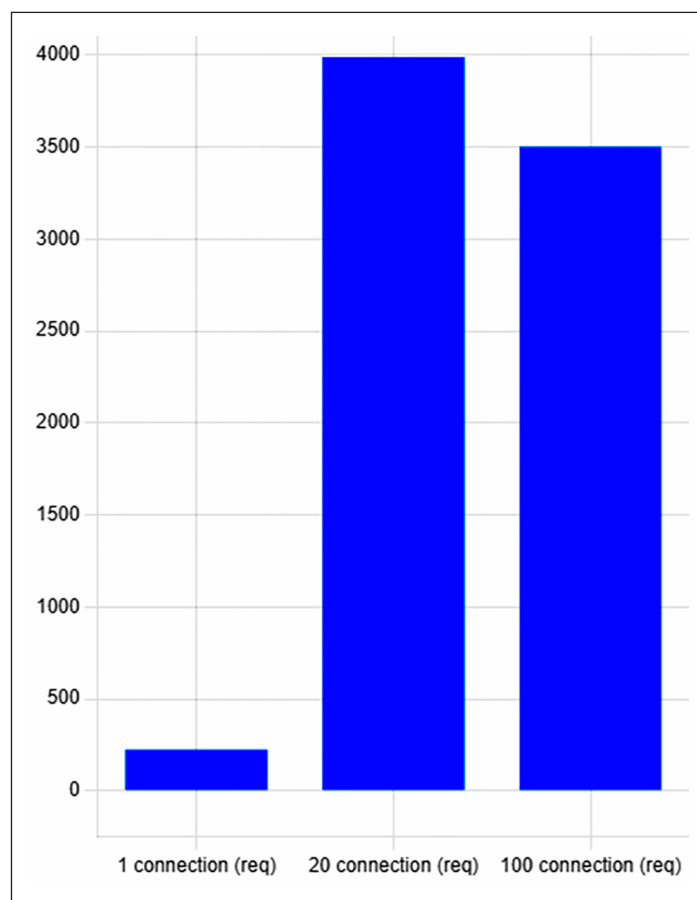


Рис. 5. Количество обработанных запросов WebSocket в зависимости от числа подключений
Источник: составлено авторами

По результатам тестирования Long Polling чат-приложений можно сделать следующий вывод: время доставки сообщения получателю и количество обработанных запросов имеют прямую пропорциональную зависимость от числа подключений.

Результаты полученных значений метрик при тестировании WebSocket чат-приложения с одним подключением представлены на рисунке 4.

Аналогичное тестирование было проведено для WebSocket чат-приложения с 20 и 100 подключениями. Полученное количество обработанных запросов WebSocket в зависимости от числа подключений приведено на рисунке 5.

Заключение

Сравним результаты тестирования двух реализованных технологий.

При увеличении числа подключений медианное и среднее время доставки сообщения Long Polling чат-приложения показывает резкий рост. Время WebSocket чат-приложения показывает устойчиво небольшой рост.

При увеличении числа подключений Long Polling чат-приложения показывает устойчивый рост числа обрабатываемых запросов, но WebSocket чат-приложение способно обрабатывать большее количество запросов.

По результатам тестирования WebSocket можно сделать следующее заключение: до определенного значения числа подключений количество обрабатываемых запросов прямо пропорционально числу подключений, но при дальнейшем его увеличении производительность падает. Отсюда следует вывод: для удержания большого количества WebSocket соединений необходимы соответствующие серверные мощности.

Таким образом, цель данного исследования, заключающаяся в сравнительном анализе двух подходов к реализации чат-приложений, является достигнутой. Разработаны два вида чат-приложений и проведено их нагрузочное тестирование, в результате которого получены графики зависимости времени доставки сообщений и количества выполненных запросов от числа подключений. По результатам сравнения результатов можно сказать, что более эффективным подходом является WebSocket, но при отсутствии достаточных серверных мощностей и небольшом числе подключе-

ний Long Polling также представляется приемлемым подходом.

Представленная работа может быть полезна как специалистам, реализующим различные технологии при разработке чат-приложений, так и для практического использования в проектной и научной деятельности.

Список литературы

1. Козориз А.В. Проблема персонализации в маркетинговых решениях современных компаний: роль чат-ботов // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2019. Т. 9, № 10-1. С. 649-656. DOI: 10.34670/AR.2020.91.10.073.
2. Хабаров С.П., Голубев К.С. Клиент-серверная экспертная система на основе технологии WebSocket // Информационные системы и технологии: теория и практика. 2017. С. 115-119. URL: https://spbftu.ru/uploads/the_science/general-science-information/publications/10-IST-part-I-2018.pdf (дата обращения: 20.03.2025).
3. Гридин В.Н., Анисимов В.И., Васильев С.А. Методы повышения производительности современных веб-приложений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 2 (212). С. 193-200. DOI: 10.18522/2311-3103-2020-2-193-200.
4. Ураев Д.А. Метрики для оценки качества чат-бот приложений // Наука, техника и образование. 2019. № 9 (62). С. 36-40. URL: <https://3minut.ru/images/PDF/2019/62/NT0-9-62-.pdf> (дата обращения: 20.03.2025).
5. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Разработка программы для нахождения оптимального распределения ресурсов с целью максимизации прибыли // Вектор экономики. 2021. № 5 (59). URL: http://www.vectoreconomy.ru/images/publications/2021/5/mathematicalmethods/Ilichev_Yurik.pdf (дата обращения: 20.03.2025).
6. Мизюков Г.С. Разработка системного программного обеспечения на основе чат-бота ChatGPT // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2024. Т. 21, № 4 (238). С. 57-64. DOI: 10.14489/vkit.2024.04.pp.057-064.
7. Шлыков А.А., Антипкин А.С. Сравнительный анализ способов защиты информации в автоматизированных системах с использованием системы управления базами данных PostgreSQL // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9, № 2. С. 1-3. DOI: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-1.
8. Борисов П.Е. HTTP-протокол прикладного уровня (обзор) // Научный аспект. 2024. Т. 22, № 5. С. 2937-2943. URL: <https://na-journal.ru/5-2024-informacionnye-tehnologii/11528-http-protokol-prikladnogo-urovnya-obzor> (дата обращения: 20.03.2025).
9. Баранова Е.М., Баранов А.Н., Борзенкова С.Ю., Шепаров И.С., Богданов А.М. Разработка безопасного веб-приложения для организации интернет-мероприятий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 9. С. 334-337. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-334-335.
10. Ермаков О.А., Брозгунова Н.П. Python – как инструмент для анализа данных // Наука и Образование. 2020. Т. 3, № 4. С. 26. URL: <https://opusmgau.ru/index.php/sec/article/view/2461/2460>. (дата обращения: 20.03.2025).
11. Ilichev V.Y. Development of program for determination of fractal dimensions of images. // International Research Journal. 2021. № 4-1 (106). С. 6-10. DOI: 10.23670/IRJ.2021.106.4.001.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ОБСЛЕДОВАНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Качаев А.Е., Турапин С.С.

ФГБНУ ВНИИ «Радуга», Радужный, e-mail: doctor_cement@mail.ru

Целью исследования является формирование методологии использования технологий информационного моделирования объектов гидротехнического назначения для их эффективного обследования с целью проведения последующих капитальных ремонтов или реконструкции. В процессе проведения исследования сформирована методология применения возможностей информационного моделирования при сопровождении визуального и инструментального обследования гидротехнических сооружений. Разработаны подходы к использованию различных систем автоматизированного проектирования и расчетов объектов гидротехнического назначения при проведении мероприятий по их обследованию. Обозначены основные производители и программные комплексы для моделирования технологических процессов в гидротехническом строительстве, которые могут быть применены в концепции информационного моделирования при обследовании объектов подобного рода. Описаны этапы применения информационного моделирования на различных стадиях обследования объектов гидротехнического назначения с учетом как рельефа, на котором располагается объект обследования, так и состояния самого гидротехнического сооружения. Установлена функциональная связь между работами по обследованию гидротехнических сооружений, полученной в результате этих работ информацией и интеграцией ее в среды различных систем автоматизированного проектирования и расчетов для анализа данных и выработки конечных рекомендаций. Определено, что безопасная эксплуатация гидротехнических сооружений достигается за счет эффективного обследования объектов с применением информационного моделирования. Показаны примеры интеграции данных, полученных с помощью лазерного сканирования рельефа и расположенного на нем гидротехнического сооружения, в цифровую модель местности с цифровым двойником гидротехнического сооружения.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, информационное моделирование, реконструкция, цифровой двойник, обследование, плотина

USE OF BIM-TECHNOLOGIES IN VISUAL AND INSTRUMENTAL INSPECTION OF HYDRAULIC STRUCTURES

Kachaev A.E., Turapin S.S.

Federal State Budgetary Scientific Institution All-Russian Research Institute «Raduga»,
Raduzhny, e-mail: doctor_cement@mail.ru

The objective of the study is to develop a methodology for using information modeling technologies for hydraulic engineering facilities for their effective inspection for subsequent major repairs or reconstruction. In the course of the study, a methodology was developed for using information modeling capabilities to accompany visual and instrumental inspection of hydraulic engineering structures. Approaches to using various automated design and calculation systems for hydraulic engineering facilities during inspection activities have been developed. The main manufacturers and software packages for modeling technological processes in hydraulic engineering construction that can be used in the concept of information modeling during inspection of such facilities have been identified. The stages of using information modeling at various stages of shelling hydraulic engineering facilities are described, taking into account both the relief on which the inspection object is located and the state of the hydraulic engineering structure itself. A functional relationship has been established between the work on inspection of hydraulic engineering structures, the information obtained as a result of these works, and its integration into the environments of various automated design and calculation systems for data analysis and development of final recommendations. It is determined that safe operation of hydraulic structures is achieved through effective inspection of objects using information modeling. Examples of integrating data obtained using laser scanning of the terrain and the hydraulic structure located on it into a digital terrain model with a digital twin of the hydraulic structure are shown.

Keywords: hydraulic structure, information modeling, digital twin, reconstruction, survey, dam

Введение

Гидротехнические сооружения (ГТС) – это объекты капитального строительства повышенного и нормального уровня ответственности [1, с. 10]. Объекты гидротехнического назначения постоянно контактируют с водой, оказывающей на них контактное, химическое и бактериологическое воздействие. Поэтому техническое состояние ГТС обеспечивается их эффективной экс-

плуатацией, своевременным техническим обслуживанием, постоянным мониторингом, текущим и капитальным ремонтами или реконструкцией (сносом) [2, с. 125]. Все вышеперечисленные виды работ укладываются в концепцию информационного моделирования BIM (Building information modeling). BIM-технологии используются для объектов капитального строительства на всем протяжении их жизненного цикла:

от проектирования и строительства до эксплуатации, реконструкции и сноса [3, с. 242].

При этом необходимо отметить, что и проектируемые объекты гидротехнического назначения, и действующие могут активно пользоваться возможностями информационного моделирования. При создании цифровых моделей гидротехнических сооружений применяются разносторонние программные продукты – как отечественных разработчиков (Renga Software, Аскон, Нанософт разработка и др.), так и иностранных представителей систем автоматизированного проектирования (Midas IT, Autodesk, Dassault Systemes и др.). Наиболее распространенными на сегодняшний день средами, в которых осуществляется разработка цифровых двойников гидротехнических сооружений, являются расчетный и моделирующий комплекс Midas GTS NX (аналог расчетного комплекса Plaxis), платформа для проектирования NanoCAD с приложением Geonics (аналог AutoCAD и ArchiCAD), программы для проектирования и расчетов металлических и железобетонных конструкций SolidWorks, Renga, ЛИРА-САПР и др. [3, с. 304].

Использование современных средств автоматизированного проектирования объектов гидротехнического назначения открывает различные возможности перед ГТС как на этапе их разработки, так и на этапах их дальнейшего жизненного цикла. Наличие различных типов ГТС (мелиоративное хозяйство, водоснабжение населенных пунктов и городов) обуславливает при оценке их технического состояния во время визуального или инструментального обследования накопление информации об их техническом состоянии. Сбор и анализ полученной при обследовании ГТС информации выявляют пути решения различных задач по поддержанию ГТС в технически исправном состоянии [4].

Важно отметить, что концептуальный подход BIM-технологий применительно к объектам гидротехнического назначения сводится к анализу разносторонней информации об объекте, полученной в результате различных изысканий (геология, геодезия, климатология и др.), методов оценки технического состояния сооружения, оценки и разработки цифровой модели рельефа (местности) (ЦМР, ЦММ), интеграции полученной информации в общую цифровую модель «объект – цифровой двойник – обследование (или строительство)». С помощью технологий информационного моделирования и различных программных продуктов, возможности которых интегрированы в концепцию BIM, можно быстро

и с высокой вероятностью смоделировать состояние объекта на любом этапе его жизненного цикла.

При визуальном обследовании ГТС выявляются различные технические нарушения целостности объектов:

- на поверхности объекта могут наблюдаться следы коррозии металлических конструкций, коррозии бетона и арматуры, усадочные трещины, неровности, включения, нарушение защитного слоя бетона, пустоты, высолы, пятна ржавчины или масла и др.;

- внутри конструктивных элементов могут быть выявлены специальными методами (например, методом неразрушающего контроля) пустоты, образовавшиеся на арматурном каркасе, нарушение целостности швов при бетонировании или укладке бетонных плит, раковины, оголение арматуры в защитном слое бетона и др.

Все вышеуказанные нарушения целостности объектов гидротехнического назначения происходят при повышенном контакте строительных материалов объекта с водой, влажными грунтами, при протекании различных химических и бактериологических процессов различной интенсивности. Нарушения целостности объектов гидротехнического назначения определяются в соответствии с [5] и сводятся к визуальному и инструментальному обследованию их технического состояния.

Цель исследования – сформировать методологию использования технологий информационного моделирования объектов гидротехнического назначения для их эффективного обследования с целью проведения последующих капитальных ремонтов или реконструкции.

Материал и методы исследования

Аналитический метод исследования возможностей технологий информационного моделирования для объектов гидротехнического назначения позволяет раскрыть и алгоритмизировать использование программных комплексов для обработки той или иной информации, полученной в результате комплексного (всестороннего) обследования ГТС. Так, например, одним из начальных этапов обследования ГТС является создание цифровой модели рельефа (ЦМР) или местности (ЦММ). Такую модель получают посредством геодезического лазерного сканирования, результатом которого является информация о рельефе (местности) в виде облака точек.

Такую интерпретацию информации о местности легко перенести в информационную среду (например, NanoCAD Geonics) и получить тригональную (трехкоординат-

ную) ЦМР (ЦММ). При этом, помимо поверхностной информации о рельефе, в перечень обследования ГТС входят работы по георадарному сканированию грунтов, освидетельствованию (например, посредством методов неразрушающего контроля) железобетонных и металлических конструкций. Так определяются физико-механические свойства грунтов под объектом обследования и геометрические характеристики ландшафта, которые в совокупности формируются объемом геолого-геодезических изысканий, необходимых при создании цифрового двойника объекта гидротехнического назначения.

С помощью лазерных технологий сканирования также получают непосредственно и сам обследуемый объект – гидротехническое сооружение (в том числе с применением беспилотных летательных аппаратов). Внешний вид ГТС позволяет получать результаты о техническом состоянии объекта при визуальном обследовании, а информационная модель объекта, полученная в результате сканирования, позволит выявить все внешние отклонения от его первоначального облика для последующего ремонта или реконструкции [6].

При таком подходе накапливается достаточно много информации – материала, который в дальнейшем должен быть правильно верифицирован и использован. Например, все конструктивные элементы ГТС в мелиоративном хозяйстве состоят из насыпного (намывного, утрамбованного) грунта, реже – из железобетонных, деревянных или металлических конструкций. Конструктивные особенности той или иной плотины в системе мелиорации земель определяются рельефом местности, залегающими грунтами, возможностями фильтрации этих грунтов и другими гидрофизическими свойствами почв. При объединении полученной информации в ходе инженерных изысканий по грунтам с трехмерной моделью самого ГТС (так называемой посадки объекта капитального строительства на местность) появляются возможности оценки несущей способности грунтов по отношению к обследуемому объекту [7].

При обследовании ГТС применяются визуальные методы и инструментальные (с использованием инструментов, принцип действия которых основан на прямом или косвенном физическом воздействии с их помощью с последующим анализом результатов их работы). Так, например, различный характер разрушения откосов ГТС (бетонных или грунтовых) при обследовании будет указывать на движение грунтового основания объекта, на деформации

как в теле (объеме) объекта, так и в сопрягаемых с ним конструкциях (металлических опорах, поручнях, навесах и др.) [6].

При моделировании поведения цифрового двойника на виртуальной местности с помощью систем автоматизированного проектирования, которые учитывают все информационно-материальные характеристики грунтов и объекта капитального строительства, получаем информацию о возможных в будущем поверхностных и внутренних повреждениях, которые и будут определять результаты эксплуатации объекта в его жизненном цикле. Время эксплуатации объектов гидротехнического назначения определяется в соответствии с [8]. Концепция BIM-моделирования позволяет продлить данный срок ввиду получения и анализа различных результатов расчетов совмещенных процессов, которые связаны между собой и влияют на срок службы сооружения.

При обследовании ГТС необходимо уделить особое внимание верификации полученных данных об объекте капитального строительства. Обследование, будь то визуальное или инструментальное, следует проводить по методике, которая устанавливает строгий порядок и последовательность необходимых измерений с помощью конкретных инструментов, с возможностью применения дублирующих инструментов для верификации общих результатов, полученных в процессе обследования объекта и создания его цифрового двойника.

Алгоритмизация последовательности проводимых при обследовании ГТС работ ложится в основу будущей цифровой модели объекта гидротехнического назначения, которая в дальнейшем будет подвергнута прочностным расчетам грунтов и оснований, оптимизации топологии самого объекта капитального строительства, анализу и верификации полученных данных. Весь этот объем работ с цифровым двойником ГТС предоставит возможность качественно выполнить работы по его ремонту или реконструкции [9].

Результаты исследования и их обсуждение

Методология обследования ГТС на предмет его технического состояния и разработки декларации безопасности объекта гидротехнического назначения должна быть безусловно комплексной. Такая методология представляет собой перечень мероприятий, включающий в себя как визуальные, так и инструментальные методы получения информации о ГТС при обследовании. При этом инструментальное обследование

ГТС позволит получать информацию, которую визуальные методы обследования предоставить не могут: прочность бетонных поверхностей (откосов) и причины их разрушения; толщина защитного слоя бетона, степень коррозии армирующей сетки каркаса железобетонных конструкций и др. [10].

Во всех мероприятиях, проводимых при обследовании ГТС, определенную помощь могут оказывать технологии информационного моделирования – BIM-технологии. Опишем наиболее важные мероприятия при обследовании объектов гидротехнического назначения во взаимосвязи с возможностями BIM-технологий по порядку их проведения.

Первый этап. Гидрогеологические и геодезические изыскания (определение залегания грунтовых вод, лазерное поверхностное сканирование местности и объекта обследования, лабораторные исследования проб грунтов из-под объекта гидротехнического назначения и прилегающих территорий, георадарное сканирование грунтов и др.).

На рисунке 1 показаны результат обработки ЦМР и интеграция объекта гидротехнического назначения в облако точек ЦМР,

разбитое сеткой из конечных элементов. Как видно из рисунка 1, сеткой конечных элементов на первом этапе для расчетного анализа разбивается только рельеф местности, а сам объект обследования – ГТС (грунтовая плотина и железобетонный блок с металлическими затворами) – остается в виде нагрузки, действующей на грунт, и в расчет не принимается. Он будет рассчитываться на следующем этапе.

Полученная в результате изысканий информация используется и анализируется в средах программных комплексов технологий информационного моделирования для создания цифровой модели местности, цифрового двойника ГТС, определения взаимодействия объекта гидротехнического назначения с обследуемыми грунтами, выявления причин разрушения конструкций в зависимости от деформации грунтов и положения уровня грунтовых вод. Полученные результаты изысканий консолидируются (обобщаются) с помощью различных систем автоматизированного проектирования и расчетов (САПР), которые призваны взаимодействовать с информационными средами BIM-технологий [11].

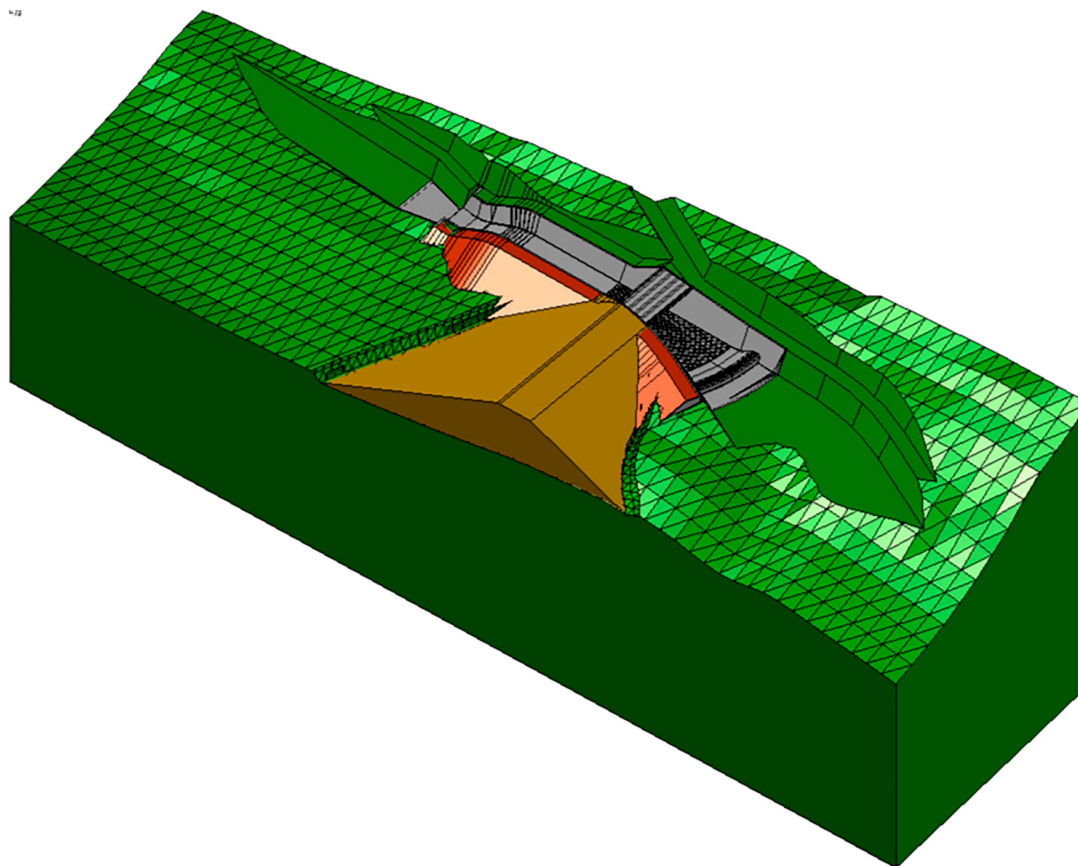


Рис. 1. Цифровая модель местности (рельефа) с гидротехническим сооружением
Источник: составлено автором

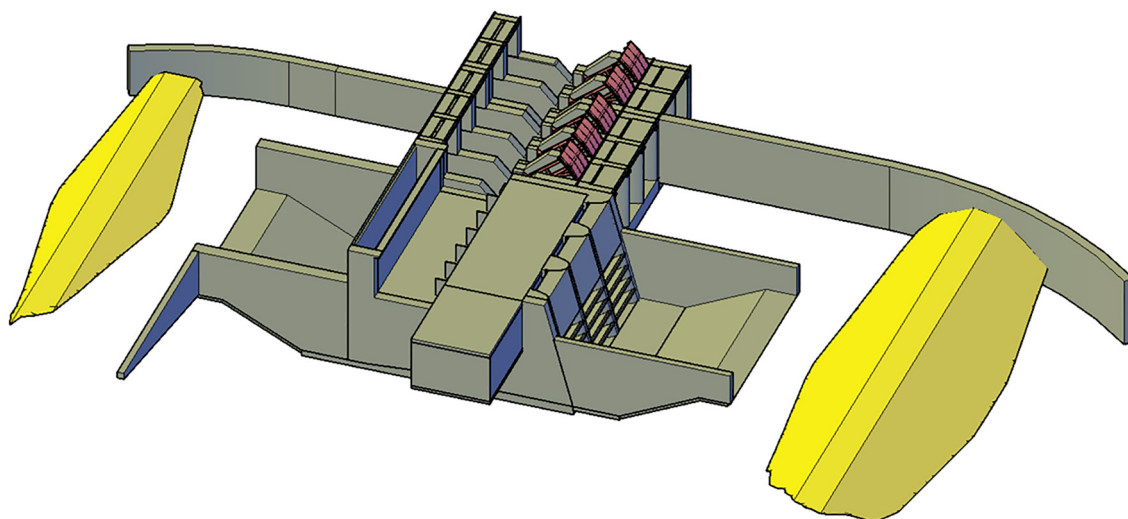


Рис. 2. Цифровой двойник гидротехнического сооружения
Источник: составлено автором

Второй этап. Визуальное обследование объекта гидротехнического назначения (измерение параметров обнаруженных повреждений при надводном и подводном визуальном осмотрах). После комплекса таких мероприятий полученная информация дополняет разработанную на первом этапе цифровую модель объекта обследования с указанием на ней мест различных повреждений, зафиксированных при визуальном осмотре. В дальнейшем она будет отражать характер деформаций и грунта, и самого объекта, а также выявлять причины обнаруженных при визуальном обследовании ГТС повреждений. На рисунке 2 представлен цифровой двойник гидротехнического сооружения с элементами цифровой модели местности.

Третий этап. Инструментальное обследование ГТС (оценка прочности бетонных конструкций методами неразрушающего контроля; определение остаточной толщины металлических конструкций; шурфование в контрольных точках для описания сечений конструкций и др.). Результаты обследования с применением BIM-технологий представляют собой аналитические данные, которые получают после расчетных мероприятий на прочность, устойчивость железобетонных и металлических конструкций, определения деформаций в теле насыпной плотины и ее железобетонных (металлических) элементов. Такие аналитико-расчетные мероприятия позволяют обосновать получаемые разрушения на объектах гидротехнического назначения и разработать мероприятия по их предотвращению в жизненном цикле объекта [12].

Четвертый этап. Совмещенные расчеты по цифровому двойнику объекта обследования и грунта, на котором он располагается, с учетом результатов натурного обследования (расчеты фильтрационно-напряженно-деформируемого состояния грунтовой плотины с верификацией полученных данных от пьезометрии грунтов и объекта обследования, совмещенные расчеты деформаций ГТС в зависимости от пьезометрии грунтов и др.). На этом завершающем этапе работ, связанных с анализом всевозможных данных, полученных при обследовании ГТС, проводится интеграция полученной информации в цифровую модель местности и объекта обследования, после чего выполняются их консолидация и различные совмещенные расчеты. Результаты расчетов позволяют сделать выводы о настоящем состоянии ГТС и выявить его прогрессирующее состояние в жизненном цикле. Окончательные результаты обследования ГТС с применением информационного моделирования также дают возможность организовывать и проводить проектные работы по реконструкции объекта с учетом всех результатов его обследования. Соответственно, таким способом продлевается жизненный цикл объекта гидротехнического назначения, его эксплуатация становится безопасной и эффективной.

Безопасная эксплуатация гидротехнических сооружений связана, прежде всего, с природными и техногенными факторами. Изменение рельефа местности приводит ГТС в нестабильное состояние: происходят процессы разрушения откосов, железобетонных и металлических конструкций обь-

ектов гидротехнического назначения и др. Обследование объектов гидротехнического назначения с использованием возможностей BIM-технологий позволяет эффективно моделировать поведение объекта на протяжении его жизненного цикла, выявлять прогрессирующие разрушения его конструкций и элементов, устранять их и препятствовать их повторному появлению. Современные возможности BIM-технологий дают возможность эффективно в режиме реального времени моделировать различные ситуации с объектами капитального строительства и находить выходы из самых сложных природных и техногенных ситуаций.

Заключение

В процессе проведения настоящего исследования сформулирована и сформирована методология применения возможностей BIM-технологий при сопровождении визуального и инструментального обследования гидротехнических сооружений. Разработаны подходы к использованию различных систем автоматизированного проектирования и расчетов объектов гидротехнического назначения при проведении мероприятий по их обследованию. Обозначены основные производители и программные комплексы для моделирования технологических процессов в гидротехническом строительстве, которые могут быть применены в концепции BIM-моделирования при обследовании объектов подобного рода. Описаны этапы использования информационного моделирования на различных стадиях обстреливания объектов гидротехнического назначения с учетом как рельефа, на котором располагается объект обследования, так и состояния самого гидротехнического сооружения. Установлена функциональная связь между работами по обследованию ГТС, полученной в результате этих работ информацией и интеграцией ее в среды различных систем автоматизированного проектирования и расчетов для анализа данных и выработки конечных рекомендаций. Определено, что безопасная эксплуатация гидротехнических сооружений достигается за счет эффективного обследования объектов с применением BIM-технологий. Показаны

примеры интеграции данных, полученных с помощью лазерного сканирования рельефа и расположенного на нем гидротехнического сооружения, в цифровую модель местности с цифровым двойником ГТС.

Список литературы

1. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Гидротехнические сооружения: учебное пособие. Новочеркасск, 2018. 207 с.
2. Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П., Солдатов П.В., Толстиков В.В. Гидротехнические сооружения. Часть 1: учебник для вузов. Издание второе, исправленное и дополненное. М.: АСВ, 2011. 536 с.
3. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК Пресс, 2011. 392 с.
4. Бабчук В., Шилова Л., Евстратов В. Использование технологий информационного моделирования в гидроэнергетическом строительстве // Энергетическая политика. 2022. № 10 (176). С. 66-73. DOI: 10.46920/2409-5516_2022_10176_66.
5. Методические рекомендации по осуществлению федерального государственного строительного надзора при строительстве и реконструкции гидротехнических сооружений объектов электроэнергетики // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. 18.05.2017. 167 с.
6. Качаев А.Е., Турапин С.С. Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. 2024. № 3. С. 6-10. DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.
7. Качаев А.Е. К вопросу разработки комплексных расчетных моделей грунтовых плотин мелиоративных систем для их численного моделирования // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков (шифр-МКРНИП): Сборник материалов XXXIII международной научно-практической конференции, Москва, 16 декабря 2024 года. М.: АНО ДПО Центр развития образования и науки, 2024. С. 278-284. DOI: 10.26118/4476.2024.20.22.007.
8. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997 N 117-ФЗ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/11222> (дата обращения: 05.03.2025).
9. Качаев А.Е. Критерии эффективности при реконструкции грунтовых плотин // Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков (шифр-МКРНИП): сборник материалов XXXIII международной научно-практической конференции, Москва, 16 декабря 2024 года. М.: АНО ДПО Центр развития образования и науки, 2024. С. 285-291. DOI: 10.26118/6364.2024.18.47.008.
10. Hasan H., Naimi S., Hameed M.M. A Comprehensive Analysis of BIM Technology's Critical Role in Assessing Cost for Complex Dam Construction Projects // Math. Model. Eng. Probl. 2023. № 10. P. 767-773. DOI: 10.18280/mmp.100305.
11. Zhang Z., Zhang S., Zhao Z., Yan L., Wang C., Liu H. HydroBIM—Digital design, intelligent construction, and smart operation // J. Intell. Constr. 2023. Vol. 1. P. 9180014.
12. Nawari N. BIM Data Exchange Standard for Hydro-Supported Structures // J. Archit. Eng. 2019. Vol. 25. Is. 3. P. 04019015. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000360.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФА ДЛЯ НАВИГАЦИИ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА STRAIGHT SKELETON

Котенко Н.А., Белов Ю.С.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Москва, e-mail: nikita_kot2@mail.ru, yselov@bmstu.ru*

Одной из наиболее популярных функций современных интерактивных карт является поиск оптимальных маршрутов, который обычно выполняется на основе навигационного графа. Целью данной работы было рассмотрение алгоритма генерации навигационного графа для схемы помещения. В ходе исследования выполнено сравнение методов Medial Axis и Straight Skeleton для построения скелета геометрической фигуры. Был представлен и описан алгоритм, использующий метод Straight Skeleton для формирования скелета и определения полного контура помещения, с выделением ключевых точек и их последующей фильтрацией. Предложен метод формирования ребер графа с проверкой на пересечение с контуром помещения и оптимизацией соединений через удаление ребер с неоптимальными углами. Определены потенциальные улучшения алгоритма, которые можно внести для генерации более эффективного навигационного графа. Сделаны выводы, что уже на данный момент алгоритм позволяет формировать оптимальный навигационный граф для вычисления кратчайших путей, близких к реальным маршрутам, при минимальных требованиях к памяти. Данное исследование призвано продемонстрировать алгоритм, основанный на применении анализа изображений для формирования навигационного графа и его использования в реальных задачах по навигации на интерактивной карте.

Ключевые слова: навигационный граф, алгоритм, straight skeleton, medial axis, вершины, ребра, оптимальный маршрут

AN ALGORITHM FOR CONSTRUCTING A GRAPH FOR INDOOR NAVIGATION USING THE STRAIGHT SKELETON METHOD

Kotenko N.A., Belov Yu.S.

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow,
e-mail: nikita_kot2@mail.ru, yselov@bmstu.ru*

One of the most popular features of modern interactive maps is the search for optimal routes, which is usually performed based on the navigation graph. The purpose of this work was to consider an algorithm for generating a navigation graph for a room layout. The study compared the methods of Medial Axis and Straight Skeleton for constructing the skeleton of a geometric figure. An algorithm was presented and described using the Straight Skeleton method to form a skeleton and determine the complete contour of the room, with the selection of key points and their subsequent filtering. A method is proposed for forming graph edges with a check for intersection with the contour of the room and optimizing connections by removing edges with suboptimal angles. Potential algorithm improvements that can be made to generate a more efficient navigation graph have been identified. It is concluded that already at the moment the algorithm allows you to form an optimal navigation graph for calculating the shortest paths.

Keywords: navigation graph, algorithm, straight skeleton, medial axis, vertices, edges, optimal route

Введение

Интерактивная карта – современный и крайне удобный способ представления географических данных с множеством функций, среди которых одна из самых востребованных – это навигация [1]. Но для реализации поиска оптимальных маршрутов на интерактивной карте офиса, помещения или другого замкнутого пространства необходимо иметь соответствующий навигационный граф, по которому будут строиться кратчайшие пути. Поэтому можно считать актуальной разработку алгоритма для генерации навигационного графа на основе схемы помещения.

Цель исследования – рассмотреть основные шаги разработанного алгоритма генерации навигационного графа для помещений на основе скелета его схемы, формирующегося с использованием метода Straight Skeleton.

Материалы и методы исследования

Задачу, которую решает исследуемый алгоритм, можно сформулировать следующим образом: необходимо построить оптимальный навигационный граф на основании схемы помещения для последующего его использования в определении оптимальных маршрутов на интерактивной карте.

Навигационный граф – структура, моделирующая набор возможных маршрутов внутри помещения или любого другого пространства, для которого есть необходимость анализа и поиска кратчайших путей или любых других задач, связанных с графами. Каждая вершина имеет координаты по ОХ и ОУ. Ребра соединяют вершины между собой и могут иметь предустановленный вес [2].

Критерием оптимальности графа можно считать адекватное как количество, так и расположение вершин графа в двумерном пространстве, а также набор ребер, соединяющих узлы графа.

Построенная структура помещения должна позволять строить оптимальный маршрут от одной точки до другой так, чтобы быть максимально схожим с тем, как человек добирается от одного места к другому в реальной жизни.

Поэтому граф обязательно должен быть связным, либо в случае наличия набора островных точек необходимо потом вручную их удалять или соединять с графом другого помещения (этажа).

Минимизация количества вершин и ребер графа связана с необходимостью хранить его отдельно в базе данных и памяти приложения. Поэтому важно получить такой набор вершин и ребер, который позволит эффективно строить кратчайшие пути и при этом не будет занимать много памяти.

Общая структура разработанного алгоритма представлена на следующей схеме (рис. 1). Далее последует подробный разбор каждого шага алгоритма из представленной схемы и применяемых методов.

Методы Medial Axis u Straight Skeleton

В основе алгоритма лежат методы для построения скелета помещения, из которого далее будут выделяться ключевые точки и проводиться ребра графа. Среди наиболее популярных методов можно выделить два основных: Medial Axis (медиальная ось) и Straight Skeleton (прямолинейный скелет).

Medial Axis можно рассматривать как отдельное определение – набор точек, имеющих более одной ближайшей точки на контуре геометрического объекта. То есть для каждой точки медиальной оси можно построить окружность определенного радиуса, и она будет касаться внешнего контура в двух и более точках [4].

Таким образом, получается топологический скелет, который определяет форму и сохраняет основные детали геометрической фигуры.

Straight Skeleton же сильно схож с Medial Axis, но имеет отличие в использовании преимущественно прямых отрезков в своей основе, в то время как медиальная ось может включать в себя параболические кривые (рис. 2) [5].

Именно данное различие повлияло на выбор прямолинейного скелета в качестве основы для рассматриваемого алгоритма, так как такой формат позволит проще определять ключевые точки. Рассматриваемый алгоритм можно адаптировать и под использование Medial Axis в качестве скелета помещения, но придется переопределить набор ключевых точек.

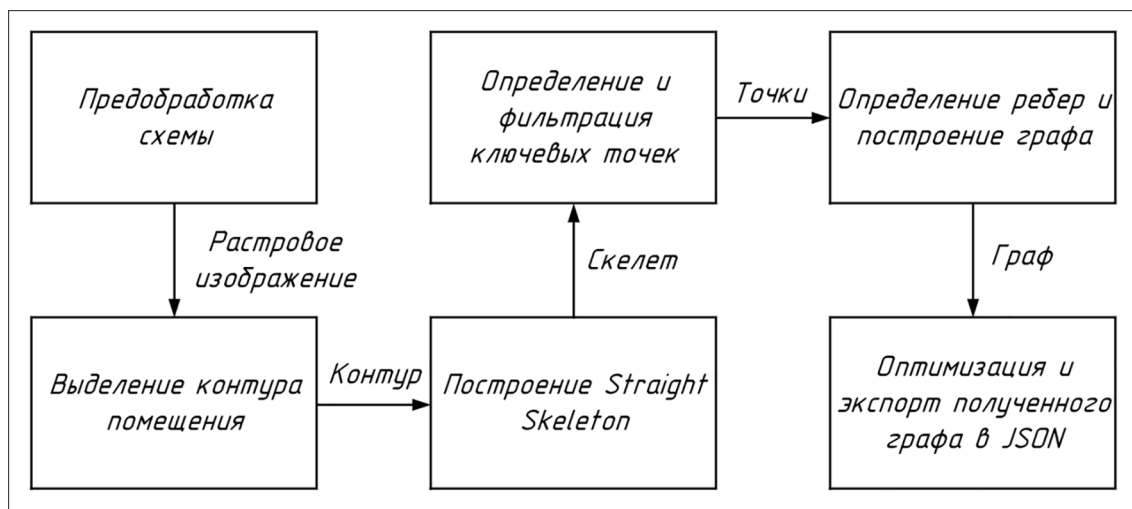


Рис. 1. Схема алгоритма
Источник: составлено авторами на основе [3]

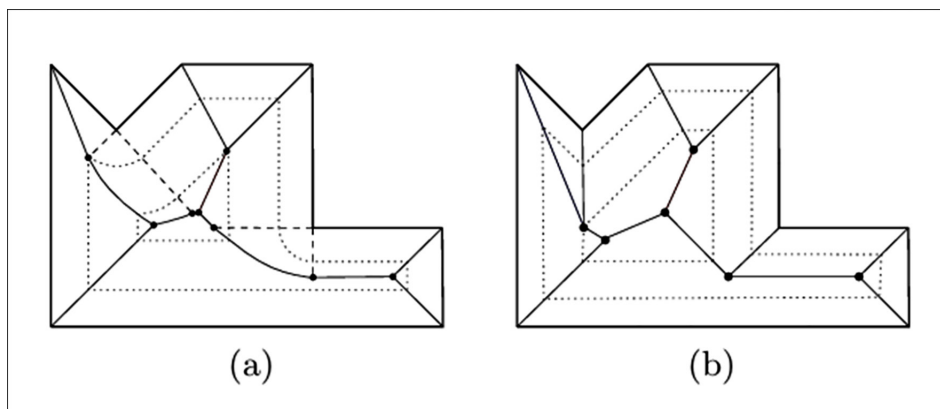


Рис. 2. Сравнение скелетов многоугольника (a – Medial Axis, b – Straight Skeleton)
Источник: составлено авторами на основе источников [4; 5]

Предобработка схемы

Перед выполнением основных шагов алгоритма необходимо провести преобразование схемы помещения. Нужно убрать лишние детали, которые могут помешать определить контур и скелет помещения, и преобразовать схему (из SVG или другого формата) в растровое изображение.

Так как в итоге выполнения алгоритм экспортирует граф с координатами по ОХ и ОУ, то важно, чтобы загружаемое изображение было оригинального разрешения для корректного наложения полученного графа при загрузке в интерактивную карту.

В случае с форматом SVG это делается достаточно просто, если правильно настроена разметка, которая позволит вручную или программно удалить лишние части схемы. Но при преобразовании такой схемы в растровое изображение могут возникнуть проблемы с масштабированием, особенно при использовании онлайн-сервисов. Здесь необходимо определить коэффициент масштабирования разрешения схемы, временно уменьшить ее разрешение с помощью SVG-атрибутовкратно полученному коэффициенту и выполнить преобразование в растр.

В итоге изображение обрабатывается алгоритмом: выполняется загрузка, бинаризация и устранение шумов, которое убирает небольшие помехи и не препятствует дальнейшему формированию корректного контура помещения.

Выделение контура помещения

Далее следует шаг по вычислению контура помещения. Данный алгоритм реализован в математических пакетах языка программирования Python, поэтому для по-

строения контура использовалась функция библиотеки OpenCV *findContours*.

Важно также при определении контура использовать в функции для параметра *mode* значение *RETR_TREE* для получения иерархии контуров и далее объединить эту иерархию в единый полный контур помещения. Это необходимо для последующей оптимизации ребер графа. На выходе получается бинарная матрица, которая показывает, есть ли точка контура для конкретного пикселя изображения.

Построение скелета помещения

Далее необходимо построить скелет помещения. Метод Straight Skeleton реализован в библиотеке *skimage.morphology* и представлен функцией *skeletonize*. Также в библиотеке есть функция *medial_axis* для построения медиальной оси изображения, так что алгоритм можно доработать и выборочно использовать как прямолинейный скелет, так и медиальную ось в качестве основы для генерации графа. Но в случае Medial Axis будут отличаться дальнейшие шаги по выделению ключевых точек из-за ранее упомянутых различий двух подходов к построению скелета. На выходе данного блока алгоритма также получается бинарная матрица, которая показывает, присутствует ли точка скелета в конкретном пикселе изображения.

Выделение и фильтрация ключевых точек

Далее предстоит выделить ключевые точки скелета, которые станут вершинами графа. Для всех точек прямолинейного скелета (в виде бинарной матрицы) можно применить 8-связный шаблон: пиксель считается связанным с другим, если является соседом как по горизонтали, так и по диагонали матрицы [3].

Выделяемые ключевые точки можно поделить на 3 типа:

1. Листья – в качестве соседа имеют только одну точку. Обычно представляют собой переходы в кабинеты, лестницы, лифты и т.д.

2. Узлы – в качестве соседей имеют 3 и более точек, то есть являются разветвляющимися точками.

3. Точки изгиба – с них начинается изгиб отрезков прямолинейного скелета, то есть для этих точек применим формат шаблона, при котором они имеют одного горизонтального соседа и при этом одного соседа по диагонали, что отражает положение точки на углу (не 90° и 180°) соединения двух отрезков скелета.

Так как количество точек после их поиска на скелете может получиться огромным (особенно точек изгиба из-за неровности отрезков), то необходимо отфильтровать их относительно друг друга по расстоянию между собой. Было определено, что оптимально фильтровать каждый полученный набор точек по отдельности, листья относительно узлов и точки изгиба относительно набора узлов и листьев.

Так как приемлемое расстояние между точками может зависеть от разрешения изображения, то предусмотрено назначение минимальных допустимых расстояний в качестве констант. На выходе получается три набора ключевых точек, для которых определены их координаты по ОХ и ОУ.

Построение графа

Следующим шагом алгоритма будет непосредственно формирование графа на основе ранее выделенных ключевых точек. Но сначала необходимо понять, как проводить ребра между вершинами.

Принцип формирования ребер между ключевыми точками следующий: для каждой вершины проводятся аппроксимированные отрезки к другим ключевым точкам, и если данное ребро пересекает или проходит слишком близко к полному контуру помещения, то это ребро не рассматривается. Все остальные ребра сохраняются и входят в сформированный граф [3]. Такой подход позволит соединять между собой только те точки, на пути которых нет преград.

Оптимизация полученного графа

Но полученный набор ребер все равно избыточен из-за множества перекрестных соединений или соединений под слишком острыми или тупыми углами. Самым оптимальным набором ребер можно считать такой набор, в котором соединения идут под $\sim 45^\circ$, $\sim 90^\circ$ и $\sim 180^\circ$ [6].

Поэтому необходимо отфильтровать полученный набор ребер с учетом неоптимальных углов. Сделать это можно перебором всех ребер, вычислением углов между ними с помощью формулы косинуса угла между векторами и удалением тех соединений, которые проходят под некорректным углом. Для этого также была выделена константа, определяющая «чувствительность» таких углов.

Дальше остается только экспортировать сформированный граф в нужный формат (например, JSON) и использовать его для построения кратчайших путей на интерактивной карте [1].

Результаты исследования и их обсуждение

В качестве примера работы алгоритма выбран третий этаж учебного корпуса № 3 кампуса Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Схема этажа представлена в виде SVG-документа. Выполнено преобразование плана коридора в растровое изображение с сохранением оригинального разрешения. В результате выполнения алгоритма получается следующий граф, наложенный на схему коридора (рис. 3).

Результат программного поиска кратчайшего маршрута между аудиториями на интерактивной карте представлен на следующем изображении (рис. 4).

Хотя сейчас алгоритм генерирует вполне адекватный и рабочий граф, все равно есть моменты, которые можно усовершенствовать.

1. Объединение близких точек в кластеры. Вместо фильтрации можно объединять рядом стоящие вершины и аккумулировать все соединения в этот кластер. Данное улучшение сделает граф более подходящим для поиска реальных маршрутов [7].

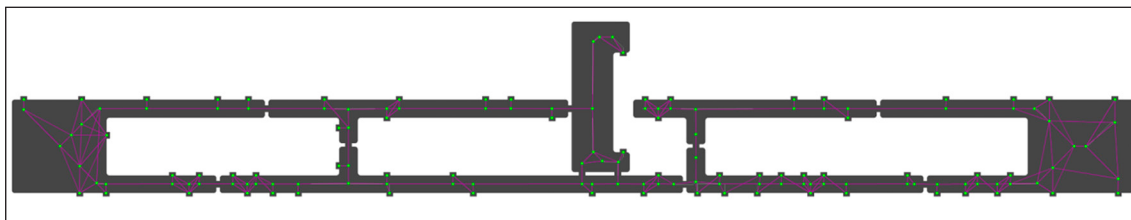


Рис. 3. Результат применения алгоритма на схеме коридора третьего этажа УАКЗ кампуса КФ МГТУ
Источник: составлено авторами по результатам работы алгоритма

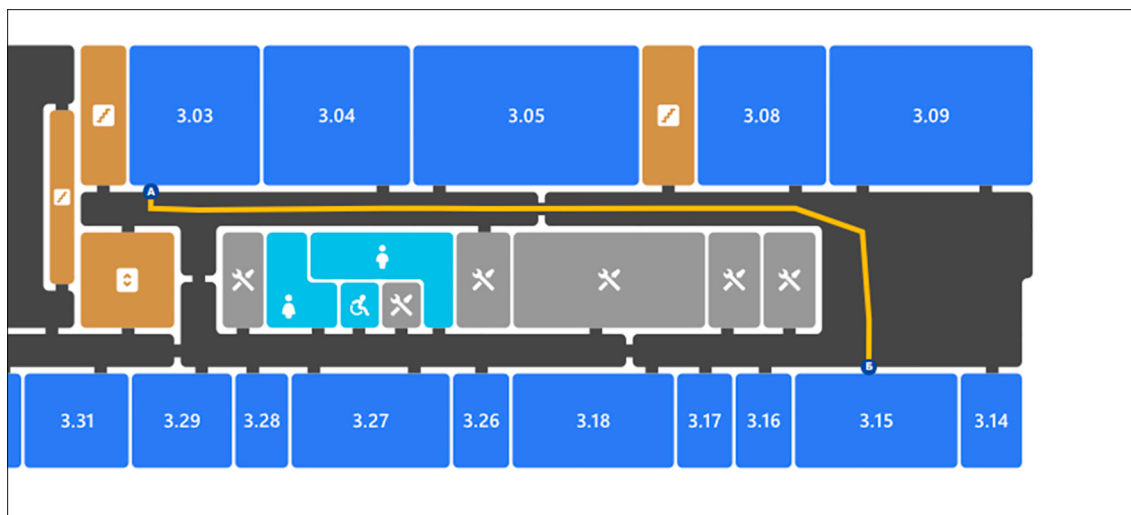


Рис. 4. Пример программного построения оптимального маршрута на основе сформированного графа
 Источник: составлено авторами по результатам работы алгоритма

2. Расширение области генерации графа до аудиторий. Сейчас граф строится только на однородном коридоре и не учитывает кабинеты. Это не очень удобно, так как приходится преобразовывать схему, убирая лишние помещения и детали, и исключаются случаи, когда нужно расширить область графа до внутренних комнат.

3. Доработка фильтрации ребер. Сейчас алгоритм удаляет множество лишних ребер за счет выборки по углу, но часто отсекаются корректные ребра или остаются некорректные при небольших изменениях порогового угла.

4. Реализация собственного алгоритма скелетизации помещения. Это позволит на этапе построения прямолинейного скелета отсечь ненужные точки и оставить только ключевые, что повысит производительность алгоритма [5].

Заключение

В данной статье были рассмотрены основные шаги алгоритма построения графа для навигации внутри помещения и обоснован выбор метода Straight Skeleton вместо Medial Axis. Разработанный алгоритм позволяет быстро вычислять навигационный граф по схеме помещения, но имеет ряд недоработок, которые можно исправить в будущем.

Список литературы

1. Котенко Н.А., Белов Ю.С. Анализ архитектуры веб-приложения интерактивной карты университета // Научные технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, (Калуга 23–25 апреля 2024 г.). Т. 2. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 22–27.
2. Flikweert P., Peters R., Díaz Vilariño Lucia, Voûte Robert, Staats B. Automatic Extraction of a Navigation Graph Intended for Indoor Navigation From an Indoor Point Cloud // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2019. Vol. IV-2/W5. P. 271–278. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-271-2019.
3. Clementini Eliseo, Pagliaro Andrea. The Construction of a Network for Indoor Navigation. 6th International Conference on Geographical Information Systems Theory // Applications and Management. 2020. P. 254–261. DOI: 10.5220/0009488902540261.
4. van Toll Wouter, Cook IV, Kreveld Marc, Geraerts Roland. The Explicit Corridor Map: A Medial Axis-Based Navigation Mesh for Multi-Layered Environments. 2017. P. 1–33. DOI: 10.48550/arXiv.1701.05141.
5. Cheng S.-W., Mencil Liam, Vigneron A. A faster algorithm for computing straight skeletons // ACM Transactions on Algorithms. 2016. Vol. 12. No. 3. P. 1–21. DOI: 10.1145/2898961.
6. Fu Meiqing, Qi Bing, Issa Raja. Generating straight skeleton-based navigation networks with Industry Foundation Classes for indoor way-finding // Automation in Construction. 2020. Vol. 112. No. 4. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.103057.
7. Mortari Filippo, Clementini Eliseo, Zlatanova Sisi, Liu Liu. An indoor navigation model and its network extraction // Applied Geomatics. 2019. Vol. 11. No. 2. P. 413–327. DOI: 10.1007/s12518-019-00273-8.

УДК 551.46.09:504.42:504.054

ПРОВЕДЕНИЕ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Лискин В.А., Егоров А.В., Нерсесов Б.А.

*ФГБУН «Институт океанологии имени П.П. Ширшова» Российской академии наук,
Москва, e-mail: liskin@ocean.ru*

В Карском море выявлены значительные перспективы нефтегазоносности, подтвержденные результатами многократных исследований и количественных оценок. Целью исследований является анализ и обсуждение выполненных геолого-геофизических исследований условий формирования газовых гидратов в арктическом регионе. В результате постановки геолого-геофизических задач исследований, включая исследование условий формирования газовых гидратов, ключевой акцент был сделан на сборе и систематизации существующих данных о донных осадках в акваториях Карского моря, выбранных для проведения испытаний и научных исследований с использованием автономного океанологического комплекса, разработанного в Институте океанологии. В процессе исследований на поверхности дна с помощью пробоотборников обнаружен наилот коричневого цвета, обводненный и окисленный. Ниже залегают осадки с характерной окраской и повышенным уровнем восстанавливаемости, часто содержащие включения гидро-троилита. Все исследования, как правило, проводились с использованием бокс-корера или трубки «Неймисто», что ограничивало глубину отбора проб до 30–40 см ниже поверхности дна. Использование сенсоров метана для непрерывного мониторинга поверхностных вод позволяет осуществлять количественный контроль концентраций метана. Анализ массивов данных, полученных в ходе исследований в Карском море, предоставляет возможность оценки эмиссии метана из водной среды в атмосферу. Основные зоны эмиссии метана включают эстуарии Енисея и Оби, а также прилегающие мелководные участки. По мере удаления от этих зон интенсивность эмиссии метана значительно снижается, и на глубине более 100 м она становится практически незначимой.

Ключевые слова: комплекс, автономный, экологический, мониторинг, углеводородные, проявления, метан

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2024-24.

CONDUCTING GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES OF THE FORMATION CONDITIONS OF GAS HYDRATES IN THE ARCTIC REGION

Liskin V.A., Egorov A.V., Nersesov B.A.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science,
Moscow, e-mail: liskin@ocean.ru*

Significant oil and gas potential has been identified in the Kara Sea, confirmed by the results of multiple studies and quantitative assessments. The purpose of the research is to analyze and discuss the performed geological and geophysical studies of the conditions of formation of gas hydrates in the Arctic region. As a result of the formulation of geological and geophysical research objectives, including the study of the conditions of formation of gas hydrates, the key emphasis was placed on collecting and systematizing existing data on bottom sediments in the waters of the Kara Sea, selected for testing and scientific research using an autonomous oceanological complex developed at the Institute of Oceanology. In the process of conducting research on the bottom surface, using samplers, a brown silt was found, watered and oxidized. Below, there are sediments with a characteristic color and an increased level of recoverability, often containing inclusions of hydro-troilite. All studies, as a rule, were carried out using a box corer or a Neimisto tube, which limited the sampling depth to 30–40 cm, below the bottom surface. The use of methane sensors for continuous monitoring of surface waters allows for quantitative control of methane concentrations. The analysis of data arrays obtained during research in the Kara Sea provides an opportunity to assess methane emissions from the aquatic environment into the atmosphere. The main methane emission zones include the estuaries of the Yenisei and Ob rivers, as well as adjacent shallow water areas. As we move away from these zones, the intensity of methane emissions decreases significantly, and at a depth of more than 100 meters, it becomes almost insignificant.

Keywords: complex, autonomous, ecological, monitoring, hydrocarbon, manifestations, methane

The work was carried out within the framework of the State assignment of the Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences on topic No. FMWE-2024-24.

Введение

В Карском море выявлены значительные перспективы нефтегазоносности, подтвержденные результатами многократных исследований и количественных оценок. В центральной и южной частях Карского

моря обнаружено несколько крупных газоконденсатных месторождений, что указывает на потенциальную перспективность северных областей России. В Северо-Карской впадине выявлены мощные палеозойские отложения с рифовыми фациями, зале-

гающие на доступных глубинах. На Новой Земле и островах Северной Земли зафиксированы битумопроявления. Эти данные свидетельствуют о значительной вероятности обнаружения нефтегазовых ресурсов в северных регионах Карского моря.

Наблюдается фрагментарность изученности акватории Карского моря. Значительный объем сейсмических исследований методом отраженных волн был выполнен только в южной части Карского моря. Глубокое бурение проведено на Русановской площади, а параметрические скважины пробурены на о. Белый и Свердруп. В последние годы отмечена интенсификация геолого-геофизического изучения северного региона Карского моря. В настоящее время активно применяются методы непрерывного сейсмоакустического профилирования и получены новые данные о распределении метана и газовых гидратов.

Ранее проведенные в арктическом регионе исследования позволили выявить крупные месторождения газовых гидратов в прибрежных зонах Шпицбергена. В Норвежском море широко известен газогидратоносный грязевой вулкан Хаакон Мосби. До настоящего времени в шельфовых морях Российской Арктики не наблюдалось проявлений газовых гидратов, поскольку данное направление исследований в Российском секторе Арктики было практически не развито. Для формирования и распространения газовых гидратов необходимы определенные термобарические условия, а именно: наличие достаточного количества газа и воды, а также наличие определенного состава газов, присутствие солей и условий для перемешивания воды и газа. Отметим важное обстоятельство – то, что газогидратоносные структуры тесно связаны с нефтегазоносными объектами.

Информация о температурном поле донных осадков Карского моря, включая тепловой геотермический градиент, который является важным фактором формирования газовых гидратов, недостаточна для проведения детального теплового анализа. На основе данных о температурах, полученных ранее посредством погружных термографов на шельфе, проведены предварительные оценки теплового потока в скважинах, предназначенных для поиска нефти. Поскольку оценка теплового потока на участках глубоководных скважин затруднена, но при этом она необходима, рекомендуется проводить для этих целей мало-глубинные измерения температуры. При проведении анализа следует учитывать, что мало-глубинные данные по температуре являются косвенными, но использование длиннобазовых экстрапо-

ляций позволяет прогнозировать возможное распределение теплового потока.

Выбор районов для проведения исследований в Карском море был обусловлен повышенным содержанием метана в осадочных отложениях под дном и наличием термобарических условий, обеспечивающих стабильность газовых гидратов. На глубоководных участках Карского моря выявлены очаги разгрузки метана, сопровождаемые восходящей миграцией метана по разломам. На основе известных соотношений между тепловым потоком и возрастом геологических структур, а также учитывая то, что Карское море является одной из акваторий Северного Ледовитого океана, в этих областях может быть развита субаквальная многолетняя мерзлота и существует высокая вероятность образования газовых гидратов в его глубоководных областях [1–3].

Цель исследования – анализ и обсуждение выполненных геолого-геофизических исследований условий формирования газовых гидратов в арктическом регионе.

Материалы и методы исследования

В результате постановки геолого-геофизических задач исследований, включая исследование условий формирования газовых гидратов, ключевой акцент был сделан на сборе и систематизации существующих данных о донных осадках в акваториях Карского моря, выбранных для проведения испытаний и научных исследований с использованием автономного океанологического комплекса, разработанного в Институте океанологии.

На основании проведенного анализа выполненных ранее исследований осуществлены поиск, картирование и комплексное изучение очагов разгрузки метана, связанных с наличием газовых гидратов на дне Карского моря. Эти работы имеют как фундаментальное, так и прикладное значение, включая оценку вклада Карского моря в общий годовой бюджет метана в атмосфере, в контексте глобальных климатических изменений и потепления в арктическом регионе. Проведение районирования эмиссии метана по различным зонам Карского моря, включая выделение зоны мелководья с вечной мерзлотой в донных отложениях, позволяет экстраполировать полученные данные на другие арктические моря с целью оценки общей эмиссии метана в арктическом регионе.

Предлагаемый метод исследований основан на использовании сенсора метана в составе разработанной аппаратной системы «Протока». Сенсор функционирует

благодаря изменениям сопротивления полупроводникового материала диоксида олова (SnO_2) при изменениях концентраций метана в атмосфере. Чувствительный элемент сенсора представляет собой тонкую пленку диоксида олова, нанесенную на подложку. Важно отметить, что данный материал не обладает селективностью к метану, а реагирует на широкий спектр углеводородов. Однако в природных условиях концентрация метана часто является доминирующей, что позволяет сенсору преимущественно регистрировать именно этот компонент. Одной из ключевых характеристик диоксида олова является его высокая температурная чувствительность, что требует применения термистора для точного измерения температуры окружающей среды в процессе измерений. Калибровка сенсора проводится при различных температурных условиях и концентрациях для исключения влияния температурных факторов на результаты измерений.

Для проведения измерений содержания метана в водной среде была разработана специализированная система «Протока», включающая сенсор метана. Сенсор устанавливался непосредственно вблизи насосного оборудования в составе системы «Протока». Вода, выходящая из камеры системы «Протока», направлялась по отдельному пластиковому трубопроводу диаметром 3/4 дюйма за пределы судна. В зависимости от концентрации метана в водной среде, протекающей через систему «Протока», изменялся выходной сигнал системы в соответствии с текущей концентрацией метана. Выходной сигнал о текущей концентрации метана передавался далее в универсальный порт компьютера, который осуществлял обработку данных и вычислял фактическую концентрацию метана в проходящей жидкости. Передача данных от системы «Протока» осуществлялась посредством многожильного электрического кабеля длиной около 10 м, который соединял сенсор метана системы «Протока» с последовательным портом персонального компьютера. Оборудование для электропитания и управления, а также персональный компьютер располагались в специально оборудованном лабораторном помещении на борту судна.

Достоверность данных системы «Протока» подтверждается методом сравнения с данными хроматографического анализа проб воды, отобранных из одного и того же источника. При концентрациях метана выше 10 нМ расхождение между данными сенсора метана и хроматографии не превышает 10–20%. Дискретность измерений составляет 1 нМ, что ограничивает точность

определения низких концентраций (порядка 3 нМ) до 30 %. Установлено, что при низких концентрациях метана (около 3 нМ) и наличии интенсивного газовыделения из воды показания сенсора метана могут быть занижены по сравнению с результатами хроматографического анализа. Это связано с инерционностью сенсора, и возникает необходимость, определенной корректировки данных при интерпретации результатов измерений. Экспериментально было определено, что для достижения стабильных показаний сенсора метана в системе «Протока», при измерении фиксированной концентрации метана требуется примерно 15–20 мин, что должно учитываться в дальнейшем, при проведении анализа результатов измерений.

Система «Протока» с сенсором метана продемонстрировала в экспедиции стабильную и надежную работу в течение долгого времени. Регистрируемые значения концентраций метана, текущее время на борту судна и другие параметры записывались синхронно в файл данных с интервалом в 15 с. Выбор интервала в 15 с был обусловлен необходимостью обеспечения соответствия данных о концентрации метана и данных о координатах исследовательского судна, которые также записывались с аналогичной периодичностью другой группой исследователей. Продолжительность записи одного файла данных, как правило, не превышала 12 ч. По завершении записи одного файла автоматически инициировался процесс создания нового файла, что обеспечивало непрерывное накопление данных в виде последовательности относительно небольших файлов данных.

Отбор геологических проб донных осадков с поверхности дна в районе исследований осуществлялся автономным океанологическим комплексом, оснащенным пробоотборными устройствами. После извлечения пробоотборников комплекса на борт исследовательского судна проводились лабораторные исследования полученных проб с детальным литологическим описанием полученных образцов донных отложений. Наиболее подробно были задокументированы профили, полученные с использованием бокс-корера и гравитационного пробоотборника (прямоточной трубы). Осадки, собранные с помощью трубки «Неймисто», описывались формально из-за конструктивных особенностей данного пробоотборника, которые не позволяли корректно охарактеризовать разрез. В ходе выполнения работ на 24 станциях, было отобрано и проанализировано 226 проб донных отложений, на содержание метана и различных

углеводородных газов, включая этан, этилен, пропан, пропилен, изобутан и нормальный бутан [4–6].

Результаты исследования и их обсуждение

В процессе исследований с помощью пробоотборников на поверхности дна обнаружен наилкок коричневого цвета, обводненный и окисленный. Ниже залегают осадки с характерной окраской и повышенным уровнем восстанавливаемости, часто содержащие включения гидротроилита. Исследования, как правило, проводились с использованием бокс-корера или трубки «Неймисто», что ограничивало глубину отбора проб до 30–40 см, ниже поверхности дна. Однако в юго-восточном отроге желоба Святой Анны с помощью гравитационного пробоотборника были подняты колонки с мощностью осадков до 303 см. Это позволило провести предварительную палеогеографическую интерпретацию, так как в разрезе были зафиксированы региональные литологические «уровни» с известными возрастными характеристиками.

Одним из результатов исследований являлось то, что в поверхностной воде р. Енисей и Северная Двина (Енисейский разрез), а также примыкающих к ним акваториях наблюдались повышенные концентрации метана. В отдельных случаях концентрации превышали 100 нМ. Также наблюдались значительные скачки концентраций, что позволило обнаружить несколько концентрационных фронтов, коррелирующих с фронтами солености. В результате полученный профиль концентраций на Енисейском разрезе в области высоких концентраций показывает сильную изменчивость. Совместный анализ данных по содержанию метана и солености показывает их антикорреляцию и то, что воды значительно структурированы по метану и солености.

Большинство показаний концентраций метана связано с областями низкой и высокой солености, что демонстрирует узость главных фронтальных зон морской воды в этом регионе. Были выявлены зависимости величин концентраций метана от величин солености морской воды. В промежуточной области соленостей, где соленость выражается небольшим числом точек, эти зависимости, как правило, линейны и подпадают под закон перемешивания растворов инертных примесей:

$$CH_4 / [CH_4]_0 = 1 - S/S_0,$$

где CH_4 – концентрация метана в смешанной воде, S – соленость смешанной воды, $[CH_4]_0$ – концентрация метана в пресной

исходной речной воде, S_0 – соленость исходной морской воды с низкой концентрацией метана. Представленная линейная модель достаточно точно описывает полученные данные эксперимента, но при этом возможны значительные отклонения от линейных моделей при низких и высоких соленостях морской воды. В этом случае концентрацию метана определяет не простое механическое смешение вод в изучаемом регионе. Еще следует обратить внимание на инертность сенсора метана, которая не позволяет быстро реагировать на меняющиеся концентрации при прохождении фронтальных зон в водной среде.

Проведенные в удаленных от устьев рек районах Карского моря измерения концентраций метана показали отсутствие отклонений от показателей концентраций на границе гидросферы и атмосферы, соответствующих равновесным состояниям. Порядок концентраций метана (3–4 нМ), определенный таким способом, демонстрирует эмиссию метана с поверхности Карского моря в атмосферу на очень низком уровне. Около о. Новая Земля были выявлены относительно опресненные участки с соленостью до 18–20 ‰, но при этом не обнаружено никаких изменений концентраций метана. Наблюдаемое различие свидетельствует о сложном характере процессов в гидросфере, где гидрофизические факторы конкурируют с микробиологическими, а метан является как активным участником таких процессов, так и их индикатором.

Анализ вертикальных профилей метана демонстрирует существенное различие в концентрациях поверхностных и глубинных вод. Есть два исключения – пресные воды на юге Енисейского разреза и воды желоба святой Анны на самых северных частях разрезов. В первом случае воды имеют постоянную от поверхности до дна высокую концентрацию метана (порядка 100 нМ), во втором – низкую, равную равновесному с воздухом значению (4 нМ). Во всех остальных случаях распределение содержания метана по вертикали имеет подповерхностный максимум.

Анализ данных Енисейского разреза показывает, что при движении с юга на север содержание метана в поверхностных водах уменьшается, вплоть до равновесных с воздухом. Содержание метана в подповерхностном максимуме в средней части разреза растет, достигая пятикратного превышения над содержанием метана в речных водах. Это свидетельствует о том, что метан не является пассивной примесью. Вероятнее всего, в толще воды имеются условия для микробной метан-генерации,

а в распресненных поверхностных водах идет преимущественное окисление метана. Глубинные, более соленые воды также преимущественно потребляют метан, однако с меньшей интенсивностью, чем верхние, распресненные. На многих станциях, расположенных далеко от источников пресной воды, содержание метана в поверхностных водах близко к равновесным с воздухом величинам, однако в подповерхностном максимуме содержание метана близко к содержанию в речных водах. Более детальный анализ данных по содержанию метана, с учетом солености и температуры вод на каждой из станций, позволит выявить связь с процессами смешения и трансформации вод.

Анализ содержания метана в осадках Енисейского разреза показал, что в целом не было выхода из зоны слабо восстановленных осадков, характеризующихся невысоким содержанием метана. Там осадки не являются источником метана для водной толщи. В результате содержание метана в осадках с глубиной в целом возрастает, при этом зачастую фиксируются узкие пики концентраций (превышение в 2–4 раза). Тяжелые углеводородные газы на станциях представлены в основном этиленом. Исключение представляет южная станция Енисейского разреза, где отмечено относительно высокое содержание всех углеводородных газов, включая нормальный бутан. Эти осадки пресноводны, однако содержание метана в них так же мало, как и в морских осадках [7, 8].

Заключение

Использование сенсоров метана в составе соответствующих аппаратных комплексов для непрерывного мониторинга поверхностных вод позволяет осуществлять количественный контроль концентраций метана. Анализ массивов данных, полученных в ходе исследований в Карском море, предоставляет возможность оценки эмиссии метана из водной среды в атмосферу. Основные зоны эмиссии метана включают эстуарии Енисея и Оби, а также прилегающие мелководные участки. По мере удаления от этих зон интенсивность эмиссии метана значительно снижается, и на глубине более 100 м она становится практически незначимой. С применением аппаратных средств донного автономного океанологического

комплекса были проведены исследования эволюции донных осадков в пределах Баренцево-Карского шельфа, охватывающие несколько горизонтов позднечетвертичного возраста. В различных зонах Карского моря были выполнены измерения вертикального распределения метана, что позволило выявить структурные особенности, включая наличие приповерхностных максимумов концентрации метана. Обработка полученных научных данных, касающихся метановых проявлений в водной толще и донных отложениях, помимо самостоятельной научной значимости способствует определению направлений совершенствования технических средств и методов поиска залежей углеводородов на морском дне арктического бассейна. Дальнейшие исследования процессов, происходящих в толще морской воды, будут создавать предпосылки для научных изысканий, направленных на изучение эмиссии метана в атмосферу из гидросферы.

Список литературы

1. Зеленько А.А., Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цирульников М.Д., Свиренко П.И. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 4. С. 501–513. DOI: 10.7868/S0002351516040143.
2. Лебедев К.В., Филошкин Б.Н., Щепеткин А.Ф. Модельное исследование межгодовой изменчивости водообмена Полярных морей с Атлантическим и Северным Ледовитым океанами // Океанологические исследования. 2020. Т. 48, № 2. С. 34–50.
3. Амбросимов А.К., Ковалев Г.А. Гидрология и течения Карского моря в весенне-летний период 2019 г. (43-й рейс НИС «Академик Николай Страхов») // Экологические системы и приборы. 2020. № 1. С. 49–54.
4. Шрейдер Ал.А., Шрейдер А.А., Клюев М.С., Евсеев Е.И. Высокорастворимая геоакустическая система для геолого-археологического изучения дна // Процессы в геосредах. 2016. № 2. С. 156–161.
5. Степанова С.В., Недоспасов А.А. Особенности гидрофизического и гидрохимического режимов залива Благополучия (Новая Земля) // Океанология. 2017. Т. 57, № 1. С. 75–85.
6. Serebryany A., Khimchenko E., Popov O., Denisov D., Kenigsberger G. Internal Waves Study on Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using Spatial Antenna of Line Temperature Sensors // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. Vol. 8, Is. 11. P. 883.
7. Буренков В.И., Шеберстов С.В., Артемьев В.А., Такаев В.Р. Оценка погрешности измерения показателя ослабления света морской водой в мутных водах арктических морей // Светотехника. 2019. № 2. С. 55–60.
8. Karagianni Evangelia A. Electromagnetic Waves under Sea: Bow-Tie Antenna Design for Wi-Fi Underwater Communications // Progress In Electromagnetics Research. Moscow. 2015. Vol. 41. P. 189–198.

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СПОСОБА КОМПОНОВКИ РАБОЧЕГО КРИСТАЛЛА ПРОЦЕССОРА ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Павлидис В.Д., Азизов В.Э.

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный аграрный университет»,
Оренбург, e-mail: Institut.riska@yandex.ru

Одной из ключевых задач в производстве современных электронных устройств является совершенствование технологий монтажа кристаллов. Цель исследования – определить наиболее эффективные способы компоновки рабочего кристалла процессора для комплектации различных электронных устройств. В рамках исследования были рассмотрены пять основных технологий монтажа кристаллов. Авторами проведен сравнительный анализ технологий на основе критериев надежности, универсальности, экономичности и простоты. Рассмотрены ключевые этапы процессов монтажа и дана оценка их применимости для различных типов устройств. Проведен сравнительный анализ пяти технологий монтажа кристаллов, выявлены их основные преимущества и ограничения, определены оптимальные методы для различных условий эксплуатации. Результаты исследования показывают, что методы термокомпрессионного соединения, чипа на плате и перевернутого чипа обладают наибольшей производительностью и надежностью. Эти технологии оптимальны для применения в условиях высокой нагрузки, компактности, надежности, энергоэффективности, экономичности, универсальности и перспективности. Внедрение полученных результатов позволит значительно улучшить процессы монтажа кристаллов и повысить общую эффективность их использования в современных электронных устройствах, так как они могут быть успешно применены для оптимизации производства в условиях повышенных требований к надежности и производительности.

Ключевые слова: технологии монтажа кристаллов, критерии эффективности, коэффициенты эффективности, оптимизация выбора технологии

OPTIMIZATION OF THE CHOICE OF THE METHOD OF LAYOUT OF THE WORKING PROCESSOR CRYSTAL FOR COMPLETING ELECTRONIC DEVICES

Pavlidis V.D., Azizov V.E.

Orenburg State Agrarian University, Orenburg, e-mail: Institut.riska@yandex.ru

One of the key tasks in the production of modern electronic devices is the improvement of crystal mounting technologies. The purpose of the study: to determine the most effective ways of arranging the working crystal of the processor for the assembly of various electronic devices. The study considered five main crystal mounting technologies. The authors conducted a comparative analysis of the technologies based on the criteria of reliability, versatility, cost-effectiveness and simplicity. The key stages of the mounting processes are considered and an assessment of their applicability for various types of devices is given. A comparative analysis of five crystal mounting technologies is carried out, their main advantages and limitations are identified, and optimal methods for various operating conditions are determined. The results of the study show that the methods of thermocompression bonding, chip on board and flip chip have the highest productivity and reliability. These technologies are optimal for use in conditions of high load, compactness, reliability, energy efficiency, cost-effectiveness, versatility and prospects. The implementation of the obtained results will significantly improve the processes of crystal assembly and increase the overall efficiency of their use in modern electronic devices, as they can be successfully applied to optimize production in conditions of increased requirements for reliability and productivity.

Keywords: crystal assembly technologies, efficiency criteria, efficiency coefficients, optimization of technology selection

Введение

В условиях глобализации и стремительного технологического прогресса обеспечение импортозамещения высокотехнологичной продукции становится ключевой задачей. Международная конкуренция способствует развитию собственных технологий и производств, которые удовлетворяют потребности различных секторов экономики в высокотехнологичных компонентах.

Разработка и внедрение отечественных технологических решений, способствующих снижению эксплуатационных и производ-

ственных затрат, ставят их в число приоритетных задач. Широкое применение высокотехнологичных и интеллектуальных систем в военном деле, робототехнике, а также в добыче и переработке ресурсов подчеркивает необходимость создания надежных и эффективных технологий монтажа кристаллов [1, с. 568]. Эти технологии являются основой для формирования конкурентоспособных электронных устройств, которые могут использоваться в различных условиях.

Цель исследования – определить наиболее эффективные способы компоновки ра-

бочего кристалла процессора для комплектации различных электронных устройств.

Задачи исследования:

- проведение сравнительного анализа методов монтажа рабочих кристаллов процессоров;
- выявление их основных характеристик и особенностей;
- оценка показателей, влияющих на надежность и эффективность;
- расчет относительного коэффициента эффективности k для моделирования производительности и затрат;

– определение дефицитных областей и приоритетных направлений для разработки собственных технологий монтажа.

Материалы и методы исследования

Кристалл представляет собой небольшую пластину полупроводникового материала, обычно кремния, на которой размещены электрические схемы и компоненты процессора. Такой кристалл содержит миллионы или даже миллиарды транзисторов, которые выполняют вычислительные операции и обрабатывают данные [2, с. 120].

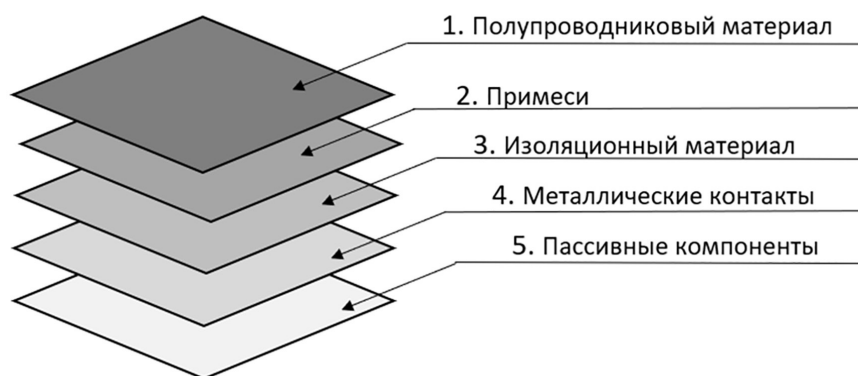


Рис. 1. Структура кристалла

Источник: составлено авторами на основе [2, с. 120]



Рис. 2. Основные методы монтажа кристаллов:

- очистка кристалла,
 – проверка соединений;
 – установка тонких металлических проводников;
 – высокое давление;
 – высокая температура;
 – охлаждение;
 – нагрев соединений методом ручной пайки;
 – проводниковое соединение;
 – пайка;
 – перевернутый чип;
 – термокомпрессионное соединение

Источник: составлено авторами на основе [3]

Таблица 1

Анализ технологии монтажа кристаллов

Вид соединения	Основа соединения	Преимущества соединения	Недостаток соединения	Область применения
Проводниковое соединение	Соединения кристаллов с контактами с помощью тонких металлических проводников	Простота и высокая скорость монтажа; универсальность	Чувствительность к вибрациям и механическим воздействиям; возможность разрывов проводов при перегрузках	Обширно используется в производстве интегральных схем, включая микропроцессоры, оперативную память и другие устройства
Перевернутый чип	Кристалл устанавливается «вверх дном», и его выводы соединяются напрямую с контактами на печатной плате	Энергоэффективность; высокая плотность соединений	Высокая стоимость материалов; чувствительность к загрязнению	Используется в высокоскоростных процессорах, графических процессорах и в системах с высокими требованиями к производительности
Чип на плате	Кристалл напрямую монтируется на печатную плату, а затем соединяется с используемыми проводами	Компактность; высокая скорость передачи данных	Низкая надежность; высокое тепловыделение	Часто применяется в компактных устройствах, таких как датчики и встраиваемые системы
Пайка	Соединение выводов кристалла с контактами на плате с помощью припоя	Надежность соединений; доступность технологии	Потери в теплопроводности; зависимость от качества припоя	Широко используется в производстве печатных плат, сборке электроники для бытовых и промышленных устройств
Термокомпрессионное соединение	Технология, в которой высокая температура и давление применяются одновременно для соединения проводников и кристаллов	Надежность соединений; высокая производительность	Сложность технологии; ограниченность в использовании материалов	Применяется в высокопроизводительных и надежных устройствах, таких как современные процессоры и системы на кристалле

Источник: составлено авторами на основе [4, с. 62].

Основные составные части кристалла включали полупроводниковый материал (кремний), примеси (фосфор и бор для изменения электрических свойств), оксидные слои (диоксид кремния как изоляционный материал), металлические контакты (медь или алюминий для соединения компонентов) и пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы и другие элементы для улучшения функциональных характеристик) (рис. 1).

Для наглядного представления процессов монтажа кристалла были подготовлены схемы, демонстрирующие ключевые этапы каждого метода (рис. 2).

Для более глубокого анализа была составлена таблица, в которой представлены ключевые аспекты каждой из рассматриваемых технологий монтажа кристаллов (табл. 1).

Анализ технологий монтажа кристаллов показал, что каждый из представленных методов обладал уникальными характеристиками. Важно было учитывать как преимущества, так и недостатки каждой технологии, чтобы выбрать оптимальное решение для достижения максимальной эффективности и надежности устройства.

Результаты исследования и их обсуждение

Каждая из технологий монтажа кристаллов может быть оценена по четырем стандартным критериям: простота, универсальность, экономичность и надежность [5, с. 63].

Под надежностью понимали долговечность и устойчивость соединений к механическим и термическим воздействиям, а также способность сохранять свои характеристики на протяжении длительного

времени. Простота технологии подразумевала легкость процесса монтажа, включая количество необходимого оборудования, которое потребуется для выполнения работ. Под универсальностью понимали возможность применения метода к различным типам устройств, а также его адаптивность к различным условиям эксплуатации. Экономичность предполагала способность минимизировать расход энергии при необходимости сохранения требуемых функциональных характеристик.

Проведена оценка видов соединения с учетом мнения различных специалистов, которая получена методом экспертных оценок в личных контактах и после изучения научно-технических источников [6, с. 15]. Каждому виду соединения был поставлен в соответствие коэффициент g , равный отношению суммы выставленных специалистами баллов по каждому критерию b к максимально возможному количеству баллов $a = 20$: $g = b/a$ (табл. 2).

Проведен анализ соответствия видов соединения и типов самих кристаллов (высокопроизводительные, низкочастотные, компактные), что позволило выбрать наиболее эффективные соединения в зависимости от специфики применения устройства,

тем самым оптимизируя производственные процессы и улучшая характеристики конечных продуктов (табл. 3) [7, с. 68].

В рамках анализа технологий монтажа кристаллов могут быть получены коэффициенты эффективности методов соединений k , которые позволят разработчикам и инженерам выбирать наиболее подходящие комбинации в зависимости от специфики требований к производительности и компактности устройств: $k = b/a + i$, где k – коэффициент эффективности, b – сумма баллов по каждому критерию, $a = 20$ – максимально возможное количество баллов, i – количество соответствий в баллах.

Определим коэффициенты эффективности для каждого вида соединений:

I. Проводниковое соединение:

$$k = 13/20 + 1 = 33/20 = 1,65.$$

II. Перевернутый чип:

$$k = 11/20 + 2 = 51/20 = 2,55.$$

III. Чип на плате:

$$k = 15/20 + 2 = 55/20 = 2,75.$$

IV. Пайка:

$$k = 14/20 + 1 = 34/20 = 1,7.$$

V. Термокомпрессионное соединение:

$$k = 16/20 + 2 = 56/20 = 2,8.$$

Таблица 2

Оценка базовых видов соединений

Вид соединения	Критерии оценки, баллы				Оценка вида соединения (g)
	Простота	Универсальность	Экономичность	Надежность	
Проводниковое соединение	3	4	3	3	0,65
Перевернутый чип	2	3	2	4	0,55
Чип на плате	4	5	2	4	0,75
Пайка	4	4	2	4	0,7
Термокомпрессионное соединение	2	5	4	5	0,8

Источник: составлено авторами на основе [6, с. 15].

Таблица 3

Анализ соответствия между видами соединения кристаллов и типами кристаллов

Вид соединения	Высокопроизводительные кристаллы	Низкочастотные кристаллы	Компактные кристаллы	Количество соответствий в баллах (i)
Проводниковое соединение	–	+	–	1
Перевернутый чип	–	+	+	2
Чип на плате	+	–	+	2
Пайка	–	+	–	1
Термокомпрессионное соединение	+	–	+	2

Приведены наиболее эффективные методы соединений: термокомпрессионное соединение ($k = 2,8$) выделяется высокой надежностью и производительностью, что позволяет использовать этот метод в сильно нагруженных системах, где важна стабильность; чип на плате ($k = 2,75$) является оптимальным выбором для компактных устройств при низких затратах на производство; перевернутый чип ($k = 2,55$) подходит для устройств, в которых нужен баланс между компактностью и высокой энергоэффективностью.

Заключение

Сравнительный анализ пяти ключевых технологий монтажа кристаллов позволил выявить преимущества, недостатки и определить приоритетные области применения каждой технологии. Сформированные критерии оценки видов соединений, расчет относительного коэффициента g и коэффициент эффективности методов соединения k способствовали выделению наиболее эффективных технологий (термокомпрессионное соединение, чип на плате и перевернутый чип), для которых в результате исследования предложены области применения в зависимости от задач и эксплуатационных условий. Таким образом, результаты исследования могут быть использованы для оптимизации процессов монтажа кристаллов

и повышения их эффективности в производстве современных электронных устройств.

Список литературы

1. Беляев А.С., Пантюхин А.Р., Александрова Т.В. Использование системы на кристалле для управления роботами // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства: сборник материалов XI Международной научно-технической конференции (Ижевск, 25–27 ноября 2015 г.). Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2016. С. 568–573.
2. Вайселев А., Борзых М. Тенденции в развитии микропроцессоров // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 68–2. С. 120–122.
3. Иванников В.П., Кабакова А.В. «Нанотехнологии» в сфере микроэлектроники и наноэлектроники. возможности и ограничения // Управление техносферой. 2023. Т. 6, № 1. URL: <https://technosphere-ing.ru/files/2021/2107.pdf> (дата обращения: 10.02.2025). DOI: 10.34828/UdSU.2023.11.87.007.
4. Стоянов А.А., Побединский В.В., Рогозин Н.В., Рембеза С.И. Особенности монтажа кристаллов с использованием технологии «flip-chip» при сборке 3D БИС // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 9–1. С. 62–64.
5. Бритиков Ф.О. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем // Science Time. 2016. № 1 (25). С. 63–66.
6. Чкалова М.В., Павлидис В.Д., Прочанкина Е.В., Каменева Е.В. Программа расчета параметров динамической системы // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614236. Российская Федерация. № 2021610399: заявл. 11.01.2021. опубл. 22.03.2021. 15 с.
7. Чкалова М.В., Павлидис В.Д. Система показателей эффективности технологического оборудования в кормопроизводстве // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 2 (42). С. 68–73. DOI: 10.51794/27132064-2021-2-68.

УДК 54-38:544.022.3:544.142.4:544.723:519.6

РАЗРАБОТКА МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ РАВНОВЕСИЯ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ

¹Сатыбалдыев А.Б., ²Ташполотов Ы., ²Ибраимов Т.К.

¹*Ошский технологический университет имени М.М. Адышева, Ош,
e-mail: Baatyrbekovich@gmail.com;*

²*Ошский государственный университет, Ош,
e-mail: itashpolotov@mail.ru, t.kailbekovich@mail.ru*

Комплексообразование занимает центральное место в химии, металлургии и других смежных научных дисциплинах, где критически важно не только эффективно выделять, но и стабилизировать металлы. Актуальность исследования объясняется острой необходимостью создания усовершенствованных моделей, способных учитывать многообразие термодинамических, кинетических, сорбционных и массопереносных характеристик. Основная цель работы заключается в разработке усовершенствованной модели равновесия комплексообразования, которая интегрирует данные о термодинамических и кинетических параметрах для более детального описания данных процессов. В качестве основного подхода применено математическое моделирование, в основе которого лежит систематическое использование таких фундаментальных уравнений, как уравнение Вант-Гоффа, выражение Нернста, закон Аррениуса и модель Ленгмюра. Применение этих методов позволило построить графики, отражающие динамику устойчивости комплексов, скорость реакций и сорбционные свойства в зависимости от таких параметров, как температура, концентрация реагентов и стехиометрическое соотношение металл-лиганд. В процессе исследования было установлено, что металлы группы благородных, включая золото и серебро, формируют устойчивые комплексы, обладающие высокой стабильностью даже в варьируемых условиях. В то же время редкоземельные металлы демонстрируют требовательность к специфическим параметрам среды, без соблюдения которых процессы комплексообразования становятся менее эффективными. Разработанная модифицированная модель учитывает одновременно термодинамические и кинетические аспекты, что позволяет существенно повысить точность описания процессов комплексообразования. Практическая ценность полученных результатов в том, что они могут быть использованы для оптимизации ключевых технологических процессов, направленных на выделение и переработку металлов. Теоретическая значимость заключается в углублении понимания механизмов комплексообразования, открывающих новые горизонты для научных исследований. Созданная модель представляет собой основу для будущих экспериментов, направленных на валидацию и развитие предложенных теоретических решений.

Ключевые слова: комплексообразование, термодинамические параметры, кинетические характеристики, сорбция, массоперенос, математическое моделирование

DEVELOPMENT OF A MODIFIED EQUILIBRIUM MODEL FOR COMPLEX FORMATION

¹Satybaldyev A.B., ²Tashpolotov Y., ²Ibraimov T.K.

¹*Osh Technological University named after M.M. Adyshev, Osh,
e-mail: Baatyrbekovich@gmail.com;*

²*Osh State University, Osh, e-mail: itashpolotov@mail.ru, t.kailbekovich@mail.ru*

Complex formation occupies a central place in chemistry, metallurgy, and related scientific disciplines, where it is critically important not only to efficiently isolate metals but also to stabilize them. The relevance of this study is driven by the pressing need to develop advanced models capable of accounting for the diversity of thermodynamic, kinetic, sorption, and mass transfer characteristics. The primary objective of this work is to develop an enhanced equilibrium model of complex formation that integrates thermodynamic and kinetic parameters for a more detailed description of these processes. Mathematical modeling serves as the core methodological approach, employing fundamental equations such as the Van't Hoff equation, the Nernst equation, the Arrhenius law, and the Langmuir model. The application of these methods enabled the construction of graphs illustrating the dynamics of complex stability, reaction rates, and sorption properties as functions of parameters including temperature, reagent concentration, and the stoichiometric metal-ligand ratio. The study established that noble metals, including gold and silver, form highly stable complexes even under varying conditions. In contrast, rare-earth metals exhibit a strong dependence on specific environmental parameters, without which the efficiency of complex formation significantly decreases. The developed modified model simultaneously accounts for both thermodynamic and kinetic aspects, thereby substantially improving the accuracy of process descriptions. The practical significance of the obtained results lies in their potential application for optimizing key technological processes aimed at metal extraction and processing. The theoretical contribution of this research consists in deepening the understanding of complex formation mechanisms, opening new avenues for scientific exploration. The proposed model serves as a foundation for future experiments aimed at validating and further developing the theoretical solutions presented.

Keywords: complex formation, thermodynamic parameters, kinetic characteristics, sorption, mass transfer, mathematical modeling

Введение

В современных научных исследованиях, посвященных процессам комплексообразования, особое внимание уделяется углубленному анализу равновесных характеристик, термодинамических параметров и кинетических особенностей [1, 2]. Эти аспекты представляют фундаментальную основу для множества прикладных областей, включая химию, металлургию и медицину. Данные исследования открывают широкий спектр возможностей для усовершенствования как лабораторных, так и промышленных процессов, связанных с добычей, переработкой и использованием драгоценных, переходных и редкоземельных металлов [3, 4]. Несмотря на прогресс, достигнутый в исследовании этих процессов, все еще сохраняются методологические разрывы и теоретические противоречия, особенно в контексте воздействия таких факторов, как температура, концентрация реагентов и соотношение металл-лиганд, на стабильность и кинетику комплексных соединений.

Термодинамическая составляющая этих исследований фокусируется на изучении изменений энтальпии и энтропии. Для этого широко применяются уравнения Вант-Гоффа и Нернста, которые позволяют количественно оценить влияние температуры на устойчивость комплексов. Например, как показано в работах [5, 6], температурный фактор особенно критичен для формирования стабильных соединений с участием таких драгоценных металлов, как золото и серебро. В то же время кинетические исследования сосредоточены на изучении скорости реакций и активационной энергии, используя уравнение Аррениуса для анализа ключевых параметров, определяющих динамику процессов [7]. Особую значимость они имеют при работе с переходными металлами, такими как медь и никель, которые демонстрируют сложное поведение в кинетических условиях. В контексте редкоземельных металлов, таких как лантан, модели сорбции и массопереноса, основанные на изотермах Ленгмюра, указывают на необходимость создания специфических условий для образования устойчивых комплексов, учитывая высокую химическую активность этих элементов [8].

Однако, несмотря на заметные успехи, в научной литературе сохраняется недостаток исследований, в которых комбинируются термодинамические и кинетические аспекты. Более того, существующие модели часто оказываются недостаточно точными для описания сложных многокомпонентных систем. Дальнейший анализ подтверждает необходимость разработки модифи-

цированных моделей, которые бы объединяли данные о термодинамике, кинетике и процессах массопереноса. Это открывает перспективы не только для углубления теоретических знаний, но и для повышения эффективности практического применения процессов комплексообразования в научной и промышленной среде.

В рамках исследования гипотеза заключается в том, что учет взаимного влияния таких факторов, как температура, электрохимический потенциал, степень адсорбции и соотношение металл-лиганд, позволит предложить модифицированное уравнение равновесия комплексообразования. Такое уравнение должно более точно отражать процессы сорбции и массопереноса, обеспечивая тем самым повышение эффективности извлечения и стабилизации металлов.

Целью работы является разработка усовершенствованной модели равновесия комплексообразования, способной учитывать как термодинамические, так и кинетические параметры для оптимизации процессов сорбции и массопереноса.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Провести детальный анализ зависимости электрохимического потенциала от концентрации металлов, выделив специфические особенности различных групп элементов.
2. Оценить влияние температуры на устойчивость комплексов с использованием уравнения Вант-Гоффа, идентифицируя критические температурные параметры.
3. Разработать и верифицировать модифицированное уравнение, которое интегрирует термодинамические и кинетические аспекты.

Материалы и методы исследования

В исследовании применялся многосторонний подход, базирующийся на интеграции математического моделирования. Важной частью работы стало использование моделей, которые охватывали широкий спектр термодинамических и кинетических параметров. Одновременно с этим особое внимание уделялось учету специфики процессов сорбции и массопереноса. Такой подход обеспечивал детализированное и всестороннее рассмотрение исследуемых явлений с учетом взаимосвязи и влияния различных факторов.

Для анализа устойчивости образующихся комплексов применялись уравнения Вант-Гоффа и Нернста. Эти инструменты позволили глубже понять, как температурные изменения и электрохимический потенциал влияют на равновесие химических систем [9].

Кинетические параметры, включая скорость протекания реакций и энергию активации, были определены с использованием уравнения Аррениуса. Данный подход оказался особенно важным для изучения зависимости процессов комплексообразования от температуры [7]. Анализ сорбционных процессов был проведен с использованием изотермы Ленгмюра, которая, благодаря своей универсальности, давно признана надежным инструментом для моделирования адсорбции различных металлов, включая редкоземельные элементы [8].

Для оценки влияния ограничений, связанных с массопереносом, использовались уравнения диффузии. Это позволило выявить ключевые факторы, определяющие формирование стабильных комплексных соединений [10]. Параметры, относящиеся к разнообразным группам металлов, включая драгоценные, переходные и редкоземельные, определялись на основе информации, представленной в научных источниках. После тщательной обработки данных выполнялись расчеты, реализованные посредством использования программного обеспечения. Такой подход позволял добиться исключительной точности в проведении анализа, минимизируя вероятность статистических или методологических отклонений.

Особое внимание уделялось влиянию таких параметров, как температура, концентрация реагентов и соотношение металл-лиганд. Подобный подход не только позволил минимизировать объем экспериментальных данных, но и обеспечил возможность точного прогнозирования поведения систем комплексообразования. Это, в свою очередь, является ключевым аспектом оптимизации промышленных процессов, направленных на извлечение, переработку и стабилизацию металлов.

Результаты исследования и их обсуждение

В рамках современных научных исследований, направленных на изучение механизмов комплексообразования, особый акцент делается на детальном анализе равновесных характеристик, термодинамических параметров и кинетических закономерностей, определяющих динамику подобных процессов. Глубина понимания данных аспектов во многом обуславливает эффективность применяемых химических методов и технологий.

Настоящее исследование рассматривает математические модели, описывающие процессы формирования устойчивых комплексов, закономерности сорбции и особенности массопереноса. Взаимосвязь между

кинетическими параметрами и термодинамическими характеристиками раскрывается через систему фундаментальных уравнений, позволяющих формализовать сложные явления, происходящие в реакционной среде. Среди рассмотренных теоретических основ особое внимание уделено аналитическим зависимостям, предложенным Нернстом, Вант-Гоффом, Аррениусом, а также сорбционным моделям, разработанным Ленгмюром. Их применение обеспечивает возможность глубокой интерпретации процессов, определяющих скорость и эффективность химических превращений.

Детализированное исследование взаимодействий различных групп металлов, включая драгоценные, переходные и редкоземельные элементы, демонстрирует специфику формирования устойчивых координационных структур. Комплексные соединения, образуемые при определенных термодинамических и электрохимических условиях, играют ключевую роль в оптимизации технологических процессов. Глубокий анализ коэффициентов устойчивости координационных соединений, зависимостей электрохимического потенциала и реакционной активности позволяет определить параметры, способствующие максимальной эффективности протекания данных процессов в условиях лабораторных исследований и промышленного производства.

1. Уравнение равновесия комплексообразования

Для процесса комплексообразования $M + L \rightleftharpoons ML$ равновесное состояние описывается выражением

$$K_f = \frac{[ML]}{[M][L]}, \quad (1)$$

где K_f – константа устойчивости комплекса, $[M]$ – равновесная концентрация свободного металла, $[L]$ – равновесная концентрация свободного лиганда, $[ML]$ – равновесная концентрация комплекса.

С учетом ограничений адсорбции и массопереноса эффективные концентрации выражаются как

$$M_{\text{эф}} = [M](1 - \theta), \quad L_{\text{эф}} = [L](1 - \theta), \quad (2)$$

где $\theta = K_a[M] / 1 + K_a[M]$ описывает степень связывания металла на поверхности.

2. Уравнение Вант-Гоффа

Для описания зависимости константы устойчивости комплекса от температуры:

$$\ln K_f = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R}, \quad (3)$$

где ΔH – изменение энтальпии процесса комплексообразования, ΔS – изменение эн-

тропии процесса, R – универсальная газовая постоянная, T – температура в Кельвинах.

3. Уравнение Нернста

Электрохимический потенциал металла в процессе определяется уравнением Нернста:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q, \quad (4)$$

где $Q = [M^{n+}] / [M]_{\text{eff}}$, E^0 – стандартный электрохимический потенциал, n – количество электронов, участвующих в реакции, F – постоянная Фарадея.

4. Уравнение изотермы Ленгмюра

Для описания процессов сорбции металлов:

$$\theta = \frac{K_{\alpha} [M]}{1 + K_{\alpha} [M]}, \quad (5)$$

где θ – степень связывания металла, K_{α} – константа адсорбции, $[M]$ – концентрация металла.

5. Уравнение Аррениуса

Для описания скорости процесса комплексообразования:

$$k = A e^{-E_a/RT}, \quad (6)$$

где k – скорость реакции, A – предэкспоненциальный фактор, E_a – энергия активации.

В равновесии:

$$K_f = \frac{k_f}{k_b} = \frac{A_f}{A_b} e^{-E_a^f - E_a^b/RT}, \quad (7)$$

что связывает термодинамические параметры с кинетикой реакции.

6. Уравнение массопереноса

При наличии диффузионных ограничений:

$$J = -D \frac{dC}{dx}, \quad (8)$$

где J – поток вещества, D – коэффициент диффузии, dC/dx – градиент концентрации.

Эффективная концентрация свободного металла выражается как

$$[M]_{\text{eff}} = [M] \frac{J}{D}. \quad (9)$$

7. Модифицированное итоговое уравнение

С учетом всех вышеуказанных факторов итоговая модель принимает следующий вид:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[M]_{\text{eff}}}{[M^{n+}]} \right) + \frac{\Delta S}{nF} + \frac{\Delta H}{nFT} + \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[ML]}{([M]_{\text{eff}})([L]_{\text{eff}})} \right), \quad (10)$$

где $[M]_{\text{eff}}$ и $[L]_{\text{eff}}$ учитывают адсорбцию и ограничения массопереноса.

K_f зависит от кинетики реакции (уравнение Аррениуса) и термодинамики (ΔH , ΔS).

На основе модифицированного итогового уравнения разработаны графики, которые наглядно продемонстрируют взаимосвязь между ключевыми параметрами процессов комплексообразования для различных групп металлов. Анализ включает три категории элементов, каждый из которых обладает уникальными характеристиками, требующими отдельного подхода к исследованию.

1. *Драгоценные металлы (золото, серебро).* Металлы данной группы отличаются высокой стоимостью и значительным практическим применением, особенно в аналитической химии и лабораторных исследованиях. Благодаря уникальным физико-химическим свойствам золото и серебро часто становятся объектами для анализа

в процессах комплексообразования. Выявление оптимальных условий для работы с этими металлами имеет первостепенное значение, поскольку их выделение связано с высокой ценностью для науки и промышленности. Рекомендуется сосредоточить внимание на электрохимических характеристиках, таких как стандартный потенциал (E^0), для определения наиболее эффективных параметров.

2. *Переходные металлы (медь, никель)* характеризуются широким распространением и сравнительно низкой стоимостью, что делает эту группу особенно привлекательной для лабораторного изучения. Высокая реакционная способность в процессах ионного обмена и комплексообразования позволяет исследовать различные условия взаимодействия с лигандами. Выбор оптимальных параметров, включая concentra-

цию и температуру, может повысить эффективность их использования в прикладных и научных экспериментах.

3. *Редкоземельные металлы (например, лантан).* Особенности этой группы металлов делают их крайне важными для изучения в контексте процессов комплексообразования. Лантан, обладая уникальными химическими и электрохимическими свойствами, представляет значительный интерес для исследователей. Анализ поведения в различных условиях может раскрыть дополнительные аспекты механизмов взаимодействия между металлом и лигандом, что особенно важно для разработки новых материалов или технологий.

Из указанных типов металлов графики будут построены с учетом следующих параметров: стандартный электрохимический потенциал (E^0), константа устойчивости комплекса (K_p) и степень адсорбции (K_a).

На рис. 1–3 представлены три зависимости:

- Зависимость электрохимического потенциала от концентрации металла (E в зависимости от M), позволяющая проанализировать изменения редокс-характеристик при варьировании концентрации.

- Зависимость устойчивости комплекса от температуры (K_f в зависимости от T), отражающая влияние термодинамических условий на формирование и стабильность комплекса.

- Зависимость выхода комплекса от соотношения металл-лиганд (Зависимость

выхода комплекса от соотношения M/L), демонстрирующая, как различные пропорции компонентов влияют на эффективность комплексообразования.

Эти графические данные помогут углубить понимание процессов взаимодействия металлов с лигандами и разработать рекомендации для оптимизации условий применения.

На основании данных, представленных на рис. 1, можно заметить, что электрохимический потенциал E металлов демонстрирует тенденцию к снижению по мере увеличения концентрации $[M]$, что вполне согласуется с теоретическими положениями, описанными уравнением Нернста.

Примечательно, что золото и серебро обладают значительно более высокими значениями потенциала E , что обусловлено выдающимися стандартными электрохимическими характеристиками. Такое поведение свидетельствует об исключительной стойкости к окислительным процессам.

В то же время металлы, относящиеся к группе переходных, медь и никель, характеризуются умеренными значениями электрохимического потенциала, что подчеркивает их промежуточные свойства между благородными и высокоактивными элементами. На другом конце спектра располагается редкоземельный металл лантан, он демонстрирует наименьшее значение потенциала E , что указывает на значительную химическую активность и склонность к окислению.

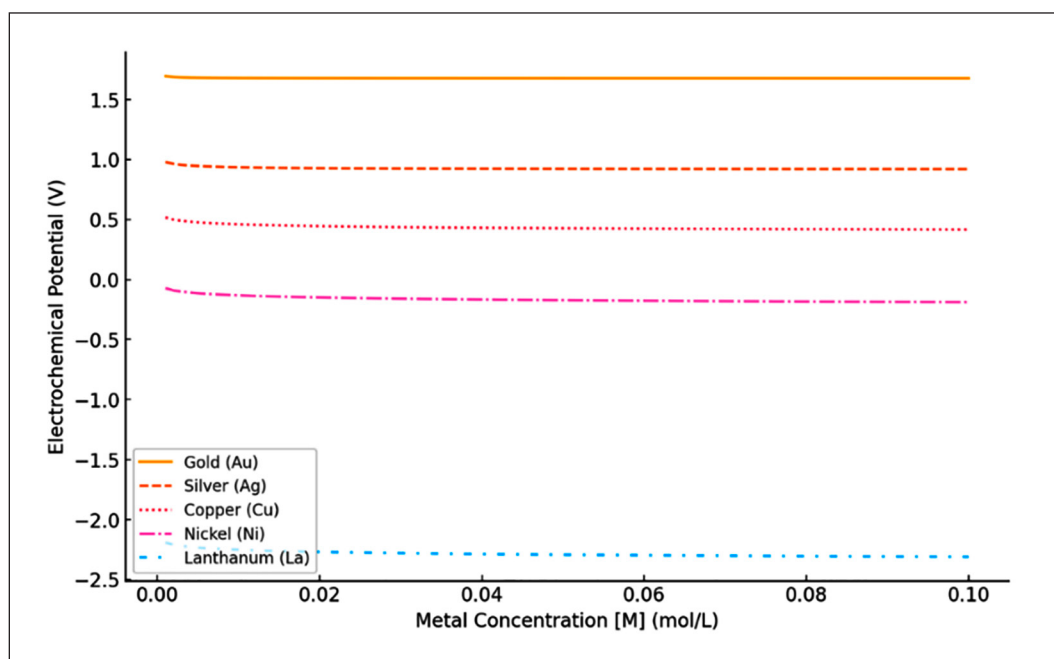


Рис. 1. Зависимость электрохимического потенциала от концентрации металлов (E vs. M)

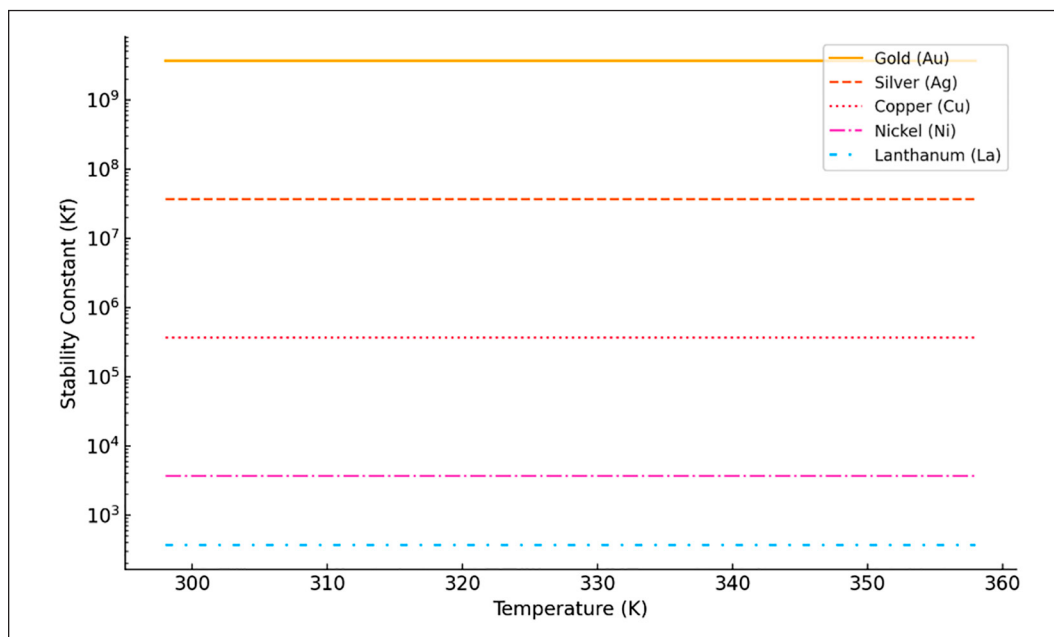


Рис. 2. Зависимость устойчивости комплекса от температуры (K_f vs. T)

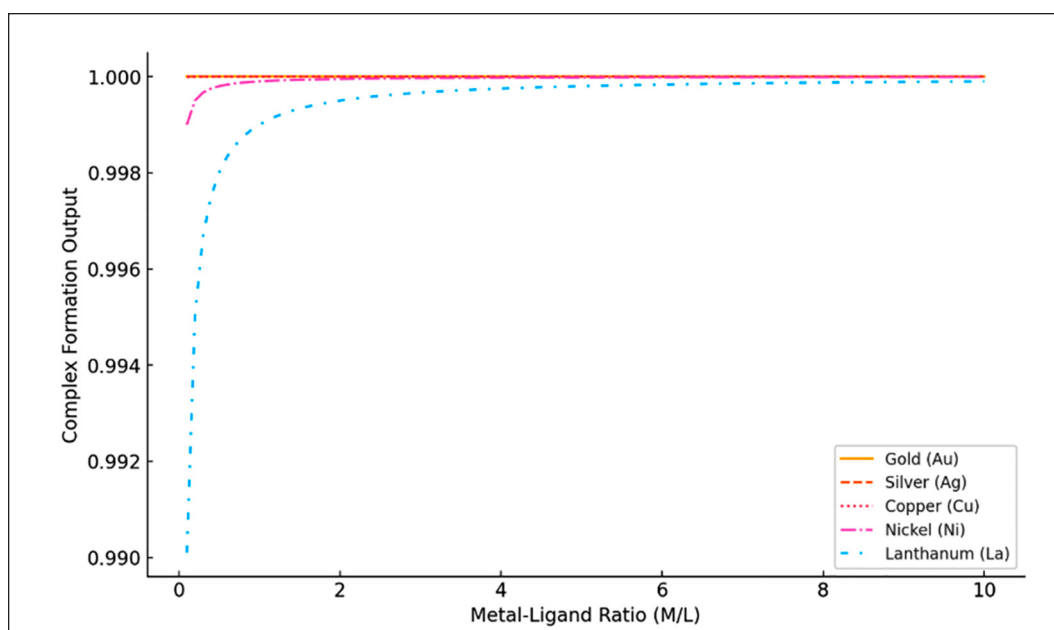


Рис. 3. Влияние соотношения металл-лиганд на образование комплекса (выход комплекса vs. M/L)

Как демонстрирует рис. 2, стабильность комплексов, выраженная через коэффициент устойчивости (K_f), проявляет значительную изменчивость в зависимости от конкретного металла. В частности, золото и серебро выделяются наивысшими показателями K_f , что указывает на заметную способность формировать устойчивые комплексы. Переходные металлы медь и никель

занимают промежуточное положение по величине K_f , что говорит о средней склонности к стабильному комплексообразованию. Редкоземельный элемент лантан характеризуется минимальными значениями K_f , демонстрируя ограниченную предрасположенность к созданию прочных комплексов.

Анализ подтверждает, что величина K_f остается практически неизменной в преде-

лах исследуемого температурного диапазона. Это явление можно объяснить тем, что рассматриваемые процессы относятся к категории термодинамически стабильных и не подвержены значительным температурным воздействиям в указанных условиях.

Как показывает рис. 3, выход комплекса металл-лиганд (ML) напрямую зависит от соотношения металл-лиганд (M/L), и эта зависимость варьируется в зависимости от природы металла. Интересно, что такие металлы, как золото, серебро и медь, демонстрируют почти мгновенное достижение насыщения при низких значениях M/L. Это указывает на высокую способность к комплексообразованию и стабильность образующихся комплексов. Однако для металлов вроде никеля и особенно лантана требуется значительно большее значение M/L, чтобы достичь максимального выхода. Этот феномен связан с меньшими значениями константы устойчивости их комплексов (K_p), что подчеркивает разницу в химических свойствах металлов и влияние на процессы комплексообразования при варьирующих концентрациях.

Проведенный кинетический анализ, базирующийся на уравнении Аррениуса, позволил рассчитать скорость реакции и активационную энергию для различных металлов. Интересно отметить, что переходные металлы показали средние значения скорости реакции, что согласуется с промежуточным положением в ряду активности металлов. Дополнительно сорбционный анализ с использованием изотерм Ленгмюра выявил, что редкоземельные металлы, такие как лантан, требуют значительно более высоких концентраций для достижения заметного уровня связывания, что подчеркивает специфические сорбционные свойства.

Значительным достижением стало исследование массопереноса, которое выявило ключевую роль концентрационных градиентов в эффективности процессов. Особенно это проявляется в системах с высокой химической активностью, где неравномерное распределение концентраций может существенно замедлить скорость реакции. Эти данные подчеркивают необходимость учета процессов массопереноса при создании единой модели, описывающей взаимодействие металл-лиганд.

В целом результаты работы не только подтверждают основные тенденции, наблюдаемые ранее, но и указывают на существующие пробелы в понимании кинетики комплексообразования редкоземельных металлов. Также остается малоизученным влияние сложных лигандных структур на эти процессы. В качестве перспективных

направлений для дальнейших исследований выделяются изучение кинетических параметров для многокомпонентных систем, а также углубленный анализ взаимодействий металл-лиганд в условиях сложных химических сред.

Заключение

В представленном исследовании предложена усовершенствованная модель равновесия процессов комплексообразования, которая учитывает совокупность термодинамических и кинетических факторов, а также механизмы сорбции и массопереноса. Центральное место в работе занимает разработка универсального математического уравнения, способного интегрировать ключевые аспекты этих процессов, обеспечивая тем самым более точное описание механизмов образования комплексов для различных категорий металлов.

Анализ позволил выделить несколько важных результатов, которые заслуживают отдельного рассмотрения:

1. *Термодинамические особенности.* Драгоценные металлы показали наибольшую устойчивость в процессах комплексообразования, что подтверждает предрасположенность к формированию стабильных структур даже в условиях изменяющихся параметров среды. В то же время редкоземельные металлы демонстрируют зависимость от специфических условий – в частности, температурного режима и концентрации реагентов, что делает их более сложными объектами для практической реализации процессов.

2. *Кинетика реакций.* Применение уравнения Аррениуса позволило не только определить скорости реакций, но и рассчитать энергию активации для каждой из исследуемых групп металлов. Особый интерес представляет поведение переходных металлов, которые обладают средней скоростью реакций, удобной для применения в ионообменных технологиях. Это открывает широкие перспективы для их использования в промышленной сфере.

3. *Сорбционные механизмы.* Проведенное исследование изотерм сорбции на основе модели Ленгмюра показало, что для редкоземельных металлов требуются более высокие концентрации, чтобы достичь значимого уровня связывания. Эти данные подчеркивают необходимость тщательной оптимизации параметров адсорбции для повышения эффективности извлечения металлов из сложных систем.

4. *Массоперенос и его влияние.* Установлено, что концентрационные градиенты и ограничения, связанные с процессами массопереноса, играют ключевую роль

в эффективности комплексообразования. Данный эффект наиболее выражен в системах, характеризующихся высокой химической активностью, где массоперенос становится определяющим фактором.

Разработанная модель не только расширяет теоретические представления о закономерностях процессов комплексообразования, но и имеет прикладную значимость и создает фундамент для дальнейшего совершенствования технологий выделения, очистки и стабилизации металлов, обеспечивая надежные инструменты для анализа многокомпонентных систем.

Список литературы

1. Шачнева Е.Ю. Расчет термодинамических параметров процессов на примере реакций комплексообразования // *Journal of Bioinformatics and Genomics*. 2023. № 4 (22). DOI: 10.18454/jbg.2023.22.3.
2. Emami F., Maeder M., Abdollahi H. Model-based analysis of coupled equilibrium-kinetic processes: indirect kinetic studies of thermodynamic parameters using the dynamic data // *The Analyst*. 2015. Vol. 140, Is. 9. P. 3121–3135. DOI: 10.1039/c4an02279c.
3. Fialkovsky I.S., Litvinova T.E., Lutsky D.S., Alexeev A.A. Determination of the parameters of thermodynamic stability constants of bromide complexes of rare earth metals for modeling the optimal regimes of hydrometallurgical extraction // *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*. 2021. Vol. 29. P. 1–9. DOI: 10.1080/25765299.2021.2015897.
4. Sharma S., Ramani J., Patel D. A solution state study of the complexation and thermodynamic parameters of binary complexes of the inner transition metals with piracetam in aqueous and mixed solvents // *Journal of Solution Chemistry*. 2013. Vol. 42. P. 1580–1590. DOI: 10.1007/s10953-013-0064-0.
5. Melchior A., Sanadar M., Cappai R., Tolazzi M. Entropy and enthalpy effects on metal complex formation in non-aqueous solvents: the case of silver(I) and monoamines // *Entropy*. 2022. Vol. 24. DOI: 10.3390/e24091253.
6. Zanonato P.L., Di Bernardo P., Melchior A., Tolazzi M., Polese P., Busato M. Solvent and structural effects on silver (I) complex formation: thermodynamics and modeling // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 5501–5509.
7. Lalia-Kantouri M., Hartophylles M. Thermal behavior and kinetic analysis of the thermogravimetric data of some copper (II), nickel (II), and palladium (II) 2-hydroxyaryloximates // *Thermochimica Acta*. 1993. Vol. 224. P. 203–215. DOI: 10.1016/0040-6031(93)80170-F.
8. Chan M., Doan H., Dang-Vu T. An investigation of lanthanum recovery from an aqueous solution by adsorption (ion exchange) // *Inorganics*. 2024. Vol. 12, Is. 9. P. 255. DOI: 10.3390/inorganics12090255.
9. Lima E.C., Hosseini-Bandegharai A., Moreno-Piraján J.C., Anastopoulos I. A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoff equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption // *Journal of Molecular Liquids*. 2019. Vol. 273. P. 425–434. DOI: 10.1016/j.molliq.2018.10.048.
10. Volgin V.M., Davydov A.D. Effect of complex formation on mass transfer during metal electrodeposition on rotating disk electrode // *Russian Journal of Electrochemistry*. 2020. Vol. 56. P. 785–794. DOI: 10.1134/S1023193520100134.

УДК 004.046

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРКОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТЕХНИКИ

Тархов С.В., Шакирьянов И.Р.

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»,
Уфа, e-mail: tarkhov@inbox.ru, dratuti.02@mail.ru.

В работе рассмотрен комплекс системных моделей, основной целью разработки которых является повышение эффективности функционирования парка компьютерной техники за счет своевременного и обоснованного принятия решений о ее обслуживании, ремонте и модернизации на основе результатов тестирования, выполненного в компьютерной сети. Приведена обобщенная схема локальной компьютерной сети, в которой проводится мониторинг компьютерной техники с использованием технологии удаленного тестирования. Выполнено системное моделирование бизнес-процесса управления парком компьютерной техники, в рамках которого построена многоуровневая функциональная модель на основе использования методологии SADT. Детально проработаны механизмы: реализации диагностики состояния аппаратной части и программного обеспечения, установленного на компьютерах на основе тестирования; сохранения результатов тестирования и их передачи по сети на сервер; анализа и оценки технического состояния, состава и конфигурации программного обеспечения; поддержки принятия решений, связанных с управлением парком компьютерной техники. Разработана схема архитектуры системы тестирования, сбора, хранения и обработки данных, а также поддержки принятия решений в рамках управления парком компьютерной техники. Показаны функциональные возможности системы мониторинга и поддержки принятия решений при управлении парком компьютерной техники, а также алгоритм ее работы с использованием специального программного обеспечения для тестирования и анализа данных (система Zabbix). Разработанный комплекс системных моделей является основой для практической реализации проекта системы поддержки принятия решений при управлении парком компьютерной техники.

Ключевые слова: тестирование компьютера, компьютерная система, парк компьютерной техники, аппаратное обеспечение, компьютерная сеть, программное обеспечение, поддержка принятия решений

DESIGN OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR MANAGING A COMPUTER EQUIPMENT FLEET

Tarkhov S.V., Shakir`yanov I.R.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, e-mail: tarkhov@inbox.ru, dratuti.02@mail.ru.

The article considers a set of system models, the main purpose of which is to improve the efficiency of the computer equipment fleet through timely and informed decision-making on its maintenance, repair and modernization based on the results of testing performed in a computer network. A generalized diagram of a local computer network is provided, in which computer equipment is monitored using remote testing technology. System modeling of the business process of managing a computer equipment fleet is performed, within which a multi-level functional model is built based on the use of the SADT methodology. The following mechanisms are worked out in detail: implementation of diagnostics of the state of the hardware and software installed on computers based on testing; saving test results and transmitting them over the network to the server; analysis and assessment of the technical condition, composition and configuration of software; support for decision-making related to managing a computer equipment fleet. An architecture diagram of the testing, collection, storage and processing system of data, as well as support for decision-making within the framework of managing a computer equipment fleet has been developed. The functional capabilities of the system for monitoring and decision support for managing a computer equipment park are shown, as well as the algorithm of its operation using special software for testing and data analysis (Zabbix system). The developed complex of system models is the basis for the practical implementation of the project of the decision support system for managing a computer equipment park.

Keywords: computer testing, computer system, computer network, hardware, software, decision support

Введение

Интенсивное развитие компьютерной техники и цифровых технологий, повышение сложности решаемых задач обуславливают высокие требования к надежности компьютерных систем, бесперебойности их работы в течение длительного времени при сохранении точности и корректности исполнения команд [1, с. 4]. Компьютерные системы и сети в подавляющем большинстве случаев относятся к сложным организационно-техническим системам [2, с. 4].

Для них характерны многообразие используемых аппаратно-программных средств, а также высокие требования к управлению ресурсами [3]. Мониторинг позволяет реализовать наблюдение, анализ и поддержание работоспособности системы, процессов или предоставляемых услуг [4]. В ходе мониторинга выполняется сбор информации о сетевых устройствах, а также о возникающих на них авариях и ошибках [5]. В процессе работы компьютеров в результате воздействия дестабилизирующих

факторов могут накапливаться нарушения изначально установленной конфигурации. В случае отказов аппаратных средств простои оборудования и работы, связанные с локализацией неисправностей, приводят к экономическим потерям и убыткам компаний [6, с. 3]. Все это позволяет сделать вывод об актуальности задачи мониторинга технического состояния компьютеров в локальной сети с целью повышения эксплуатационной надежности и эффективности их функционирования, а также поддержания основных параметров программно-аппаратной среды в требуемых пределах.

Цель исследования: повышение эффективности функционирования парка компьютерной техники за счет своевременного и обоснованного принятия решений о ее обслуживании, ремонте и модернизации на основе результатов тестирования, выполненного в компьютерной сети.

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось на кафедре информатики УУНиТ (ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»). Проектирование системы поддержки принятия решений при управлении парком компьютерной техники выполнено в рамках реинжиниринга бизнес-процессов управления парком компьютерной техники, установленной в локальной сети кафедры, в которой в учебном процессе используется система электронного обучения [7].

В ходе выполнения проектных работ были разработаны:

- обобщенная схема локальной компьютерной сети кафедры (фрагмент общей схемы сети), включающая учебные компьютерные классы (разработана в MS Visio);
- функциональная модель с детальной проработкой бизнес-процессов тестирования компьютеров (разработана на основе методологии структурного анализа и проектирования SADT (Structured Analysis and Design Technique) по стандарту IDEF0);
- схема архитектуры системы тестирования, сбора, хранения и обработки данных, а также поддержки принятия решений в рамках управления парком компьютерной техники (разработана в MS Visio).

Результаты исследования и их обсуждение

Проект разработки системы поддержки принятия решений при управлении парком компьютерной техники (ПКТ) предусматривает создание системы мониторинга компьютерной техники в нескольких компьютерных классах, что позволяет автоматизировать процесс сбора, анализа и пред-

ставления информации о состоянии оборудования и программного обеспечения. Основным инструментом мониторинга – система Zabbix [8], с помощью которой осуществляется контроль за параметрами работы компьютеров, их производительностью, установленным программным обеспечением и объемом занятого дискового пространства. Компьютерные классы объединены в единую сеть. В каждом классе имеется отдельный коммутатор, к которому подключены компьютеры. Все коммутаторы соединены с маршрутизатором, расположенным в серверной комнате, который обеспечивает связь с центральным сервером Zabbix. Обобщенная схема локальной компьютерной сети кафедры (фрагмент общей схемы сети), включающая учебные компьютерные классы, представлена на рисунке 1.

В качестве инструмента системного моделирования использована методология SADT, позволившая разработать функциональную модель бизнес-процесса управления парком компьютерной техники. С позиций методологии SADT этот процесс может быть представлен графически в виде диаграммы A-0, как показано на рисунке 2.

Первый уровень декомпозиции (контекстные диаграммы A1-A4) функциональной модели показан на рисунке 3. Он включает основные функциональные блоки: блок реализации процесса выбора персонального компьютера для проведения диагностики; блок тестирования аппаратной части ПК и установленного программного обеспечения; блок оценки технического состояния аппаратной части ПК, установленного программного обеспечения (ПО); блок поддержки принятия решений о необходимости технического обслуживания, ремонта и/или модернизации ПК, а также необходимости установки и обновления ПО.

Декомпозиция контекстной диаграммы A1, описывающей бизнес-процесс, связанный с диагностикой ПК с использованием программы тестирования (программа AIDA64), показана на рисунке 4. Определяется информация: о комплектующих ПК (BIOS, системная плата, процессор, устройства памяти, системные разъемы и разъемы портов, встроенные устройства); о системе отображения и ее компонентах (видеоадаптер, видеопроцессор, видеопамять, компоненты библиотеки OpenGL, установленные в системе шрифты); о компонентах мультимедиа; об устройствах хранения данных; об установленной операционной системе, драйверах и системных библиотеках; об установленных сертификатах; о зарегистрированных пользователях; о параметрах сети; о системе безопасности; об установленном ПО.

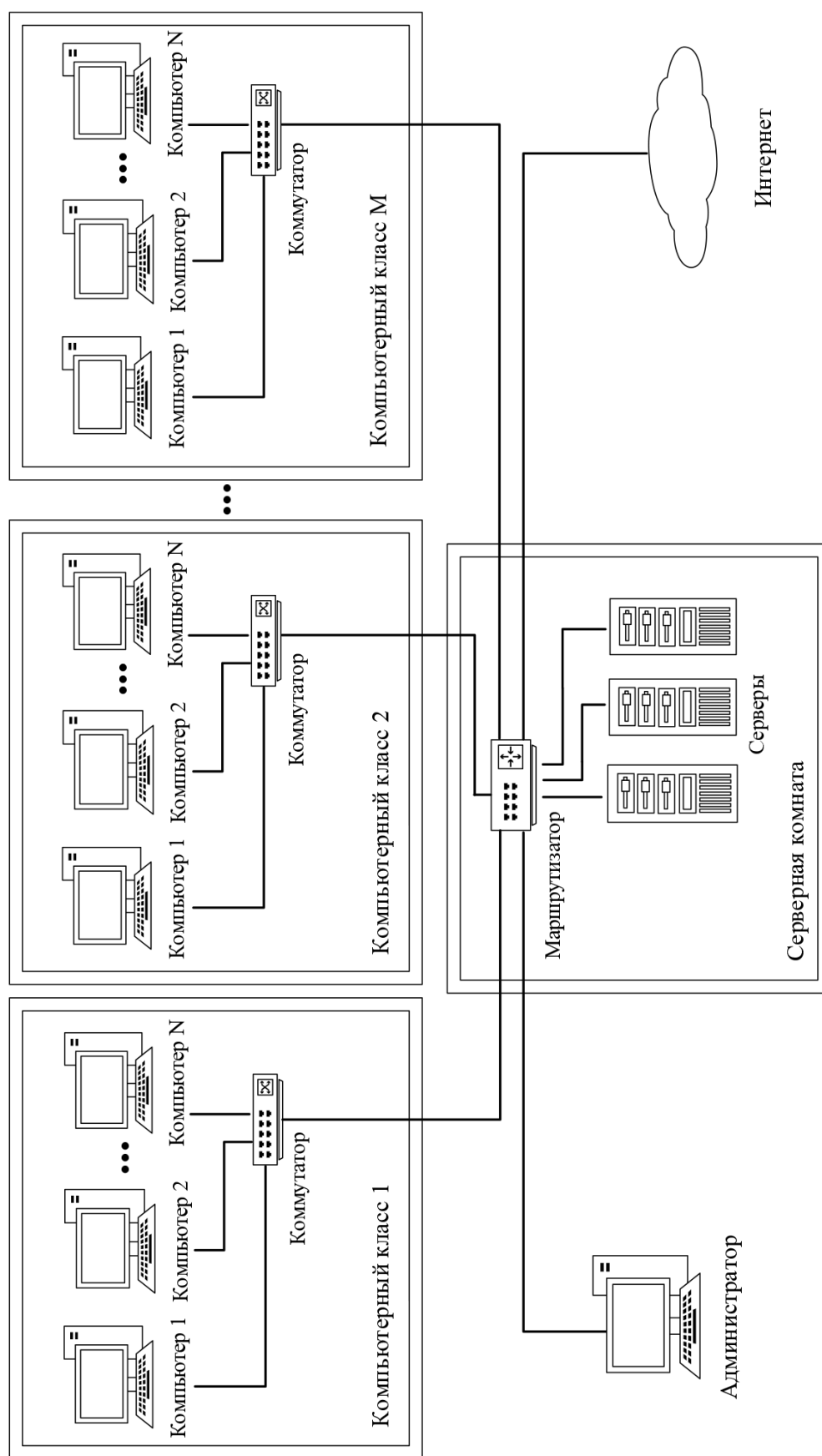


Рис. 1. Обобщенная схема локальной сети
Источник: разработано авторами

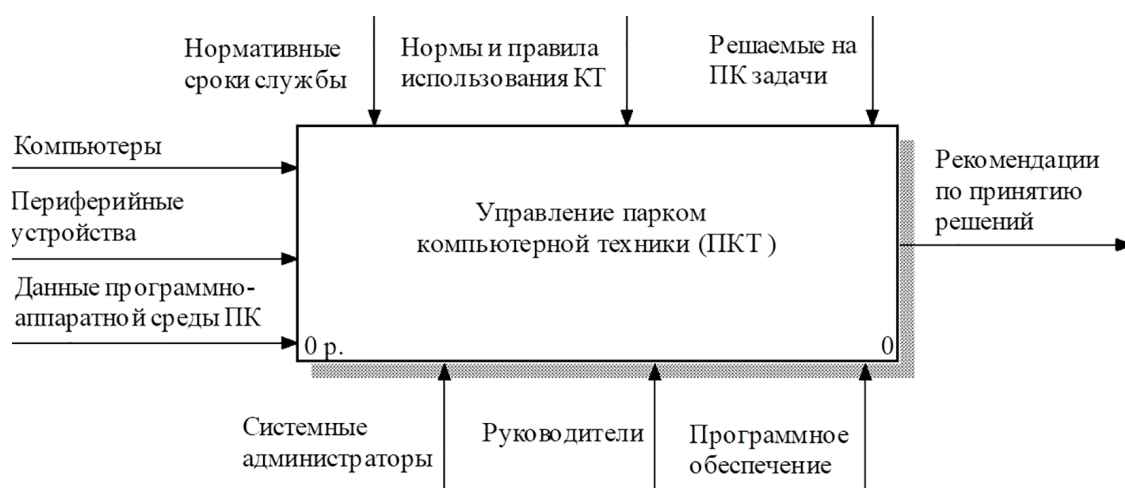


Рис. 2. Модель IDEF0, диаграмма уровня АО
Источник: разработано авторами

После проведения тестирования конфигурации ПК выполняется выбор данных для дальнейшего сохранения. Массив выбранных данных сохраняется в виде файла определенного формата на жесткий диск (HDD) ПК, на котором проводилось тестирование. Помимо сохранения на HDD тестируемого ПК, файл с данными по сети передается на сервер для хранения в БД и последующей обработки.

На рисунке 5 показан процесс анализа данных, переданных на сервер после проведения тестирования ПК. Последовательно анализируются данные о состоянии аппаратной и программной части (установленном ПО) ПК. Готовится заключение о соответствии параметров программно-аппаратной среды ПК требуемой конфигурации.

На рисунке 6 представлена архитектура системы тестирования состояния ПК. Показаны основные блоки процессов сбора, хранения данных в БД ПК, их обработки и визуализации для последующей поддержки принятия решений при управлении ПКТ.

Система управления ПКТ предусматривает реализацию следующих функций с использованием системы Zabbix и программы тестирования ПК AIDA64.

1. Автоматизированный мониторинг конфигурации программно-аппаратной среды ПК, установленных в компьютерных классах, включенных в локальную сеть:

- проверяются аппаратная конфигурация ПК, определяемая составом, и характеристики технических устройств, таких как BIOS, системная плата, процессор, устройства памяти, системные разъемы, встроенные устройства, видеоадаптер, видеопроцессор, видеопамять и др.;

- определяется состав установленного на ПК программного обеспечения – операционная система, драйверы, библиотеки, сертификаты, кодеки, сетевое окружение, брандмауэры и антивирусы, лицензии, прикладное программное обеспечение и т.д.

2. Контроль производительности ПК на основе тестов (тестирование процессора, оперативной памяти, дисковой системы), запускаемых в автоматическом режиме с заданной периодичностью, для определения соответствия установленным требованиям.

3. Определение структуры дискового пространства и наличия свободного места на жестких дисках ПК для предотвращения ситуаций, когда нехватка свободного места может привести к сбоям в работе ПО.

4. Передача собранных данных на сервер, организация их хранения в БД ПК, формирование отчетных документов и их хранение в БД.

5. Обработка и анализ специалистом-аналитиком собранных данных для принятия решений в рамках системы управления ПКТ о необходимости проведения обслуживания, ремонта, модернизации ПК, а также обновления ПО до актуальных версий и/или установки нового ПО в соответствии с требованиями нормативных документов.

Для мониторинга в классах на каждый ПК устанавливаются агенты Zabbix, которые по определенному алгоритму с заданной периодичностью выполняют сбор данных о состоянии ПК и передают их по сети на сервер. Серверный компонент Zabbix обрабатывает входящие данные, сохраняет их в БД ПК и сравнивает их с заданными значениями (БД нормативных документов), а также формирует отчеты и уведомления в случае выявления отклонений.

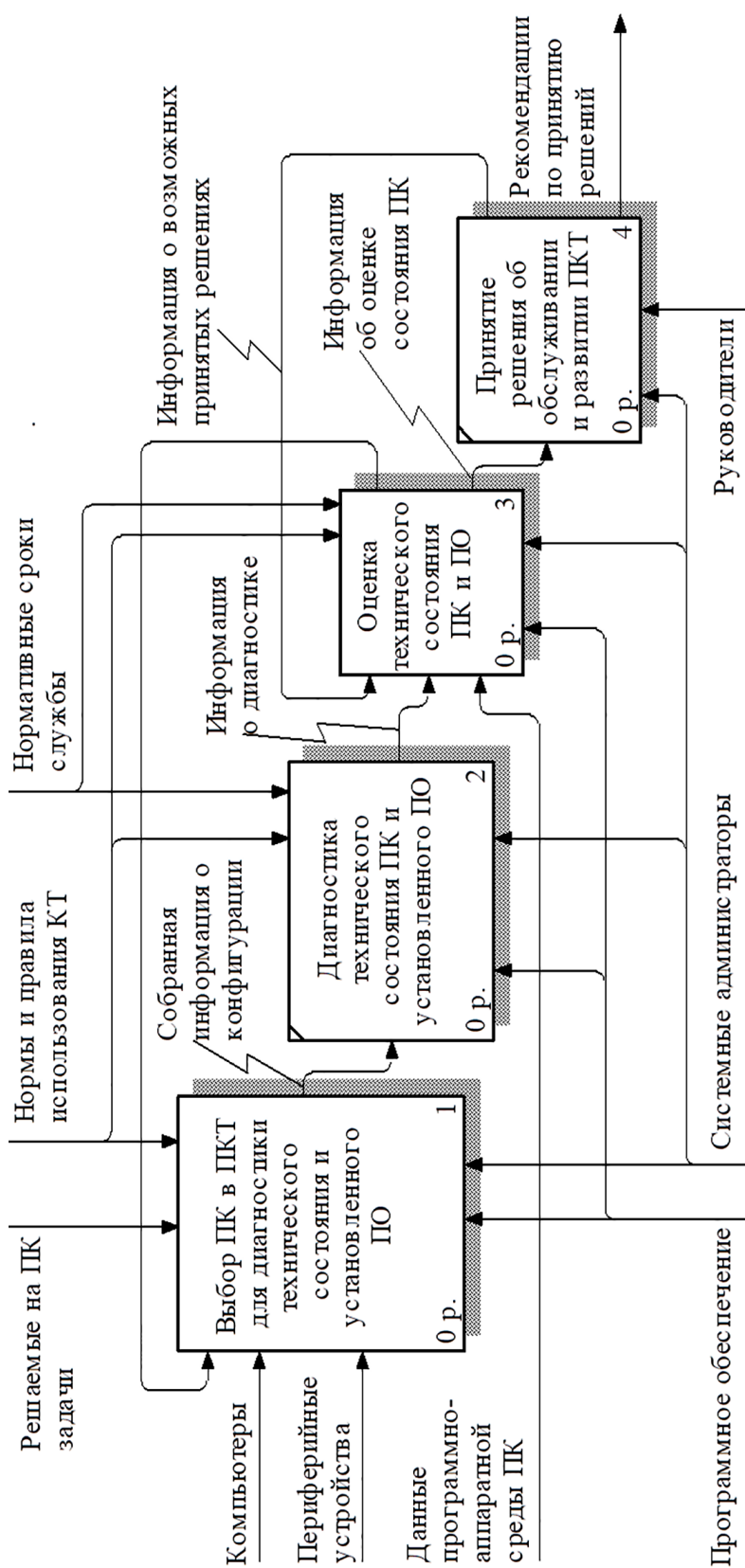


Рис. 3. Модель IDEF0, контекстная диаграмма A1-A4
Источник: разработано авторами

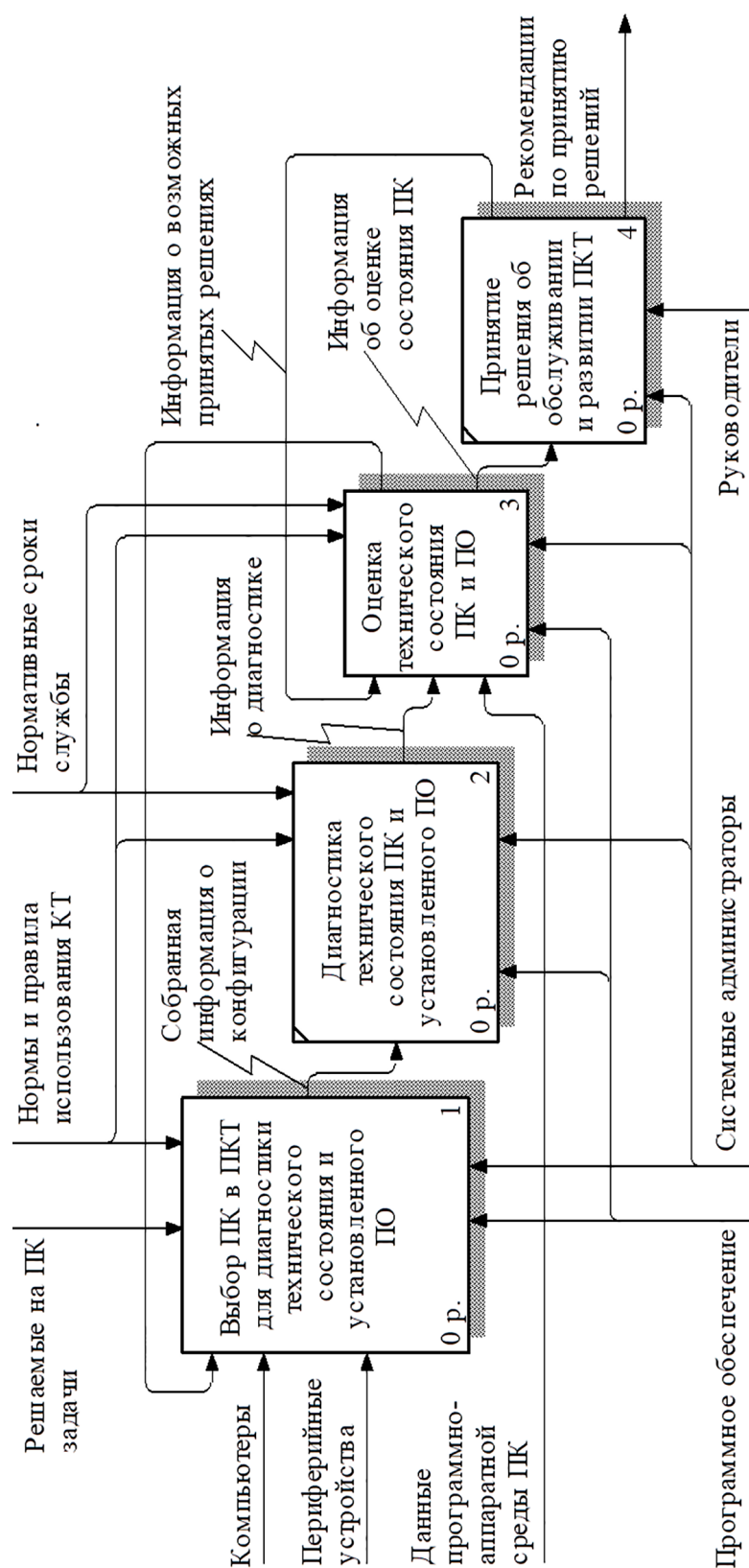


Рис. 4. Модель IDEF0, контекстная диаграмма A11-A14
Источник: разработано авторами

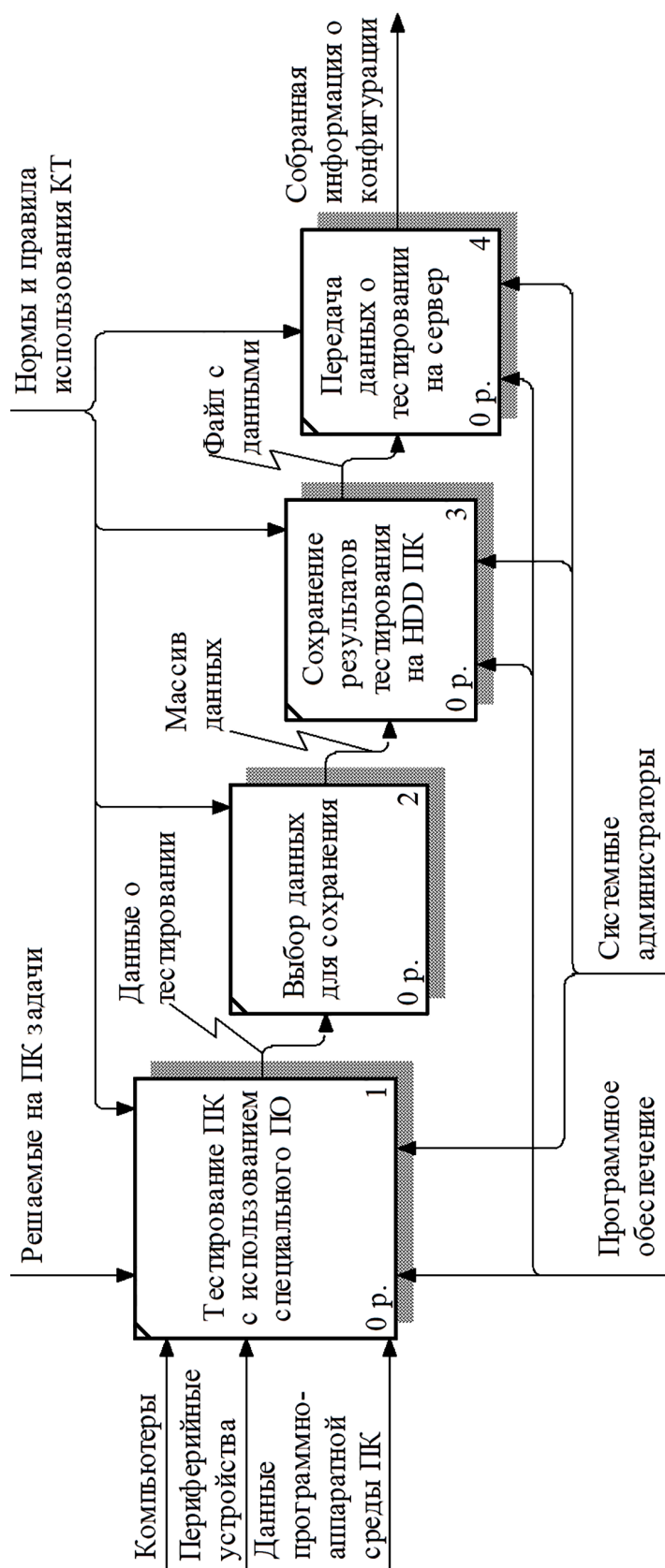


Рис. 5. Модель IDEF0, контекстная диаграмма A31-A34
Источник: разработано авторами

Приведенное в статье описание функциональных возможностей системы мониторинга и поддержки принятия решений при управлении парком компьютерной техники, а также алгоритм ее работы с использованием специального программного обеспечения для тестирования и анализа данных позволят создать и внедрить эффективную систему мониторинга и управления парком компьютерной техники.

Практическая реализация проекта обеспечит повышение эффективности функционирования парка компьютерной техники за счет своевременного и обоснованного принятия решений о ее обслуживании, ремонте и модернизации. Основой для принятия решений будут являться данные, полученные в результате проведения плановых проверок состояния компьютерной техники и установленного на ней программного обеспечения с использованием технологии тестирования в локальной сети.

Список литературы

1. Петров В.П. Техническое обслуживание и ремонт компьютерных систем и комплексов: учебник. М.: Академия, 2019. 304 с.
2. Никитин В.Е., Никитин М.Е., Утусиков С.В. Телекоммуникационные системы и сети: учебник. М.: Академия, 2019. 288 с.
3. Ковтуненко А.С., Масленников В.А. Создание распределенных информационно-управляющих систем на базе агентно-ориентированного подхода // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. ИПУ РАН. 2014. С. 8984-8994. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_22231872_10032632.pdf (дата обращения: 14.03.2025).
4. Костромин Р.О. Особенности реализации системы мониторинга гетерогенной вычислительной среды // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 12-2. С. 264-269. DOI: 10.17513/snt.39892.
5. Исаев А.Л., Опарин И.А. Современные системы мониторинга телекоммуникационного оборудования // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 96-8. С. 50-55. DOI: 10.18411/trnio-04-2023-405.
6. Дудник Л.Н. Разработка методического обеспечения для контроля и прогнозирования технического состояния основных блоков компьютерной сети: автореферат дис. ... канд. тех. наук. Краснодар, 2011. 23 с.
7. Минасов Ш.М., Тархов С.В. Проект «ГЕФЕСТ» как вариант практической реализации технологий электронного обучения в вузе в условиях интеграции традиционного и дистанционного обучения // Образовательные технологии и общество. 2005. Т. 8, № 1. С. 134-147. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_9164965_42513711.pdf (дата обращения: 14.03.2025).
8. Система распределенного мониторинга Zabbix. URL: <https://www.zabbix.com/ru/> (дата обращения: 13.03.2025).

ПЕРЕХОД К ЦИФРОВОМУ УПРАВЛЕНИЮ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИЕЙ

Хвостиков А.С.

*ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»,
Комсомольск-на-Амуре, e-mail: knastu@list.ru*

В настоящее время стоит важная задача цифровизации энергетической отрасли. Цифровые технологии управления и мониторинга состояния позволяют сократить число аварий, выполнить мгновенные переключения электрических сетей, что значительно повышает надежность обслуживания. В статье проведен обзор достижений в области перехода к цифровому управлению тепловой электрической станцией. Цель исследования состоит в анализе путей, по которым идет развитие энергетики в развитии цифровых технологий и выработки основных направлений внедрения в области перехода к цифровому управлению электрической станцией. Исследование проведено на основании анализа предпосылок перехода к цифровому управлению электрической станцией, трудностей в развитии проекта в России и задач, стоящих перед разработчиками. Выявлено, что цифровые технологии управления и мониторинга состояния позволяют сократить число аварий, выполнить мгновенные переключения электрических сетей, что значительно повышает надежность обслуживания. Повышение автоматизации направлено на снижение затрат на управление, повышение качества управления, в том числе со снижением ошибок человеческого фактора. Среди основных требований к разрабатываемой умной электрической станции: способность к умному реагированию, управление с позиции самовосстановления или мягкого отключения, разработка системы автоматической диагностики, самодиагностика датчиков, исполнительных механизмов и оборудования, внедрение управления технологическими активами и обеспечение удаленного доступа к информации специалистам различного уровня с постоянным сбором, мониторингом, анализом информации в режиме реального времени. Проанализировав задачи, решаемые внедрением в тепловые электрические станции, можно сделать вывод о том, что достигнуть цели создания умных электрических станций возможно на основе искусственного интеллекта.

Ключевые слова: управление, умная электростанция, диагностика, умное реагирование, удаленный доступ, цифровые двойники, искусственный интеллект

STUDY OF ALUMINUM ALLOY ROLLING OIL ANTIFRICTION PROPERTIES BY ULTIMATE REDUCTION METHOD

Khvostikov A.S.

Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: knastu@list.ru

Currently, there is an important task to digitalize the energy industry. Digital control and condition monitoring technologies make it possible to reduce the number of accidents and perform instantaneous switching of electrical networks, which significantly increases the reliability of service. The article provides an overview of the achievements in the field of transition to digital management of a thermal power plant. The purpose of the study is to analyze the ways in which energy is developing in the development of digital technologies and to develop the main directions of implementation in the field of transition to digital management of an electric power plant. The study is based on an analysis of the prerequisites for the transition to digital control of an electric power plant, the difficulties in the development of the project in Russia and the challenges facing the developers. It has been revealed that digital control and condition monitoring technologies can reduce the number of accidents, perform instantaneous switching of electrical networks, which significantly increases the reliability of service. Increasing automation is aimed at reducing management costs and improving the quality of management, including reducing human error. Among the main requirements for the smart power plant being developed are: The ability to respond intelligently is self-healing or soft shutdown management, development of an automatic diagnostic system, self-diagnosis of sensors, actuators and equipment, implementation of technological asset management and provision of remote access to information to specialists at various levels with constant collection, monitoring, and analysis of information in real time. After analyzing the tasks solved by the introduction of thermal power plants, it can be concluded that it is possible to achieve the goal of creating smart power plants based on artificial intelligence.

Keywords: management, smart power plant, diagnostics, smart response, remote access, digital twins, artificial intelligence

Введение

В настоящее время активно идет развитие в области цифровизации общества. По прогнозу компании Skyquest, объемом глобального рынка интернета вещей (IoT) в период с 2025 по 2032 г. составит 318,8 млрд долл. Активно цифровые технологии внедряются в промышленность. Цифровые технологии используют для об-

работки данных, управления процессом посредством подключения к интернету, происходит обмен данными, диагностика, прогнозирование развития дефектов и упрощение эксплуатации. Развитие цифровых технологий в энергогенерирующей отрасли идет с существенным отставанием не только от многих других стран, но и от смежных отраслей экономики [1]. В статье рассмо-

трим преимущества, которые несет переход к цифровым технологиям энергетической отрасли, причины, тормозящие развитие, и основные пути развития.

Умные технологии уже прочно вошли в нашу жизнь в виде умных устройств, бытовых приборов и даже домов. Использование в таких устройствах искусственного интеллекта, интернета вещей и других передовых технологий позволяет значительно упростить обслуживание сложных устройств, взаимодействие между ними и, как следствие, их обслуживание и безопасность.

В сфере энергетики значительный успех имеют проекты умные сети (Smart Grid) и цифровая подстанция. Цифровые технологии управления и мониторинга состояния позволяют сократить число аварий, выполнить мгновенные переключения электрических сетей, что значительно повышает надежность обслуживания. Активно развиваются в России проекты «умный город», реализация которых невозможна без реализации проекта «умная электростанция».

В настоящее время стоит важная задача по цифровизации энергетической отрасли. Основным сдерживающим фактором развития умной электростанции являются различные принципы управления электростанции (турбины, котельное оборудование, топливоподача, водоподготовка, электроцеха). При этом управление процессами ограничивается требованиями соблюдения экологических норм [1].

Цель исследования состоит в анализе путей, по которым идет развитие энергетики в развитии цифровых технологий и выработки основных направлений внедрения в области перехода к цифровому управлению электрической станцией.

Материалы и методы исследования

В исследовании использовались преимущественно теоретические методы: изучение литературы по проблеме исследования, сравнительный анализ методологий, обобщение. В качестве материалов исследования выступили научные статьи и книги, посвященные проблеме внедрения цифрового управления электрической станции и предикативной аналитики энергетического оборудования.

Результаты исследования и их обсуждение

Высокотехнологичные предприятия нуждаются для обеспечения объемов и качества продукции усиливать автоматизацию производственным процессом. Повышение автоматизации направлено на снижение затрат на управление, повышение качества

управления, в том числе со снижением ошибок человеческого фактора [2].

Переход к цифровым технологиям сдерживают информационные ограничения. Так, многие дефекты невозможно диагностировать даже в условиях длительного накопления исследуемых данных. Так, например, возникновение пульсаций в камерах газовых турбин настолько быстро развивающийся дефект, что при существующем наборе датчиков не поддается прогнозированию. Между тем, согласно литературному обзору, количество диагностируемых дефектов непрерывно растет. Что дает надежную основу для внедрения автоматической системы диагностирования для внедрения умных электростанций [1].

В доктрине энергетической безопасности [1] раскрыты в том числе и вызовы, представляющие опасность национальным интересам, в том числе от перехода к цифровым технологиям в энергетике. Таковыми вызовами, по мнению разработчиков, являются:

– Несоответствие технологического уровня отечественных предприятий современным мировым требованиям и зависимость от импорта. Чрезмерная зависимость деятельности отечественных предприятий от импорта оборудования, технологии, материалов, услуг, программного обеспечения [1]. В последнее время эта зависимость выросла в связи с невозможностью западных предприятий обслуживать энергетическое оборудование из-за санкций. В связи с этим необходимо развитие, прежде всего, отечественных предприятий производителей энергетического оборудования.

– Недостаточная инновационная активность предприятий, ориентация на импорт технологий. Как уже неоднократно отмечалось, в России наблюдается значительный износ электрогенерирующего оборудования [3]. При этом эксплуатация изношенного оборудования гораздо более затратна по сравнению с использованием прогрессивных технологий. Развитие технологий ограничивается ориентацией на импорт технологий.

– Состояние нормативно-правовой базы сдерживает развитие цифровых технологий в сфере энергетики. Использование умных электростанций требует значительного изменения нормативной документации. Такие изменения активно внедряются в российское законодательство и нормативные акты. Внесены изменения в федеральные законы и стандарты, регламентирующие эксплуатацию по состоянию, создание цифровых моделей, удаленное управление и другие изменения.

– Недостаточные темпы разработки и внедрения антитеррористической инфраструктуры. Недостаточный уровень защищенности инфраструктуры топливно-энергетической отрасли. Удаленное управление электростанции требует развитой системы информационной защиты.

Внедрение умной электрической станции активно разрабатывается для отечественных и зарубежных систем управления. Рассмотрим основные требования, предъявляемые к таким разработкам. Во-первых, это способность к умному реагированию. Под умным реагированием понимается, прежде всего, управление с технологической, экологической и экономической точек зрения. Важно отметить, что эти принципы управления зачастую противоречат друг другу. Например, с точки зрения необходимости полного сгорания топлива требуется увеличение коэффициента избытка воздуха, что влечет за собой затраты энергии на подогрев воздуха и, следовательно, снижение экономических показателей. По-прежнему важно, что выберут в качестве основного критерия производительности. Как отмечают в [4], основные направления модернизации управления энергетическими системами, как в процессе добычи, так и преобразования энергоресурсов направлены на снижение экологического воздействия. Поэтому основные направления модернизации будут скорее всего направлены на снижение энергетических выбросов. Системы управления должны обладать способностью к совершенствованию и приспособляться к изменению технических показателей оборудования. Для этого в таких системах предусматривается система непрерывного самообучения [1].

Важным требованием с позиции надежного обеспечения энергетическими ресурсами является самовосстановление или мягкое отключение, обеспечиваемое переключением на резервное оборудование при авариях или выходе из строя элементов электрических станций. Такую функцию электрической станции дублирует система умной подстанции [1].

Следующее требование оперативного реагирования включает в себя системы автоматической диагностики, самодиагностика датчиков, исполнительных механизмов и оборудования. Постоянный мониторинг, диагностика и самообучение позволяют оперативно реагировать на внештатные ситуации [5].

Перед умными электростанциями ставится задача управления технологическими активами. Это обеспечивается не только централизацией и управлением закупкой

запасных частей и резервируемым оборудованием, но и переходом к обслуживанию оборудования по состоянию.

Для обеспечения вышеуказанных требований необходимо обеспечить обучение обслуживающего персонала электрических станций. К компетенциям персонала должны предъявляться требования не только компетенций по обслуживаемому оборудованию, но и по системам управления выполняющих планирование ремонта и диагностики этого оборудования.

Изменение подхода к диагностированию оборудования заключается в определении периода оптимального с позиции рентабельности ремонта оборудования. Умные технологии диагностирования позволяют предположить выход из строя оборудования и, учитывая график нагрузки, найти время ремонта [6].

Также требуется обеспечение удаленного доступа к информации специалистам различного уровня с постоянным сбором, мониторингом, анализом информации в режиме реального времени. Расширение функционала требует обеспечения безопасного доступа к критически важным системам управления.

В настоящее время системы управления электрической станцией состоят из трех уровней. На нижнем уровне располагаются контрольно-измерительные приборы, запорно-регулирующая арматура, приборы собственных нужд. Датчики давления, температуры, расхода и др. измеряют параметры работы основного оборудования по каналам ввода-вывода передаются на средний уровень. Средний уровень состоит из модулей ввода вывода и программно-логических контроллеров, которые производят предварительную обработку сигнала и отдают сигналы управления исполнительным механизмам. Основная обработка производится на верхнем уровне, в которую входят операторские станции, серверы и шлюзы передачи данных. Управление осуществляют операторы, наблюдающие за показаниями сигналов датчиков и средств сигнализации.

Исходя из рассмотренных требований к умным электростанциям, рассматриваются и разрабатываются состав основных элементов таких систем управления. Основные разработки ведутся в рамках программы Energy Net – программы комплексного преобразования энергетики. В состав основных систем управления должны входить интеллектуальная система управления технологическими процессами. Управление технологического процесса происходит с помощью нейронных сетей на основе опытной эксплуатации основного оборудо-

вания. В процессе управление на основе собранных данных о работе оборудования формируется управляющее воздействие на регулирующие органы для достижения оптимального функционирования оборудования с позиции принятых критериев.

Критерии управления электрическими станциями с позиции технологических, экономических и экологических критериев противоречивы. В последнее время достижение экологических критериев превалирует над энергетическими затратами. Вопросы обеспечения надежности электростанции до сих пор остаются приоритетными. Критерии управления, которые будут приняты для управления умной электрической станцией, зависят от стратегии, принятой государством. Интеллектуальное управление технологическими процессами должно включать также управление режимов работы. Управление технологическими процессами должно быть перестроено в соответствии с новой нормативной базой, разрабатываемой на основе доктрины энергетической безопасности РФ и энергетической стратегии.

Для расширения функционала контроль уровня параметров заменяется сравнением измеренных параметров с расчетными. Расчетные параметры формируются на основе интеллектуальных цифровых двойников. Цифровые двойники формируются при производстве высокотехнологичного оборудования, и в процессе эксплуатации на основе обучения нейронных сетей происходит изменение математической модели [2].

Следующий блок умной электростанции включает в себя интеллектуальное управление техническим обслуживанием, ремонтом и бизнес-процессами. На основе интеллектуального автоматического контроля параметров и диагностики собирается информация о состоянии оборудования электростанции. Одновременно происходит учет наработки по всем единицам оборудования. На основе полученной информации происходит определение всех воздействий над технологическим оборудованием, планирование ремонта, закупки оборудования и комплектующих и другими экономическими процессами. На основе самодиагностики оборудования и систем управления упрощаются ремонт и техническое обслуживание. На основании работы системы управления происходит автоматическое формирование технико-экономических отчетов и первичной документации.

Блоки цифровых двойников и управление техническим обслуживанием, ремонтом и бизнес-процессом работают удаленно. Вследствие чего создается интеллектуаль-

ная система кибербезопасности и система управления физическим доступом транспорта и персонала

В России развитие систем умной электростанции появляется поэтапно. Первые системы предикативной аналитики внедрены на атомных и гидравлических электростанциях [5, 7]. В настоящее время активно ведется разработка систем умного управления электрическими станциями. Лидерами в области программного обеспечения являются зарубежные производители: SPPA D3000 plant Monitor Simens, General Electric digital twin, Aveva predictive analytics и др. В России внедрение систем умного управления находится на этапе разработки собственного и замены иностранного программного обеспечения. Поэтому на данном этапе важно определиться с основными подходами в обработке диагностических сигналов. Система прогностики на базе программного комплекса «Прана» позволяет реагировать на отклонение параметров в режиме реального времени с временем реакции на отклонение параметра 1 секунда, позволяя выявлять большинство возникающих дефектов за месяц до их возникновения. Система «Прана» является одним из лидеров в области диагностики энергетического оборудования.

Создание системы умного управления невозможно без развития нейронных систем управления. Принципы создания систем управления на основе нечетких множеств описаны в [8]. В настоящее время применение систем управления на основе нечетких множеств позволяет создавать системы управления для реализации сложных законов регулирования. Нечеткие алгоритмы управления в совокупности с использованием классических способов и методик регулирования позволяют существенно улучшить ряд динамических характеристик развитых систем автоматизации, упростить синтез процедур управления такими системами, а также расширить возможности учета и компенсации детерминированных и недетерминированных возмущающих воздействий.

Модернизация включает в себя не только изменение аппаратной системы, активно развивается система обработки. Система умного реагирования направлена на изменение подхода за контролем параметром. В классическом подходе ведется контроль за превышением сигнала от уставки. В системе предиктивной аналитики контроль параметров ведется за отклонением от расчетного сигнала, определяемого на основании математического моделирования объекта диагностирования. Расчетный сиг-

нал разрабатывается на основе разработки цифрового двойника. Принципы проектирования описаны в [2]. Цифровое моделирование входит в систему предиктивной аналитики. Разрабатываемые модели во время производства энергетического оборудования во время эксплуатации претерпевают изменения, и в процессе работы на основе обучения нейронных сетей происходит изменение модели цифрового двойника. Обработка ведется на основе нейронных сетей [9].

Обработка сигналов датчиков также претерпевает изменение за счет изменения подходов к обработке. Остро стоит вопрос по обеспечению кадров для выполнения заявленных задач. С 2022 г. проходит конкурс в области специалистов по диагностике электрических станций. В числе основных задач стоит умение обработки датасетов и выявления момента обнаружения изменений, ведущих к аварии, разделение режимов работы оборудования, выявление аномалий. Лучшие решения появляются с использованием инструментов нечеткой логики. Искусственные нейронные сети предлагается применить для решения задач, где формализация процедур решения либо достаточно сложная, либо по определенным причинам невозможна.

Заключение

Проведя анализ литературных источников по проблеме внедрения цифровых технологий в управление тепловыми электрическими станциями, можно сказать, что в России достигнут определенный успех в области внедрения умных электростанций. При этом имеются определенные сложности в наличии отечественного программного обеспечения для реализации проекта и соответствия законодательства в области управления электрической станцией.

На основании требований, разработанных для создания умных электрических станций, были проанализированы методы их достижения. Проанализировав задачи, решаемые внедрением в тепловые электрические станции, можно сделать вывод

о том, что достигнуть цели создания умных электрических станций возможно на основе искусственного интеллекта. Большинство требований, предъявляемых к умным электростанциям, состоит в наличии возможности самообучения, что также возможно решить только с помощью нейросетевых технологий.

Список литературы

1. Мартынов В., Зорченко Н., Панфилов Д. «Умные электростанции» – цифровое будущее энергетики // Энергетическая политика. 2021. № 9 (163). С. 86–95. DOI: 10.46920/2409-5516_2021_9163_86. EDN USNQID.
2. Горькавый М.А., Егорова В.П., Соловьев В.А., Горькавый А.И., Мельниченко А.И. Разработка архитектуры системы управления роботизированным производственным процессом на базе технологии цифрового двойника // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2023. № 1 (65). С. 40–46. DOI: 10.17084/20764359-2023-65-40. EDN RXYVAN.
3. Гаак В.К., Гаак А.В. Износ оборудования – возрастающая проблема теплоэнергетики // Национальные приоритеты России. 2017. № 1 (23). С. 99–102.
4. Степанов Л.А. Энергетика будущего: прогнозы и перспективы (краткий обзор) // Современная наука и образование: проблемы, решения, тенденции развития: сборник статей III Международной научно-практической конференции (Петрозаводск, 18 января 2024 г.). Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2024. С. 276–280. EDN BMEUWJ.
5. Семенихин А.В., Саунин Ю.В., Жук М.М. Опробование системы диагностики входной информации СВРК на энергоблоке № 1 Нововоронежской АЭС-2 // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 88–97. DOI: 10.26583/npe.2017.3.08.
6. Кораблев Ю.А. Прогнозирование неисправностей в технических системах на основе модели сходства оставшегося полезного срока службы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 6 (242). С. 142–155. DOI: 10.18522/2311-3103-2024-6-142-155. EDN MENUZY.
7. Липатов М. Первый в России комплекс предиктивной аналитики для энергетического и промышленного оборудования // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 3 (49). С. 82–83.
8. Хрульков В.Н., Черный С.П. Особенности реализации нечетких алгоритмов управления на базе программируемых логических контроллеров // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2022. № 1 (57). С. 52–62. DOI: 10.17084/20764359-2022-57-52.
9. Ермоленко Д.В., Азаров П.С. Применение современных информационных технологий в энергетике // Инновации. Наука. Образование. 2022. № 71. С. 12–16. EDN TQHQDG.

УДК 519.688

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗДАНИЙ

Шелехов И.Ю., Шелехова А.И., Лоскутов А.И., Непомнящих А.В.

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»,
Иркутск, e-mail: sheleh.ananas@yandex.ru

Целью исследования является выбор необходимых программных средств для оценки энергоэффективности зданий и сооружений различного назначения. Одним из важных факторов при эксплуатации здания является его энергоэффективность. На стадии проведения проектных работ, связанных как с новым строительством, так и с капитальным ремонтом зданий, необходимо оценить теплототери здания в зависимости от применяемых строительных материалов и от способа эксплуатации здания. На начальном этапе можно смоделировать не только сам теплотехнический процесс, но и оценить целесообразность применения различных технических решений и использование каких-либо строительных материалов. Для данной оценки используются различные программные средства. В данной работе авторы рассматривают три наиболее популярных программных комплекса для оценки энергоэффективности зданий: EnergyPlus, eQuest и OpenStudio. Авторы провели сравнительный анализ их функциональных возможностей, преимуществ и недостатков. Исследование включало моделирование различных типов зданий с использованием указанных программ, анализ точности расчетов, простоты использования и возможности интеграции с другими инструментами проектирования. В заключение сформулированы рекомендации по выбору наиболее подходящего программного комплекса в зависимости от конкретных задач пользователя.

Ключевые слова: энергоэффективность зданий, EnergyPlus, eQuest, OpenStudio, HVAC, расчет теплототери, моделирование энергопотребления, теплотехнический анализ

RESEARCH AND ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF EXISTING SOFTWARE SUITES FOR SOLVING THE TASK OF BUILDING ENERGY EFFICIENCY ASSESSMENT

Shelekhov I.Yu., Shelekhova A.I., Loskutov A.I., Nepomnyaschikh A.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, e-mail: sheleh.ananas@yandex.ru

The aim of the study is to select the necessary software for assessing the energy efficiency of buildings and structures for various purposes. One of the important factors in the operation of a building is its energy efficiency. At the stage of design work related to both new construction and major repairs of buildings, it is necessary to assess the heat loss of the building depending on the building materials used and the method of operating the building. At the initial stage, it is possible to model not only the heat engineering process itself, but also to assess the feasibility of using various technical solutions and the use of any building materials. Various software tools are used for this assessment. In this paper, the authors consider three of the most popular software packages for assessing the energy efficiency of buildings: EnergyPlus, eQuest and OpenStudio. The authors conducted a comparative analysis of their functionality, advantages and disadvantages. The study included modeling various types of buildings using these programs, analyzing the accuracy of calculations, ease of use and the possibility of integration with other design tools. In conclusion, recommendations are formulated for choosing the most suitable software package depending on the specific tasks of the user.

Keywords: building energy efficiency, EnergyPlus, eQuest, OpenStudio, energy modeling, HVAC, heat loss calculation, thermal analysis

Введение

В последние десятилетия энергоэффективность зданий приобрела особую значимость в контексте глобальных экологических проблем и стремления к устойчивому развитию. С инженерной точки зрения энергоэффективность здания определяется его способностью потреблять минимальное количество энергии при сохранении комфортных условий для пользователей. Этот показатель напрямую зависит от климатической зоны, в которой располагается здание, и от того, насколько эффективно

используются энергоресурсы на всех этапах эксплуатации. В связи с этим для обеспечения соответствия здания нормативам энергоэффективности и снижения энергетических затрат активно применяются различные методы оценки и моделирования энергопотребления [1].

Исследования ученых показывают, что энергетические потери здания составляют около 70% и в основном это тепловые потери здания, которые происходят из-за несовершенства ограждающих конструкций и неэффективности применяемого обо-

рудования. Чтобы устранить эти энергетические потери, необходимо знать, как эти потери происходят и какие мероприятия необходимо осуществить, чтобы их снизить, при этом немаловажным фактором является стоимость этих мероприятий, срок их окупаемости и срок эффективности этих мероприятий [2].

Все проводимые мероприятия должны осуществляться без снижения уровня комфорта внутри помещений, они не должны оказывать негативного влияния на окружающую среду и, самое главное, должен быть проведен сравнительный анализ. Любая процедура по обеспечению энергоэффективности условно должна разделяться на этапы: что было, что сделали и что получили. А в дополнение должен осуществляться анализ финансовых затрат на модернизацию, на поддержание в надлежащем порядке этих мероприятий и срок, в течение которого эффект будет наблюдаться.

Для разработки мероприятий по снижению энергетических потерь необходимо регулярно проводить энергоаудит, при этом необходимо знать нормированные требования, предъявляемые к оборудованию и к ограждающим конструкциям, чтобы выявить брак, износ, старение или неправильное функционирование.

Одним из наиболее эффективных инструментов для выполнения таких задач являются программные комплексы для оценки энергоэффективности зданий. В условиях повышения интереса к устойчивому строительству и необходимости уменьшения воздействия на окружающую среду такие программы играют ключевую роль в процессе проектирования и эксплуатации зданий. Они не только помогают архитекторам и инженерам анализировать потребление энергии, но и предлагают оптимизационные решения, которые способствуют повышению энергоэффективности и уменьшению эксплуатационных расходов [3].

Движение в этом направлении только началось, государство начало субсидировать данные программы, понимая, что данные инвестиции окупаются не быстро, но они способствуют освобождению энергетических ресурсов, соответственно, способствуют экономическому развитию страны. В соответствии с действующим законодательством все мероприятия, проводимые в здании, должны способствовать снижению энергетических затрат и это должно подтверждаться документально. С развитием информационных технологий данные мероприятия должны осуществ-

ляться с привлечением различных программных комплексов [4].

Цель исследования – изучение и анализ применимости существующих программных комплексов, таких как EnergyPlus, eQuest и OpenStudio, для решения задачи оценки энергоэффективности зданий.

Материалы и методы исследования

В рамках этого исследования был проведен сравнительный анализ этих программных продуктов, их функциональных возможностей, преимуществ и недостатков, это поможет выявить наиболее подходящий инструмент для использования в проектировании и эксплуатации зданий. Понимание их особенностей и правильный выбор программного обеспечения является важным шагом на пути к созданию более энергоэффективных, устойчивых и экономичных зданий.

Исследование проводилось в несколько этапов:

1. Анализ функциональных возможностей программных комплексов. Изучены основные технические характеристики EnergyPlus, eQuest и OpenStudio, включая поддержку климатических данных, алгоритмы расчета теплотерь и гибкость моделирования систем HVAC.

2. Создание тестовых моделей зданий. Разработаны три модели зданий: офисного, жилого и промышленного типа. Для каждой модели были заданы различные конструкционные параметры, включая материалы стен, оконные конструкции, системы отопления и вентиляции.

3. Расчет и анализ энергопотребления. Проведены расчеты энергопотребления для всех моделей зданий с учетом климатических условий региона. Сравнивались показатели годового энергопотребления, потери через ограждающие конструкции и эффективность систем отопления.

4. Сопоставление с реальными данными эксплуатации. Для проверки точности расчетов использовались данные реальных зданий, полученные из научных источников. Автор статьи «Оценка энергоэффективности с учетом влияния краевых зон ограждающих конструкций на теплотери здания» [5] разработал методику оценки энергоэффективности зданий, основанную на влиянии краевых зон ограждающих конструкций на теплотери здания.

5. Оценка удобства использования. Анализировалась сложность освоения программ, доступность документации, возможность автоматизации расчетов и интеграции с другими инструментами.

Результаты исследования и их обсуждение

Программные комплексы для оценки энергоэффективности зданий

1. EnergyPlus

EnergyPlus является мощным инструментом для моделирования энергопотребления зданий, разработанным Национальной лабораторией энергетических технологий (NREL) и Департаментом энергии США. Он позволяет анализировать работу систем HVAC, освещения, внутренних и внешних нагрузок.

Основные возможности:

- Поддержка сложных расчетов энергопотребления с учетом климатических данных.
- Расширенные возможности моделирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования (HVAC).
- Открытая архитектура с возможностью расширения функционала.
- Интеграция с BIM и CAD-системами.

Пример расчета энергопотребления офисного здания

Рассмотрим здание офисного типа площадью 5000 м², расположенное в средней климатической зоне. Цель – оценить ежегодное энергопотребление для отопления, вентиляции, кондиционирования (HVAC), освещения и оборудования.

Сначала в EnergyPlus создается модель здания с указанием его геометрии, характеристик ограждающих конструкций, окон, а также систем HVAC и освещения. Затем задаются климатические условия и типичные рабочие параметры.

После запуска расчета EnergyPlus симулирует энергопотребление в течение года и предоставляет детальные данные по каждой системе. Например:

- Отопление: 200 MWh в год.
- Вентиляция и кондиционирование: 300 MWh в год.
- Освещение: 150 MWh в год.
- Оборудование: 100 MWh в год.

Таким образом, анализ позволяет определить влияние различных систем на общее энергопотребление здания и выявить потенциальные пути повышения его энергоэффективности, что помогает архитекторам, инженерам и дизайнерам принимать обоснованные решения при проектировании и реновации зданий.

Программа EnergyPlus является мощным и гибким инструментом для моделирования энергопотребления зданий, который позволяет архитекторам, инженерам и дизайнерам проводить детальный анализ и оптимизацию энергоэффективности зданий

на различных этапах проектирования и эксплуатации. Ее высокая точность, расширяемость и широкий спектр возможностей делают ее одним из наиболее востребованных инструментов в области энергетического моделирования зданий [6].

В ходе исследования EnergyPlus использовался для анализа жилого и офисного зданий. Результаты показали, что программа предоставляет высокоточную оценку теплопотерь и энергопотребления, однако требует высокой квалификации пользователя.

2. eQuest

eQuest – бесплатный программный комплекс для анализа энергопотребления зданий, созданный на основе DOE-2. Основное его преимущество – простота освоения.

Основные возможности:

- Доступный графический интерфейс.
- Детализированное моделирование систем HVAC.
- Поддержка анализа жизненного цикла здания.
- Оптимизированная система отчетности.

Пример расчета энергопотребления в eQuest.

Рассмотрим офисное здание площадью 3000 м², расположенное в городе с умеренным климатом. Здание имеет стандартные ограждающие конструкции, среднюю изоляцию и обычные окна. В нем установлена стандартная система HVAC с вентиляцией и кондиционированием воздуха, а также стандартное освещение и оборудование [7].

После создания модели здания в eQuest и ввода всех данных запускается расчет, который учитывает климатические условия и характеристики системы. Результаты могут быть следующими:

- Годовое потребление энергии для отопления: 210 MWh.
- Годовое потребление энергии для вентиляции и кондиционирования: 200 MWh.
- Годовое потребление энергии для освещения: 100 MWh.
- Годовое потребление энергии для оборудования: 100 MWh.

Этот расчет позволяет оценить вклад каждой системы в общее энергопотребление здания и выявить области для повышения энергоэффективности.

Программа eQuest продолжает оставаться одним из основных инструментов в арсенале профессионалов в области энергетического моделирования зданий благодаря своей простоте использования, гибкости и мощным возможностям анализа. Ее активно используют архитекторы, инженеры и консультанты по энергосбережению для реализации проектов с высокими стандартами энергоэффективности и устойчивости [8].

Исследования, проведенные в eQuest, показали некоторые расхождения с расчетом, сделанным ручным способом и с помощью программы EnergyPlus. По нашему мнению, целесообразней использовать данную программу для предварительных расчетов по оценке энергоэффективности зданий.

3. OpenStudio

Следующим по популярности использования является программный комплекс OpenStudio. Благодаря использованию в качестве расчетного ядра программы EnergyPlus, OpenStudio является очень удобным инструментом для оценки энергоэффективности зданий с большими возможностями. Данный комплекс широко используется компаниями, которые профессионально занимаются данной тематикой [9].

Основные возможности:

- Возможность работы с другими платформами.
- Расширенные функции по моделированию.
- Детализированное моделирование систем HVAC.
- Возможность проводить экономическую эффективность.
- Не требует профессиональных навыков для использования.

С помощью данного программного комплекса можно создать модель исследуемого здания и смоделировать все технологические процессы, влияющие на энергоэффективность. В программном комплексе можно моделировать процесс по установке нового технологического оборудования с одновременной оценкой эффективности его работы и целесообразности проведения данных мероприятий. Например, можно оценить целесообразность применения различных утепляющих материалов и сопоставить их срок службы, трудозатраты, стоимость и теплоизоляционные свойства. Можно оценить изменение внутренних параметров микроклимата в зависимости от типа применяемого утеплителя при установке окон, в дополнение можно создать визуальную модель и оценить изменение энергопотребление здания или даже квартала. Также

с помощью программного комплекса можно оценить целесообразность применения солнечных панелей в зависимости от региона использования и наличия источников энергии в данном регионе.

OpenStudio может импортировать данные в большой спектр других программных комплексов, тем самым обеспечивая универсальность и возможность найти оптимальное решение по обеспечению энергоэффективности здания.

Обучение персонала работать с OpenStudio не вызывает затруднения, главное, чтобы они обладали профильными знаниями в области строительства. Увеличенные возможности программы подразумевают, что необходимо обладать навыками и умениями в смежных программах, которые используются в строительной отрасли. С помощью данной программы легко оценить весь жизненный цикл здания и разработать мероприятия по увеличению не только показателей по энергоэффективности, но и по увеличению срока службы здания.

Несмотря на высокую точность производимых расчетов данным программным комплексом, OpenStudio уступает по производительности программе eQuest. В основном это связано с наличием дополнительных возможностей в области построения графических рисунков и в оценке экономических показателей.

Проведенный анализ программных комплексов по оценке энергоэффективности зданий показал, что все продукты имеют свои преимущества и недостатки. С любым комплексом можно сделать оценку энергоэффективности зданий, но данную оценку необходимо осуществлять в зависимости от поставленных задач.

Для удобства выбора нужного программного комплекса авторы создали таблицу, где демонстрируются возможности каждого программного комплекса по отношению к его конкурентам. В зависимости от конкретных задач пользователя можно выбрать именно тот продукт, который более эффективно и с наименьшими временными затратами обеспечит достижение поставленной цели.

Сравнительный анализ программных комплексов

Параметр	EnergyPlus	eQuest	OpenStudio
Простота освоения	Сложный	Легкий	Средний
Гибкость и масштабируемость	Высокая	Средняя	Высокая
Поддержка стандартов	LEED, ASHRAE	ASHRAE, Energy Star	LEED, ASHRAE
Точность расчетов	Высокая	Средняя	Высокая
Скорость расчетов	Средняя	Высокая	Средняя

Заключение

Обеспечение энергоэффективности зданий – это государственная программа, которая должна обеспечить экономический рост страны, повысить благосостояние граждан и увеличить эффективность промышленности. Для этого необходимо разрабатывать и широко внедрять программные комплексы для мониторинга технического состояния зданий, осуществления качественных проектных работ, осуществления на основании экономического анализа учета потребляемых ресурсов, а также разрабатывать мероприятия по эффективному их использованию, оценки внедрения энергосберегающих мероприятий и оценки целесообразности их применения. Программные продукты позволяют нам значительно повысить эффективность использования любого вида энергии и применить современные энергосберегающие технологии.

Проектирование и постройка энергосберегающих зданий является одним из наиболее важных вопросов в энергосберегающей политике каждой развитой страны. Проблема создания и эксплуатации современного здания состоит в том, что в большинстве случаев его создатели не учитывают идею энергосбережения. Главными направлениями повышения энергосбережения зданий и сооружений являются внедрение принципиально новых типов конструкций зданий, а также использование эффективных теплоизоляционных материалов. Речь идет как о современных методах строительства новых зданий жилого и производственного назначения, так и о комплексном переустройстве уже существующих зданий.

Исследование показало, что выбор программного комплекса для оценки энергоэффективности зданий зависит от поставленных задач. EnergyPlus является наиболее мощным инструментом для детального моделирования, но требует высокой квалификации пользователя; eQuest удобен для быстрого анализа, но имеет ограниченные возможности; OpenStudio предоставля-

ет компромисс между точностью расчетов и удобством использования.

Список литературы

1. Жеребцова О.В. Энергомоделирование как инструмент экономической оценки энергоэффективности зданий // Журнал правовых и экономических исследований. 2021. № 3. С. 181–186. DOI: 10.26163/GIEF.2021.36.62.028.
2. Шелехов И.Ю., Гудков А.И., Пнева М.А. Применение энергосберегающих мероприятий в жилых многоквартирных домах // Тенденции развития науки и образования. 2021. № 71–2. С. 136–139. DOI: 10.18411/jj-03-2021-70.
3. Shelekhov I., Dorofeeva N., Shelekhov M. Application of energy-efficient methods in heating systems of industrial and public buildings // MATEC Web of Conferences: electronic edition, (Irkutsk, 26–27 апреля 2018 г.). Vol. 212. Irkutsk: EDP Sciences. 2018. P. 02003. DOI: 10.1051/mateconf/201821202003.
4. Журкин М.В., Шевченко Н.Ю. Методы повышения энергоэффективности систем электроснабжения промышленных предприятий // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии (ПЭЭЭ-2017): V Всероссийская научно-техническая конференция (к 50-летию юбилею кафедры «Электроснабжение и электротехника» Института энергетики и электротехники) (Тольятти, 01–02 ноября 2017 г.). / Министерство образования и науки Российской Федерации, Тольяттинский государственный университет, Институт энергетики и электротехники. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2017. С. 242–246.
5. Власова А.А. Оценка энергоэффективности домов после капитального ремонта с учетом фактических условий на основании статистической модели // Фундаментальные исследования с применением компьютерных технологий в науке, производстве, социальных и экономических процессах: материалы 17-й Национальной молодежной научно-практической конференции (Новочеркасск, 20–23 декабря 2017 г.). Новочеркасск: ООО «Лик», 2017. С. 199–203.
6. Черепов А.Д., Марьясин О.Ю. Разработка цифровой модели на основе системы энергомоделирования Energyplus // Семьдесят четвертая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции: в 2 ч. (Ярославль, 21 апреля 2021 г.). Ч. 2. Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2021. С. 168–172.
7. Шелехов И.Ю., Смирнов Е.И., Иноземцев В.П. Конструкции отопительных приборов на основе физико-математического моделирования // Научное обозрение. 2016. № 1. С. 42–47.
8. Improving Procedural Skill Confidence in Pediatric Residents: A Longitudinal Simulation-Based Workshop Curriculum / L. Maleknia, V. Boshuizen, H. Caputo, R. Shah. MedEdPORTAL. 2023. DOI: 10.15766/mep_2374-8265.11322.
9. Jiang Yu., Ge T., Wang R. Comparison study of a novel solid desiccant heat pump system with EnergyPlus // Building Simulation. 2014. Vol. 7, Is. 5. P. 467–476. DOI: 10.1007/s12273-014-0166-7.

СТАТЬЯ

УДК 004.4

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АДАПТИВНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЗАПРОСОВ В МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЕ
С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УЗЛОВ****Золотухина Д.Ю.***ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж,
e-mail: dar.zolott@gmail.com*

В условиях стремительного роста числа запросов и динамической нагрузки в микросервисных системах особенно важно эффективно распределять поступающие задачи между узлами. Цель представленного исследования – разработать и оценить алгоритм, способный учитывать загруженность центральных процессоров, задержки при передаче данных, количество активных соединений и типы обрабатываемых запросов. Предложенная методика реализована с помощью многопоточности на языке Java с применением контейнеризации в Docker и оркестрации в Kubernetes, что обеспечивает гибкость масштабирования и точное моделирование реальных условий. В ходе экспериментов использовался кластер из десяти виртуальных узлов с различными параметрами аппаратного обеспечения. Рассматривались три категории запросов: требующие больших вычислительных ресурсов, ориентированные на операции ввода-вывода и комбинированные варианты. Для оценки работы алгоритма анализировались метрики, включающие время обработки, пропускную способность, равномерность распределения нагрузки и долю невыполненных запросов. Сбор данных осуществлялся с помощью специализированных средств мониторинга, а их последующий анализ позволил выявить эффективность предлагаемого подхода. Результаты показали, что алгоритм достигает высокой точности распределения при низкой и средней нагрузках, сохраняя удовлетворительный уровень выполнения запросов и при больших объемах данных. Сопоставление с традиционными методами, не учитывающими динамические характеристики узлов, подтвердило преимущество предложенного решения. Полученные выводы указывают на перспективность внедрения алгоритма в высоконагруженные микросервисные системы для повышения стабильности работы и оптимизации использования ресурсов.

Ключевые слова: распределение запросов, микросервисная архитектура, высоконагруженные системы, управление ресурсами, адаптивные алгоритмы, динамическое планирование

**DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ADAPTIVE DISTRIBUTION
OF REQUESTS IN MICROSERVICE ARCHITECTURE TAKING
INTO ACCOUNT DYNAMIC CHARACTERISTICS OF NODES****Zolotukhina D.Yu.***Voronezh State University, Voronezh, e-mail: dar.zolott@gmail.com*

With the rapid growth in the number of requests and dynamic load in microservice systems, it is especially important to efficiently distribute incoming tasks among nodes. The purpose of the presented research is to develop and evaluate an algorithm that is able to take into account CPU utilization, data transfer delays, number of active connections and types of requests being processed. The proposed technique is implemented using multithreading in Java with containerization in Docker and orchestration in Kubernetes, which provides scalability flexibility and accurate simulation of real-world conditions. The experiments utilized a cluster of ten virtual nodes with different hardware parameters. Three categories of queries were considered: computationally demanding, I/O-oriented, and combined variants. To evaluate the performance of the algorithm, metrics including processing time, throughput, load distribution uniformity, and the proportion of outstanding requests were analyzed. Data was collected using specialized monitoring tools, and their subsequent analysis revealed the effectiveness of the proposed approach. The results showed that the algorithm achieves high distribution accuracy at low and medium loads, while maintaining a satisfactory level of query fulfillment at large data volumes. Comparison with traditional methods, which do not take into account the dynamic characteristics of nodes, confirmed the advantage of the proposed solution. The conclusions obtained point to the promising implementation of the algorithm in highly loaded microservice systems to improve the stability of operation and optimize the use of resources.

Keywords: request distribution, microservice architecture, high-load systems, resource management, adaptive algorithms, dynamic scheduling

Введение

В современных высоконагруженных микросервисных системах распределение запросов между узлами определяет стабильность и эффективное использование

ресурсов. Подобные системы обрабатывают миллионы запросов ежедневно, что требует эффективных алгоритмов балансировки. Сложность возрастает при динамически изменяющихся параметрах (загрузка про-

цессора, сетевые задержки, число активных соединений, тип запросов), а ошибки распределения приводят к снижению производительности, увеличению времени отклика и возможным отказам.

Существующие подходы к распределению нагрузки, такие как Round-Robin, Least Connections и Random, имеют определенные ограничения. Например, алгоритм Round-Robin равномерно распределяет запросы, не учитывая текущее состояние узлов [1], что неэффективно при изменяющихся нагрузках. Least Connections минимизирует число соединений, игнорируя тип запроса и сетевые характеристики [2]. Random полагается на случайное распределение, утрачивая эффективность при высокой загрузке [3].

Особую сложность представляет задача интеграции параметров запросов, таких как их тип и ресурсные требования. Например, CPU-интенсивные запросы, требующие значительных вычислительных мощностей, могут перегружать узлы с ограниченными ресурсами. I/O-интенсивные запросы, напротив, нагружают операции ввода-вывода, такие как обращение к диску или базам данных. Смешанные запросы комбинируют обе нагрузки, что требует более сложной оценки доступности ресурсов. Без учета этих параметров нагрузка может распределяться неравномерно, что приводит к снижению пропускной способности системы и увеличению времени обработки запросов.

С ростом числа узлов в кластере увеличивается риск «узких мест», когда одни узлы перегружены, а другие простаивают [4]. Это может быть связано с различиями в сетевых характеристиках, состоянием оперативной памяти или задержками при обработке запросов. Разработка алгоритма, способного учитывать не только статические характеристики узлов, но и их динамические изменения в реальном времени, является актуальной задачей.

Балансировка нагрузки на основе адаптивных алгоритмов, интегрирующих множество метрик в процессе принятия решений, представляет собой перспективное направление для высоконагруженных микросервисных систем. Такие алгоритмы должны обеспечивать равномерное распределение нагрузки, минимизацию времени обработки запросов, эффективное использование ресурсов и низкий процент отказов. При этом важно, чтобы технология была устойчива к изменениям параметров нагрузки и конфигурации системы, обеспечивая стабильность работы даже при экстремальных условиях.

Целью данного исследования является разработка и оценка алгоритма оптимального распределения запросов в микросервисной архитектуре с учётом динамических параметров узлов системы, таких как загрузка процессора, сетевые задержки, количество активных соединений и тип обрабатываемого запроса для повышения эффективности использования ресурсов и равномерности распределения нагрузки, а также на минимизацию времени обработки запросов и процента отказов в условиях различных уровней нагрузки.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования разработан алгоритм оптимального распределения запросов в микросервисной архитектуре, учитывающий динамическое состояние узлов системы. Алгоритм реализован на языке Java версии OpenJDK 17 с использованием современных средств многопоточности и управления ресурсами. Имитация высоконагруженной среды осуществлялась на платформе Kubernetes, что обеспечило гибкость масштабирования узлов и точное моделирование нагрузок [5]. Для изоляции и стандартизации окружения использовалась контейнеризация на основе Docker [6].

Эксперименты проводились в кластере, состоящем из 10 виртуальных узлов, равномерно распределённых по характеристикам: процессор Intel Core i7-12700K (12 ядер, 20 потоков, 3,6 GHz), оперативная память 16 GB DDR4, NVMe SSD ёмкостью 500 GB, гигабитное сетевое соединение с искусственными задержками для эмуляции реальных условий. Система генерировала потоки запросов трех типов:

1. CPU-интенсивные запросы – задачи, требующие значительных вычислительных ресурсов, такие как сложные математические вычисления и обработка больших массивов данных.

2. I/O-интенсивные запросы – задачи, где основная нагрузка связана с операциями ввода-вывода. Они были представлены чтением и записью данных в базу и обращением к файловой системе.

3. Смешанные запросы – запросы, комбинирующие интенсивные вычисления и операции ввода-вывода, такие как обработка данных с последующей записью в базу данных.

Характеристика нагрузки варьировалась от малых запросов (время обработки менее 1 с) до больших (свыше 5 с). Для воспроизводимости и управления параметрами нагрузки использовалась библиотека JMH (Java Microbenchmark Harness) [7].

Архитектура программы представлена на рис. 1.

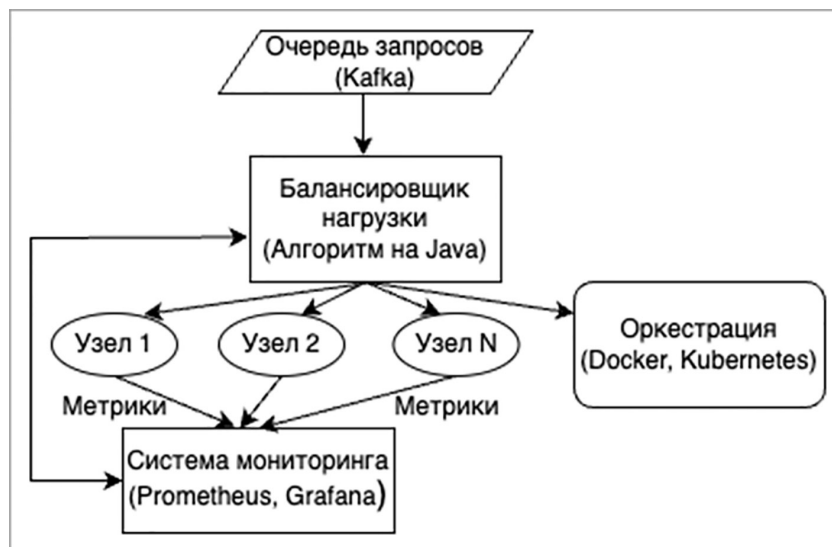


Рис. 1. Схема архитектуры программы
Источник: составлено авторами

Основой работы алгоритма является взвешенная функция, определяющая оптимальный узел для обработки запроса. Функция (1) рассчитывается по следующей формуле:

$$W_i = \alpha \cdot L_i + \beta \cdot T_r + \gamma \cdot D_i + \delta \cdot N_i,$$

где W_i – общий вес узла i , L_i – загрузка процессора узла, T_r – тип запроса, D_i – сетевые задержки узла, N_i – число активных соединений. Коэффициенты $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ определяют весовые приоритеты каждого параметра, они были выбраны таким образом, чтобы обеспечить баланс между производительностью и стабильностью системы. Значения коэффициентов эмпирически определены на этапе предварительного тестирования: $\alpha = 0,4$, $\beta = 0,2$, $\gamma = 0,3$, $\delta = 0,1$. Такой выбор обусловлен необходимостью учитывать загрузку процессора и сетевые задержки в первую очередь, при этом уделяя меньшее внимание числу соединений и типу запроса.

Алгоритм распределения запросов включает следующие этапы:

1. Инициализация: на первом этапе алгоритм собирает данные о текущем состоянии всех узлов системы. Если для узла доступна информация о загрузке процессора L_i , объеме доступной памяти, сетевых задержках D_i и количестве активных соединений N_i , она фиксируется в таблице состояния. На основе собранных данных вычисляются начальные метрики производительности узлов. Если хотя бы один узел оказывается недоступным или перегруженным, он временно исключается из маршрутизации запросов до восстановления доступности.

2. Получение запросов: запросы поступают в очередь обработки. Если запрос фиксируется в очереди, для него определяются следующие характеристики: тип запроса (T_r), предполагаемое время выполнения и требования к оперативной памяти. Если один из параметров выходит за пределы допустимых значений, запрос помечается как проблемный. Очередь запросов сортируется по их приоритету, чтобы более критичные запросы обрабатывались в первую очередь.

3. Анализ узлов: алгоритм анализирует состояние всех доступных узлов для текущего запроса. Если узел находится в состоянии, допускающем обработку запроса, для него вычисляется значение W_i взвешенной функции (1). Узлы с наименьшим значением W_i добавляются в список кандидатов для обработки запроса. Если вес всех узлов превышает пороговое значение, запрос остается в очереди.

4. Распределение запросов: алгоритм выбирает узел с минимальным значением функции W_i для обработки текущего запроса. Если ресурсы выбранного узла превышают порог загрузки, запрос передается следующему узлу из списка кандидатов. В случае успешного распределения ресурсов запрос отправляется на обработку. Если ресурсы недостаточны, алгоритм либо возвращает запрос в очередь, либо помечает его как проблемный, в зависимости от текущего состояния системы.

5. Обновление метрик: каждые 5 с алгоритм пересчитывает метрики производительности для всех узлов. Если узел временно недоступен или перегружен, он ис-

ключается из списка доступных для обработки запросов. Если узел восстанавливает свою доступность, он автоматически включается обратно в список доступных для маршрутизации.

6. Обработка отказов: если запрос не может быть обработан из-за перегрузки узлов или их отказа, он перенаправляется на резервный узел. Если резервный узел также перегружен, запрос остается в очереди для повторной обработки. Узлы, не способные обрабатывать запросы из-за отказов, проверяются на предмет восстановления. Как только доступность узла подтверждена, он снова включается в процесс маршрутизации.

Метрики измерения эффективности включали:

- среднюю задержку обработки запросов (мс);
- пропускную способность (количество запросов в секунду);
- уровень использования ресурсов (процент загрузки CPU и памяти);
- процент отказов (доля запросов, не обработанных в срок);
- равномерность распределения нагрузки между узлами.

Эксперименты выполнялись при нагрузках 100, 1000 и 5000 запросов в секунду. Каждый сценарий продолжался 60 мин с интервалами записи данных в 5 мин. Сбор данных осуществлялся с использованием Prometheus [8] и Grafana [9], что обеспечивало точное измерение метрик в реальном времени. Данные анализировались с помощью Apache Spark [10], что позволило оценить как общую производительность алгоритма, так и его поведение в условиях изменения нагрузки.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты экспериментов представлены в таблице, где отражены основные метрики работы разработанного алгоритма в условиях низкой, средней и высокой нагрузки. Анализ этих данных позволяет выделить ключевые закономерности, оценить

производительность алгоритма и сравнить его эффективность с другими подходами.

На этапе низкой нагрузки алгоритм продемонстрировал практически идеальные результаты. Более 99,8% запросов были успешно завершены в срок, что свидетельствует о высокой стабильности и точности распределения нагрузки. Средняя задержка обработки запросов составила всего 12 мс, что соответствует минимально возможным значениям для такой системы. Пропускная способность в этих условиях достигла 98 запросов в секунду, что, хотя и не является максимальным значением, полностью удовлетворяет требованиям низкой нагрузки. Средняя загрузка процессора на узлах составила всего 40%, а равномерность распределения нагрузки между узлами достигла 0,92, указывая на сбалансированное использование ресурсов. Показатель отказов составил 0,2%, что можно считать практически нулевым уровнем. Эти результаты подтверждают, что алгоритм способен эффективно справляться с распределением запросов в условиях минимального уровня загруженности.

С увеличением интенсивности запросов до среднего уровня наблюдалось небольшое снижение эффективности алгоритма. Процент завершенных задач уменьшился до 97,5%, что на 2,3% ниже по сравнению с низкой нагрузкой. Средняя задержка обработки запросов возросла до 35 мс, что в 2,9 раза превышает показатель при низкой нагрузке. Пропускная способность, напротив, резко увеличилась до 870 запросов в секунду, демонстрируя способность алгоритма к адаптации в условиях увеличенной нагрузки. Средняя загрузка процессора составила 68%, что на 70% больше по сравнению с низкой нагрузкой, но остается в пределах допустимых значений для системы. Доля отказов выросла до 2,5%, что связано с увеличением конкуренции за ресурсы. Равномерность распределения нагрузки немного снизилась, до 0,85, что указывает на тенденцию к перераспределению ресурсов в пользу узлов с меньшей загруженностью.

Результаты работы алгоритма в условиях различных нагрузок

Тип нагрузки	% завер- шенных задач	Средняя задержка (мс)	Пропускная способность (запросов/с)	Средняя загрузка CPU (%)	Процент отказов (%)	Равномерность распределения
Низкая нагрузка	99,8	12	98	40	0,2	0,92
Средняя нагрузка	97,5	35	870	68	2,5	0,85
Высокая нагрузка	94,2	95	4300	85	5,8	0,78

Источник: составлено авторами.

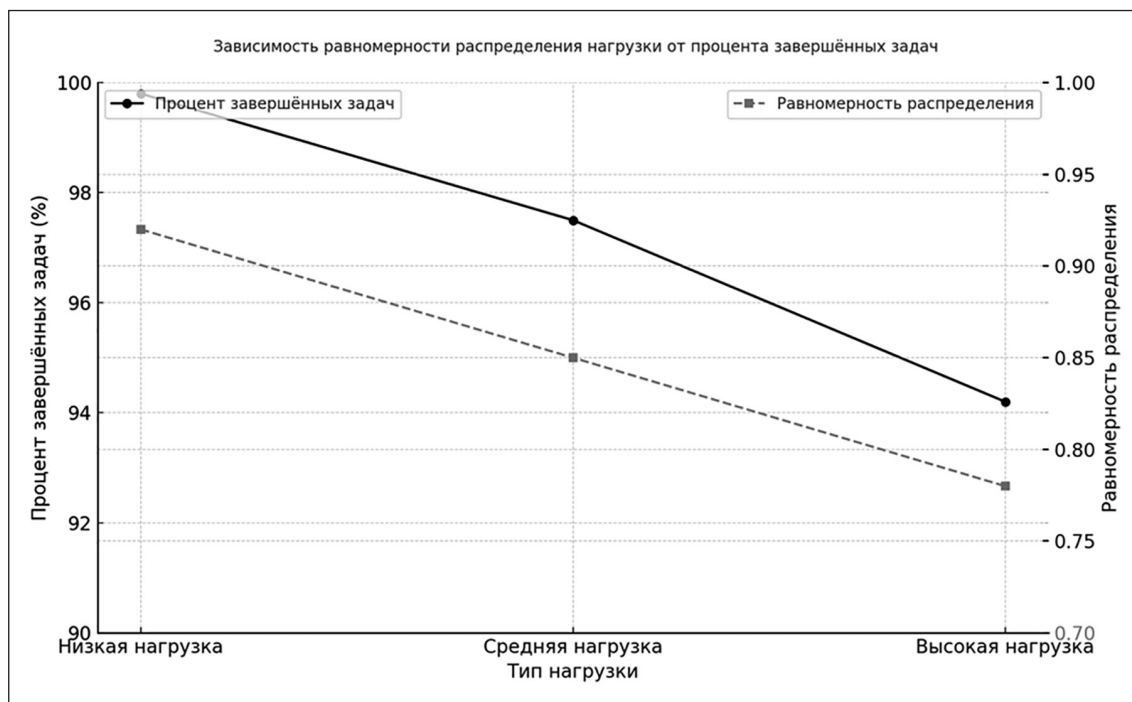


Рис. 2. Зависимость равномерности распределения нагрузки от процента завершённых задач
Источник: составлено авторами

В условиях высокой нагрузки алгоритм сохранил удовлетворительные показатели, несмотря на значительное увеличение числа запросов. Доля завершённых в срок запросов составила 94,2 %, что на 5,6 % ниже по сравнению с низкой нагрузкой, но остается высоким результатом для системы с экстремальными ограничениями. Средняя задержка выросла до 95 мс, что более чем в 2,7 раза превышает показатель средней нагрузки. Однако пропускная способность достигла рекордного значения – 4300 запросов в секунду, демонстрируя высокий уровень масштабируемости алгоритма. Средняя загрузка процессора увеличилась до 85 %, а доля отказов возросла до 5,8 %, что связано с исчерпанием доступных ресурсов при экстремальной нагрузке. Равномерность распределения снизилась до 0,78, что отражает сложность поддержания баланса ресурсов при таких условиях.

На рис. 2 представлен график зависимости равномерности распределения нагрузки от процента завершённых задач. График демонстрирует, что при низкой нагрузке алгоритм достигает высокого уровня равномерности (0,92), поддерживая практически полное выполнение задач. С увеличением нагрузки равномерность снижается на 7,6 и 15,2 % при средней и высокой нагрузках соответственно, что коррелирует с ростом процента отказов.

График подтверждает адаптивные возможности алгоритма: несмотря на снижение равномерности распределения, система сохраняет высокий уровень выполнения задач в условиях изменения нагрузки.

Сравнение с существующими алгоритмами управления запросами подчеркивает уникальность предложенного подхода. Round-Robin равномерно распределяет запросы между узлами, но не учитывает текущие параметры узлов, такие как загрузка CPU и сетевые задержки. Least Connections минимизирует активные соединения, но не адаптируется к типу запросов и не анализирует их сетевые характеристики. Random полностью игнорирует состояние системы, что делает его малоприменимым для высоконагруженных сред. Разработанный алгоритм демонстрирует преимущества, включая динамическую адаптацию и учет комплексных метрик узлов, что делает его эффективным и универсальным в условиях высоконагруженных систем.

Выводы

1. Проведенное исследование подтвердило эффективность разработанного алгоритма оптимального распределения запросов в микросервисной архитектуре для высоконагруженных систем. Алгоритм продемонстрировал способность адаптироваться к динамическим изменениям состоя-

ния узлов и нагрузки, обеспечивая высокую производительность даже в условиях ограниченных ресурсов.

2. Результаты экспериментов показали, что алгоритм поддерживает выполнение более 94% запросов в срок даже при высокой нагрузке, минимизирует среднюю задержку и обеспечивает равномерное распределение нагрузки. Применение взвешенной функции, учитывающей загрузку процессора, сетевые задержки, тип запросов и число соединений, позволило эффективно перераспределять запросы, адаптируясь к изменениям в реальном времени. По сравнению с традиционными подходами, такими как Round-Robin и Least Connections, предложенный алгоритм демонстрирует преимущество за счет учета состояния узлов и характеристик запросов.

3. Несмотря на высокую производительность, выявлено снижение равномерности распределения нагрузки при экстремальных условиях. Это подчеркивает необходимость дальнейшей оптимизации алгоритма, включая улучшение механизмов обновления метрик и внедрение предиктивных методов для более точного управления запросами.

4. Результаты исследования подтверждают прикладную значимость алгоритма для высоконагруженных систем, таких как облачные платформы, веб-приложения и распределенные вычислительные системы. Алгоритм обеспечивает баланс между производительностью, равномерностью

распределения и стабильностью работы, что делает его перспективным инструментом для современных микросервисных архитектур.

Список литературы

1. Шуляк А.В. Сравнительный анализ алгоритмов балансировки нагрузки в среде облачных вычислений // Научный журнал. 2021. № 6 (61). С. 6–11.
2. Власова В.А., Олейникова А.А. Сравнение методов балансировки нагрузки в беспроводных сенсорных сетях // Радиоэлектроника и информатика. 2018. № 3. С. 40–45. DOI: 10.30837/1563-0064.3.2018.162780.
3. Mitzenmacher M. On the Analysis of Randomized Load Balancing Schemes // Theory of Computing Systems. 1999. № 32. P. 361–386. DOI: 10.1007/s002240000122.
4. Цветков В.Я., Алпатов А.Н. Проблемы распределенных систем // Перспективы науки и образования. 2014. № 6 (12). С. 31–36.
5. Липатова С.Е., Федоров В.О., Белов Ю.С. Kubernetes как элемент человеко-компьютерного взаимодействия // E-Scio. 2023. № 1 (76). С. 49–55.
6. Чиганов Д.Р. Docker: ключ к контейнеризации и масштабируемости // Вестник науки. 2023. № 7 (64). С. 270–272.
7. Laaber C., Leitner P. An evaluation of open-source software microbenchmark suites continuous performance assessment // Proceedings of the 15th International Conference on Mining Software Repositories. 2018. P. 119–130. DOI: 10.1145/3196398.3196407.
8. Маратканов А.С., Суханов А.А., Воробьева А.А. Средства анализа и визуализации метрик работы приложения // International scientific review. 2019. № LIX. С. 41–43.
9. Средство визуализации данных Grafana. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/grafana/grafana> (дата обращения: 10.01.2025).
10. Salloum S., Dautov R., Chen X. Big data analytics on Apache Spark // Int J Data Sci Anal. 2016. № 1. P. 145–164. DOI: 10.1007/s41060-016-0027-9.