

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Институт физики и математики

МОЛОДЁЖНАЯ ПЕТЕРБУРГСКАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ-ПЕДАГОГОВ

Сборник материалов научной конференции

3–5 февраля 2026 года



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург

2026

УДК 37+51+53+62

ББК 22:74

М75

Молодёжная петербургская школа-конференция инженеров-педагогов : сборник материалов научной конференции, 3–5 февраля 2026 г. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2026. – 148 с.

Сборник содержит материалы Молодёжной петербургской школы-конференции инженеров-педагогов. Основные направления работы конференции: математическое моделирование в инженерных исследованиях, искусственные нейронные сети и их приложения, анализ сигналов для решения инженерных и естественнонаучных задач, физический эксперимент в приложении к инженерным задачам, электроника и схемотехника в инженерных исследованиях, компьютерное моделирование в фундаментальных и инженерных исследованиях, методика преподавания физико-математических дисциплин в школе и вузе, олимпиадное движение по физике и математике в школе и вузе.

Сборник предназначен для научных сотрудников, преподавателей вузов, аспирантов и студентов в области инженерных и педагогических знаний.

Все статьи сборника публикуются на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0).

Редакционная коллегия:

*П. В. Захаров, А. Н. Ипатов, И. В. Сысоев,
М. В. Сысоева (ответственный редактор), А. В. Козловский,
Д. А. Тархов, А. В. Шатров, Н. Ю. Быков, Н. К. Краснова, Н. А. Хохлов,
М. Р. Бортковская, Н. А. Леонова, О. Н. Макарова*

Печатается по решению

Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISSN 3033-6732

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2026

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ СМЕШАННЫХ ПЕРОВСКИТОВ ВИДА $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$ И $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{I})_3$

К.Е. Анциферова¹✉, А.С. Конаныхина², Р.Г. Полозков^{1,3}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Университет ИТМО

³СПбАУ РАН им. Ж.И. Алферова

✉ antsiferova.33@gmail.com

Введение. Важной научной проблемой, на решение которой направлены усилия исследователей по всему миру в течение последних десяти лет, является увеличение фотостабильности миниатюрных оптически активных элементов – мультикатионных смешанно-галогенидных перовскитных нано- и микрокристаллов, которые впоследствии могут послужить базовыми компонентами при разработке фотонных чипов. Галогенидные перовскиты APbX_3 объединяют возможность управления их фотофизическими свойствами путем синтетических модификаций компонентов системы (атомов галогенов), преимущества твердотельных полупроводниковых материалов, и простые масштабируемые технологии изготовления. Дополнительным преимуществом данных материалов является их достаточно высокий показатель преломления ($n > 2$), необходимый для использования перовскитов для задач нанофотоники, а именно изготовления из них одиночных резонансных наночастиц, которые впоследствии могут послужить элементарными компонентами фотонного чипа.

Одним из перспективных направлений исследований является разработка оригинального метода коллоидного синтеза новых мультикатионных смешанно-галогенидных перовскитных нитевидных нанокристаллов (ННК) и пластинчатых микрокристаллов (ПМК) типа $\text{A}_{1-x}\text{A}'_x\text{B}_{1-y}\text{B}'_y\text{X}_3$ ($\text{A} - \text{Cs}^+$; $\text{A}' - \text{Rb}^+$; $\text{B} - \text{Pb}^{2+}$; $\text{B}' - \text{Cd}^{2+}, \text{Zn}^{2+}$; $\text{X} - (\text{Cl}, \text{Br}), (\text{Br}, \text{I})$), демонстрирующих излучение в широком диапазоне длин волн 400-700 нм, исследование их структурных и оптических свойств, в том числе фотостабильности лазерной генерации. Для решения поставленной задачи проекта требуется разработать метод синтеза ННК и ПМК перовскитов в горячем растворе. Для этого необходимо установить закономерности формирования нано- и микроструктур перовскитов, их морфологию, кристаллическую структуру и химический состав и исследовать их электронные свойства. Поэтому, актуальной представляется задача теоретического исследования электронной структуры перовскитов вида $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$ и $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{I})_3$, которое включало бы комплекс расчетов, состоящий из полной самосогласованной пространственной оптимизации геометрии элементарной ячейки кристаллической структуры и самосогласованного расчета электронной структуры для определения плотности электронных состояний и зонной структуры материала.

Модель. Для самосогласованной оптимизации пространственной структуры системы, расчета электронной структуры, плотности электронных состояний и зонной структуры применялась теория функционала плотности с использованием хорошо зарекомендовавшего себя для этих структур функционала Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) в рамках обобщенной градиентной аппроксимации (GGA) без учета поправки на спин-орбитальное взаимодействие (SOC) на данном этапе расчетов [1]. Для расчетов использовался пакет квантово-механического моделирования Quantum ESPRESSO [2]. Данный пакет предназначен для расчета периодических структур, поэтому для описания одноэлектронных волновых функций здесь используется естественный для такой ситуации базис плоских волн. Значение граничной кинетической энергии плоских волн, использованных в расчете в качестве базиса, достаточной для полного разложения самосогласованного решения, было определено в результате цикла расчетов с проверкой на сходимость и из соображений разумной достаточности было выбрано равным 680 эВ (50 Ry). В расчетах использовалась сетка в k -пространстве, полученная с

помощью метода специальных точек Монкхроста-Пака [3] с плотностью от 1 до 11 точек в $\text{\AA}^{-1}$. Для каждой структуры необходимо было провести несколько расчетов: во-первых, провести оптимизацию пространственной структуры элементарной ячейки, во-вторых, самосогласованный расчет электронной структуры с энергией отсечки порядка 500-800 эВ, в-третьих, дополнительные расчеты для определения плотности электронных состояний и построения зонной структуры.

Результаты. На первом этапе реализации проекта была проведена настройка квантово-механического моделирования геометрии элементарной ячейки кристаллической структуры и самосогласованного расчета зонной структуры на примере «чистых» перовскитов CsPbBr_3 и CsPbCl_3 путем сравнения с другими теоретическими исследованиями. Так как в дальнейшем основное внимание планировалось уделить смешанным перовскитам, то есть структурам с нефиксированной геометрией, то было принято решение проверить, насколько случаи полной оптимизации геометрии с возможностью изменения параметров элементарной ячейки отличаются с точки зрения параметров электронной структуры от случаев с фиксированной геометрией (кубической, орторомбической и так далее). Текущие расчеты выполнены для «чистых» перовскитов CsPbBr_3 и CsPbCl_3 , а также для смешанных перовскитов типа $\text{CsPbCl}_{1.5}\text{Br}_{1.5}$.

Для определения равновесных положений атомов выполнялась процедура пространственной оптимизации параметров элементарной ячейки без использования фиксированной геометрии с использованием в качестве стартовых значений экспериментальных значений параметров решеток из работы [4] (*эксп* в таблице 1).

Таблица 1. Сравнение результатов текущих расчетов перовскитов вида $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$ (выделено жирным) с предыдущими результатами. Здесь a , b , c – параметры элементарной ячейки, E_g – ширина запрещенной зоны в эВ.

	$a(\text{\AA})$	$b(\text{\AA})$	$c(\text{\AA})$	E_g (эВ), теор/эксп
CsPbBr_3 [4] (<i>эксп</i>)	8.2145	8.2068	11.6362	2.32/2.45
CsPbBr_3 (<i>опт</i>)	8.36	8.13	11.46	2.21
$\text{CsPbCl}_{1.501}\text{Br}_{1.499}$ [4] (<i>эксп</i>)	8.0613	8.0580	11.0709	2.73
$\text{CsPbCl}_{1.5}\text{Br}_{1.5}$ [4] (<i>теор</i>)	8.0640	8.0606	11.4111	2.47
$\text{CsPbCl}_{1.5}\text{Br}_{1.5}$ (<i>опт</i>)	7.81	7.59	10.61	2.35
CsPbCl_3 [4] (<i>эксп</i>)	7.9136	7.9145	11.1861	2.72/3.1
CsPbCl_3 (<i>опт</i>)	7.9136	7.9136	11.1861	2.70

Обнаружено, что в результате полной оптимизации геометрии перовскиты CsPbBr_3 сохраняют тенденцию к образованию ячейки орторомбического типа, а для перовскита CsPbCl_3 скорее имеется тенденция образованию в результате оптимизации геометрии тетрагонального типа. В таблице 1 представлено сравнение результатов текущих расчетов (выделено жирным) параметров элементарной ячейки с предыдущими результатами.

После оптимизации выполнялся самосогласованный расчет электронной структуры для определения значения ширины запрещенной зоны (E_g) и плотности состояний. Были получены следующие значения E_g : **2.21 эВ, 2.35 эВ и 2.70 эВ** для структур CsPbBr_3 , $\text{CsPbCl}_{1.5}\text{Br}_{1.5}$ и CsPbCl_3 , соответственно. Стоит отметить, что данные значения (*опт* в таблице 1) несколько отличаются от теоретически рассчитанных ранее в работе [4] (*теор* в таблице 1), так как там использовалась фиксированная орторомбическая геометрия ячейки (см. Таблицу 1).

На Рисунке 1 представлены результаты расчетов текущей работы для перовскитов вида $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$: первый ряд – пространственные структуры исследуемых объектов после

оптимизации геометрии, второй ряд – плотности электронных состояний, третий ряд – зонные структуры.

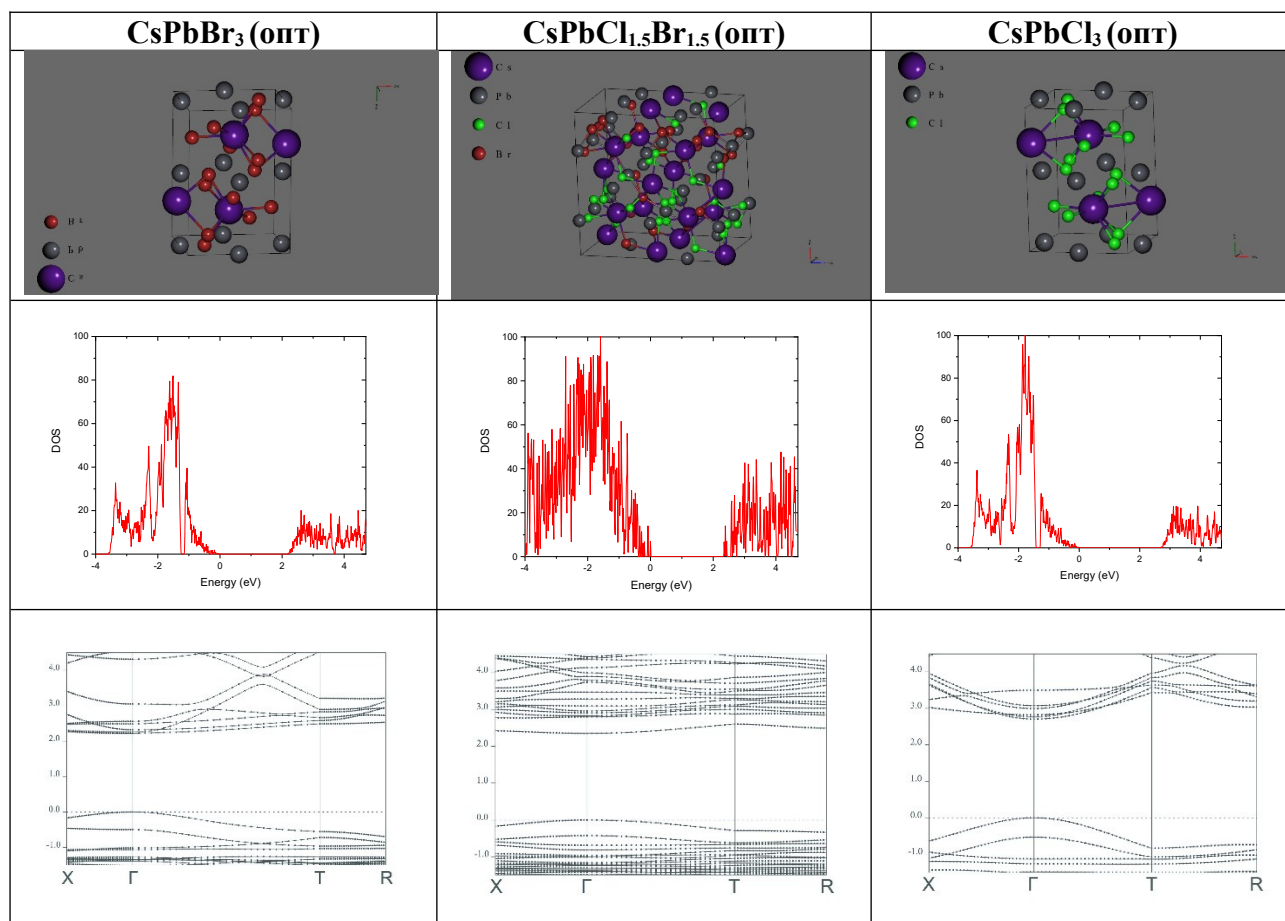


Рис.1. Результаты расчетов параметров перовскитов вида $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$ в текущей работе: первый ряд – пространственные структуры исследуемых объектов после оптимизации геометрии, второй ряд – плотности электронных состояний, третий ряд – зонные структуры.

На втором этапе проекта выполнены комплексы расчетов для перовскитов вида $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{I})_3$, состоящие из полной самосогласованной пространственной оптимизации геометрии элементарной ячейки кристаллической структуры и самосогласованного расчета зонной структуры. На первом этапе были выполнены самосогласованные расчеты электронной структуры на основе заданной пространственной структуры элементарной ячейки в орторомбической фазе γ -фазе (как самой стабильной, на рисунке 2 - γ -ортормб) с использованием параметров решетки, известных из экспериментальных исследований [5]. Далее были проведены расчеты для смешанного перовскита $\text{CsPbI}_{1.5}\text{Cl}_{1.5}$, стартуя с процедуры пространственной оптимизации параметров элементарной ячейки без использования фиксированной геометрии со стартовыми значениями экспериментальных значений параметров решетки, взятых для случая чистого CsPbI_3 [5]. После оптимизации выполнялся самосогласованный расчет электронной структуры для определения значения ширины запрещенной зоны и плотности состояний. Были получены следующие значения E_g : **1.82 эВ** для чистой γ -фазы и **2.14 эВ** для смешанного перовскита, соответственно.

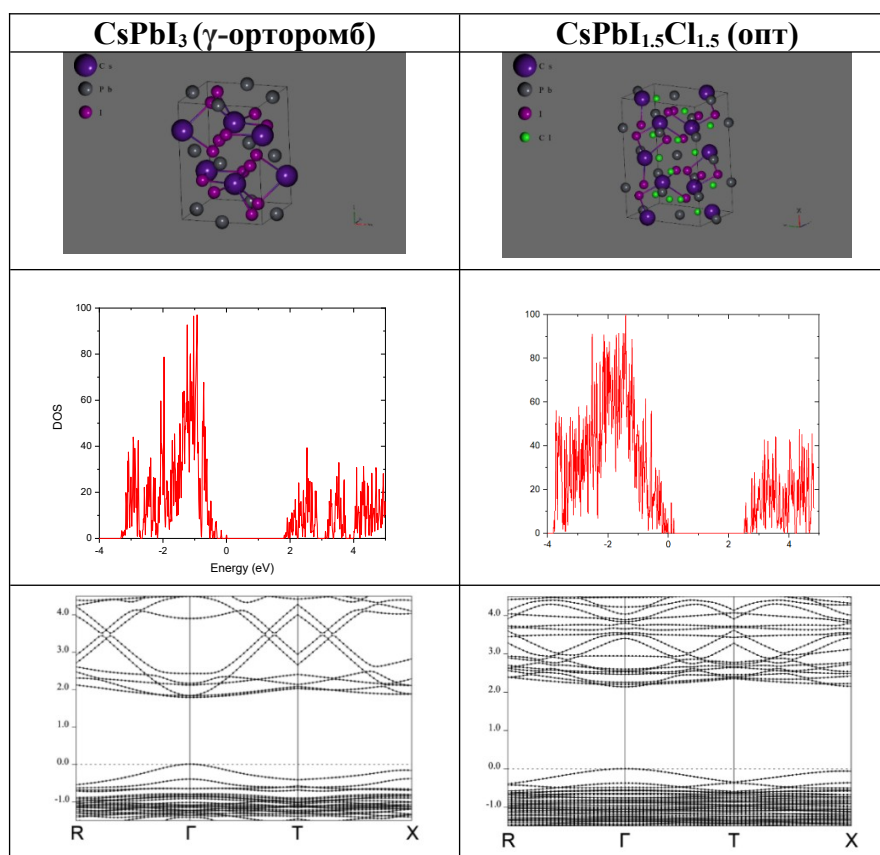


Рис.2. Результаты расчетов параметров перовскитов вида CsPb(Cl,I)₃ в текущей работе: первый ряд – пространственные структуры исследуемых объектов после оптимизации геометрии, второй ряд – плотности электронных состояний, третий ряд – зонные структуры.

Закключение. В данной работе представлены результаты теоретического исследования электронной структуры смешанных перовскитов вида CsPb(Cl,Br)₃ и CsPb(Cl,I)₃, которое включает комплекс расчетов, состоящий из полной самосогласованной пространственной оптимизации геометрии элементарной ячейки кристаллической структуры и самосогласованного расчета электронной структуры для определения плотности электронных состояний и зонной структуры материала.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-73-10072. Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru)

ЛИТЕРАТУРА

1. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple // Physical review letters. 1996. V. 77. N 18. P. 3865. doi: 10.1103/PhysRevLett.77.3865
2. Giannozzi P. et al. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials // Journal of physics: Condensed matter. 2009. V. 21. N 39. P. 395502. doi: 10.1088/0953-8984/21/39/395502
3. Monkhorst H.J., Pack J.D. Special points for Brillouin-zone integrations // Physical review B. 1976. V. 13. N 12. P. 5188. doi: 10.1103/PhysRevB.13.5188
4. Liashenko, T. G. et al. Electronic structure of CsPbBr₃-xCl_x perovskites: synthesis, experimental characterization, and DFT simulations//Physical Chemistry Chemical Physics, 2019, Vol. 21, No. 35, pp. 18930-18938
5. Arthur Marrognier et al Anharmonicity and Disorder in the Black Phases of Cesium Lead Iodide Used for Stable Inorganic Perovskite Solar Cells //ACS Nano, 2018 12 (4), 3477-3486

НАНОАРХИТЕКТОНИКА КАК МЕТОД СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПРИМЕРЕ НАНОСТРУКТУР ОКСИДА ЦИНКА

А.А. Бобков✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,

Санкт-Петербург

✉ aabobkov@etu.ru

Введение. Современные тенденции в развитии материаловедения направлены на создание функциональных наноматериалов с заданными свойствами для решения конкретных задач, будь то энергетика, сенсорные структуры, укрепление конструктивных особенностей и др.

В большинстве случаев, данная задача решается за счет различных методов синтеза, каждый из которых позволяет управлять формой и свойствами синтезированных наноструктур в том или ином объеме. Однако, не каждая задача позволяет использовать оптимальный метод для создания нужной формы нанообъектов. Так, например, использование электрохимического нанесения, который позволяет получать большое разнообразие форм наноматериалов, затруднительно использовать при необходимости создания такой структуры на подложке с предварительно созданными контактными площадками, а также другими элементами. Несмотря на достаточно щадящие условия (низкая температура, не агрессивные электролиты), этого бывает достаточно для нарушения уже созданных элементов на подложке и полному выводу из строя ее функциональных возможностей либо изменения её характеристик.

Поэтому, развитие методов наноархитектоники, сочетающие в себе управление как формой нанообъектов, так и их свойствами, в том числе за счет сочетания различные иерархических уровней создаваемых наноструктур является перспективной для решения задач получения оптимальных функциональных наноматериалов.

Методы и подходы. В данной работе представлены некоторые подходы и методы, позволяющие решать данные проблемы в рамках концепции наноархитектоники, на примере создания высокоэффективных газочувствительных слоев на основе наноструктур оксида цинка [1-2].

Оксид цинка является перспективным материалов для создания различных функциональных наноструктур, прежде всего за счет его свойств (пирозлектрических, пьезоэлектрических, высокой энергии связи экситона), а также большой разнообразии его наноформ (наностержни, наноленты, нанолисты и др), а также простоты их получения.

Так, для создания высокоэффективных газочувствительных структур требуется создания не только высокой удельной поверхности, но и возможность управления её энергетикой, для эффективного протекания каталитических реакций, а также управлением формы создаваемого рисунка чувствительного слоя.

Как было показано в наших работах [3-4], наиболее оптимальной формой для газочувствительных структур является наностержни оксида цинка, за счет большого аспектного соотношения, а также высокой удельной поверхности.

Эффективным методом синтеза, позволяющим получать такие наноструктуры является гидротермальный метод. В частности, используется двухстадийный гидротермальный синтез, на первом этапе которого создается зародышевый слой, а после происходит рост наноструктур. В качестве зародышей использовались коллоидные наночастицы оксида цинка. Для этого использовался спиртовой раствор ацетата цинка 5mM, нагретый до 80°C, в который вводился раствор Na(OH)₂ 5mM. Зародышевые раствор наносился на керамическую подложку

со встречно-штыревыми электродами, для снятия газочувствительного сигнала. В качестве ростового раствора использовался водный раствор ацетата цинка, выступающего в качестве прекурсора оксида цинка и гексаметиленetetрамина, который является буфером, разложение которого в процессе синтеза поддерживает pH раствора постоянным. Для контроля формы и скорости процесса, использовалась добавка в виде поверхностно-активного вещества (цетилтриметиламмония бромид). Кроме того, в раствор можно добавлять ионы различных легирующих добавок посредством солей [5].

В результате, выращенная структура представляет собой «траву» из ограниченных наностержней оксида цинка, ориентированные вверх полярной гранью [001], касающиеся друг с другом боковыми гранями, что обеспечивает контакт между электродами подложки.

Такая структура уже проявляет газочувствительные свойства к парам органических растворителей на уровне сотен и тысяч ppm (parts per million – частиц на миллион), однако, в концепции наноархитектоники она может быть улучшена следующими методами для получения высокоэффективной газочувствительной структуры.

Следующим этапом необходимо настроить оптимальное количество различных энергетических центров на поверхности созданной наноструктуры, для эффективного протекания каталитических реакций разложения молекул газа.

Одним из таких методов является жертвенное легирование, которое также возможно реализовать в процессе гидротермального роста.

Для этого, в ростовой раствор вводится прекурсор йода (может быть использован иодид натрия). Тогда, в процессе роста в кристаллическую решётку наностержней оксида цинка будут встраиваться ионы йода, а при последующем отжиге, из-за летучести последнего, будет уходить из приповерхностных областей, оставляя после себя заряженный дефект, который в последствии влияет на изменения энергетики поверхности. Более подробно данный механизм описан в работе [6].

Еще одним методом, позволяющим эффективно повысить газочувствительных свойств является задание шаблона роста. Наиболее оптимальным рисунком является нить, которая позволяет достичь высокой чувствительности за счет перевода её из хорошо проводящего состояния в низкопроводящее и обратно посредством адсорбции небольшого количества молекул газа.

В качестве метода, позволяющего задавать такие рисунки-шаблоны роста может быть использован метод атомно силовой нанолитографии [7].

Для этого на поверхности подложки заранее создаются области с измененной энергетикой посредством локального скрайбирования атомно силовым зондом. Такое скрайбирование приводит к образованию разорванных связей, являющихся наиболее оптимальными с энергетической точки зрения местом для осаждения зародышевого слоя.

Такая сформированная нить, состоящая из ограниченных наностержней оксида цинка, представляет собой перколяционную проводящую структуру, и тем самым повышает чувствительность к молекулам детектируемого газа.

Результаты. Сочетание всех представленных методов позволяет получать газочувствительные слои с чувствительностью вплоть до ppb (parts per billion – частиц на миллиард) [8], для органических растворителей и не только.

Так, в рамках наноархитектоники, показана возможность создания высокоэффективных функциональных покрытия для решения задач газочувствительности. Однако, все эти методы являются универсальными и эффективными и для решения других задач, будь то энергетика, сенсорика или электроника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобков А.А., Кононова И.Е., Мошников В.А. Материаловедение микро- и наносистем. иерархические структуры // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017.
2. Бобков А.А., Радайкин Д.Г., Мошников В.А. Наноархитектоника пористых иерархических структур для фотокатализа и сенсорики // В сборнике: Химическая термодинамика и кинетика. Сборник научных трудов XII Международной научной конференции. Великий Новгород, 2022. С. 69-70..
3. Абрашова Е.В. и др. Наночастицы, наносистемы и их применение. каталитические наносистемы // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2022.
4. Александрова О.А. и др. Наноструктурные оксидные материалы в современной микро-, нано- и оптоэлектронике // СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017.
5. Рябко А.А. и др. Эффект интерфейсного легирования системы наностержней оксида цинка // Физика твердого тела. 2022. Т. 64. № 11. С. 1681-1689.
6. Шамахов З.В. и др. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия поверхностных слоев ограниченных наностержней оксида цинка // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2021. Т. 26. № 6. С. 481-490.
7. Аверин И.А. и др. Способ получения нанолитографических рисунков с кристаллической структурой со сверхразвитой поверхностью // Патент на изобретение RU 2655651 C1, 29.05.2018. Заявка № 2017124723 от 12.07.2017.
8. Bobkov A.A. et al.. The multisensor array based on grown-on-chip zinc oxide nanorod network for selective discrimination of alcohol vapors at sub-ppm range // Sensors. 2019. Т. 19. № 19. С. 4265.

МЕТОД КОНТУРНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ ЛАПЛАСА В РЕШЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА С ЛИНЕЙНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ И ЕГО ПРИЛОЖЕНИЯ

М. В. Варенникова✉, А. В. Баландюк, С. П. Преображенский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ varennikova.mv@gmail.com

Введение. В разных областях физики часто встречаются дифференциальные уравнения второго порядка. В большинстве случаев они описывают распространение или движение чего-либо, например, электромагнитных, акустических или других волн, колебательные процессы и прочее. В данной работе рассматривается один из методов решения линейных дифференциальных уравнений второго порядка с линейными коэффициентами - метод контурного интегрирования Лапласа.

Модель. В данной работе рассматривается линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка с линейными коэффициентами вида (1)

$$(a_0z + a_1)\omega''(z) + (b_0z + b_1)\omega'(z) + (c_0z + c_1)\omega(z) = 0, \quad (1)$$

где $a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1$ — постоянные числа.

Решение данного уравнения будем искать в следующем виде:

$$\omega(z) = \int_C e^{zt} \cdot \nu(t) dt, \quad (2)$$

где C - контур интегрирования, который не зависит от z , $\nu(t)$ - неизвестная функция.

Выбранную форму решения (2) подставляем в исходное уравнение с использованием следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \omega'(z) &= \int_C e^{zt} \cdot t \cdot \nu(t) dt, \\ \omega''(z) &= \int_C e^{zt} \cdot t^2 \cdot \nu(t) dt, \quad z\omega(z) = \nu(t) \cdot e^{zt} \Big|_C - \int_C e^{zt} \nu'(t) dt, \\ z\omega'(z) &= t \cdot \nu(t) \cdot e^{zt} \Big|_C - \int_C e^{zt} (t \cdot \nu(t))' dt, \\ z\omega''(z) &= t^2 \cdot \nu(t) \cdot e^{zt} \Big|_C - \int_C e^{zt} (t^2 \cdot \nu(t))' dt \end{aligned}$$

При этом мы можем выбрать контур C и $\nu(t)$ так, чтобы внеинтегральная подстановка обращалась в 0:

$$(a_0t^2 + b_0t + c_0) \cdot \nu(t) \cdot e^{zt} \Big|_C = 0$$

Тогда уравнение (1) принимает такой вид:

$$\int_C e^{zt} \left[(a_1t^2 + b_1t + c_1)\nu(t) - a_0(t^2 \cdot \nu(t))' - b_0(t \cdot \nu(t))' - c_0\nu'(t) \right] dt = 0$$

Будем теперь искать такую функцию $\nu(t)$, чтобы подынтегральная функция обращалась в 0:

$$\frac{d}{dt}(a_0 t^2 \nu(t) + b_0 t \nu(t) + c_0 \nu(t)) - (a_1 t^2 + b_1 t + c_1) \cdot \nu(t) = 0$$

Такое уравнение допускает разделение переменных:

$$\frac{\nu'(t)}{\nu(t)} = \frac{a_1 t^2 + (b_1 - 2a_0)t + (c_1 - b_0)}{a_0 t^2 + b_0 t + c_0} \quad (3)$$

В решении уравнения (3) возможны два варианта. Если предположить, что $a_0 \neq 0$, то с помощью линейной замены переменных $a_0 z + a_1 = z_1$ в исходном уравнении (1) получаем новое уравнение с коэффициентами $a_0 = 1$, $a_1 = 0$. Пусть в этом случае уравнение $t^2 + b_0 t + c_0 = 0$ имеет различные корни t_1 и t_2 . Тогда правая часть уравнения (3) раскладывается на простые множители.

$$\frac{\nu'(t)}{\nu(t)} = \frac{p-1}{t-t_1} + \frac{q-1}{t-t_2}, \quad (4)$$

где $p = \frac{(b_1-2)t_1+(c_1-b_0)+t_1-t_2}{t_1-t_2}$ и $q = \frac{(b_1-2)t_2+(c_1-b_0)+t_2-t_1}{t_2-t_1}$. Интегрируем уравнение (4) и получаем $\nu(t)$, затем и $\omega(z)$:

$$\nu(t) = A(t-t_1)^{p-1}(t-t_2)^{q-1} \Rightarrow \omega(z) = A \int_C (t-t_1)^{p-1}(t-t_2)^{q-1} e^{zt} dt$$

При этом должно выполняться условие

$$(t-t_1)^{p-1}(t-t_2)^{q-1} e^{zt} \Big|_C = 0$$

Другой случай получаем, если $a_0 = 0$, при этом будем считать $a_1 = 1$ и $b_0 \neq 0$. Тогда уравнение будет следующим:

$$\frac{\nu'(t)}{\nu(t)} = At + B + \frac{p}{t + c_0/b_0} \quad (5)$$

где $A = \frac{1}{b_0}$, $B = \frac{b_1}{b_0} - \frac{c_0}{b_0^2}$, $p = \frac{c_0^2}{b_0^3} - \frac{b_1 c_0}{b_0^2} + \frac{c_1}{b_0} - 1$.

Интегрируем получившееся уравнение (5) и получаем соотношения для $\nu(t)$ и $\omega(z)$:

$$\nu(t) = c \cdot \exp\left(\frac{1}{2}At^2 + Bt + zt\right) \cdot \left(t + \frac{c_0}{b_0}\right)^p \Rightarrow \omega(z) = c \int_C \left(t + \frac{c_0}{b_0}\right)^p \cdot \exp\left(\frac{1}{2}At^2 + Bt + zt\right) dt$$

Для окончательного решения требуется указать контур C . Линейно независимые решения строятся с помощью двух разных контуров.

Результаты. Так же в работе рассматриваются частные случаи уравнения (1). Один из них - уравнение Эйри:

$$\omega''(z) - z \cdot \omega(z) = 0$$

С использованием метода контурного интегрирования форма его решения выглядит так: $\omega(z) = \int_C \exp\left(tz - \frac{t^3}{3}\right) dt$. После чего подбираются такие бесконечные незамкнутые контуры C , чтобы

внеинтегральная подстановка $\exp(tz - \frac{t^3}{3}) \Big|_C$ обращалась в 0.

Еще один пример - уравнение Бесселя:

$$z^2 \omega''(z) + z \omega'(z) + (z^2 - n^2) \omega(z) = 0 \quad (6)$$

С помощью замены $\omega(z) = z^n \cdot u(z)$ уравнение (6) сводится к $zu''(z) + (2n+1)u'(z) + zu(z) = 0$. После чего получается следующая форма решения: $\omega(z) = z^n \int_C (t^2 + 1)^{n-\frac{1}{2}} e^{zt} dt$, подбираются подходящие контуры и вместе с ними итоговые линейно независимые решения.

Помимо частных примеров исходного уравнения (1), в работе рассматриваются разностные уравнения второго порядка с линейными коэффициентами:

$$(a_0(n+2) + a_1)y_{n+2} + (b_0(n+1) + b_1)y_{n+1} + (c_0n + c_1)y_n = 0$$

Вводится производящая функция последовательности $\{y_n\}$: $\omega(z) = \sum_{n=0}^{\infty} y_n z^n$, и если ряд сходится в круге $|z| < r$, то члены последовательности выражаются через производящую функцию как

$$y_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=\rho} z^{-n-1} \omega(z) dz, \quad (7)$$

где $0 < \rho < r$. После этого для производящей функции выводится дифференциальное уравнение, оно получается линейным неоднородным первого порядка. Далее оно решается и получается другое представление для производящей функции:

$$\omega(z) = \int_0^z \frac{\omega_0(t)}{\omega_0(z)} \frac{(a_1 + b_1 t)y_0 + (a_0 + a_1)ty_1}{t(c_0 t^2 + b_0 t + a_0)} dt, \quad (8)$$

при этом $\omega_0(z) = z^{r-1} (1 - \frac{z}{z_1})^{p-1} (1 - \frac{z}{z_2})^{q-1}$, z_1, z_2 - корни уравнения $c_0 z^2 + b_0 z + a_0 = 0$, $r = 1 - \frac{a_1}{a_0}$, а p, q — коэффициенты разложения на простые множители выражения $\frac{c_1 z^2 + b_1 z + a_1}{z(c_0 z^2 + b_0 z + a_0)} = -\frac{r-1}{z} - \frac{p-1}{z-z_1} - \frac{q-1}{z-z_2}$. Тогда общий член последовательности выражается через (7) и (8). Хотя интеграл (8) не берется и выражается через гипергеометрические функции, но такое представление позволяет исследовать поведение последовательности $\{y_n\}$ при $n \rightarrow \infty$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрианов Ю. А., Баландюк А. В., Преображенский С. П. Метод контурного интегрирования Лапласа. 2024.
2. Сидоров Ю. В., Федорюк М. В., Шабунин М. И. Лекции по теории функций комплексного переменного. - М.:Наука, 1982.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОКОЛОННЫ

С.О. Вересов¹✉, О.М. Горбенко², А.О. Голубок^{1,2}

¹Академический Университет имени Ж.И. Алфёрова, г. Санкт-Петербург

²Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург

✉ ferdinand0007@yandex.ru

В работе представлены результаты расчета фокусирующей системы на основе электростатической микроколони (МК) и обсуждаются возможные технологии её изготовления. Электростатические низковольтные МК – отдельная ветвь в семействе электронных микроскопов (ЭМ), начавшая развиваться с 80-х годов 20го столетия [1-3]. Эти устройства обладают целым рядом преимуществ в сравнении с традиционными ЭМ: миниатюрность, простота и относительно небольшая стоимость изготовления, а также высокий контраст изображения. МК можно разделить на 2 группы – с использованием объективных линз [4] и без них [5-7]. Второй вариант имеет преимущество в том, что облегчается технология изготовления, юстировки и управления пучком в отклоняющей системе. Источником электронов в электростатических МК обычно является холодный полевой эмиттер или термополевой эмиттер Шоттки, обладающие малым размером виртуального источника (4-8 нм) и высокой яркостью. Структура МК (Рис.1-а) минимизирована в целях упрощения технологии изготовления и состоит из эмиттера и двух электростатических линз – экстрактора и фокусирующей линзы. Моделирование предложенной МК проводилось в пакетах COMSOL и SIMION. Моделирование в COMSOL выполнялось в 3D постановке и проводилось в два этапа. На первом этапе выполнялось построение электрического поля с учетом физической формы зонда в виде параболоида с радиусом закругления 100 нм (Рис.1-б), что позволило оценить ток эмиссии при помощи формулы Фаулера-Нордгейма (Таблица 1). На втором этапе моделирования COMSOL и в модели SIMION выполняется трассировка электронов (Рис.1 в, г) с использованием виртуального Гауссова источника электронов, параметры которого соответствуют параметрам автоэмиссионного источника [8]. Моделирование в обоих пакетах выполнялись с одинаковыми параметрами геометрии и напряжений на электродах (Таблица 1). В результате получено, что при расстоянии от зонда до экстрактора 200 нм и напряжении на зонде 300-700 В, рабочее расстояние составляет 220-340 мкм, а размер сфокусированного пучка 120-150 нм (Таблица 1).

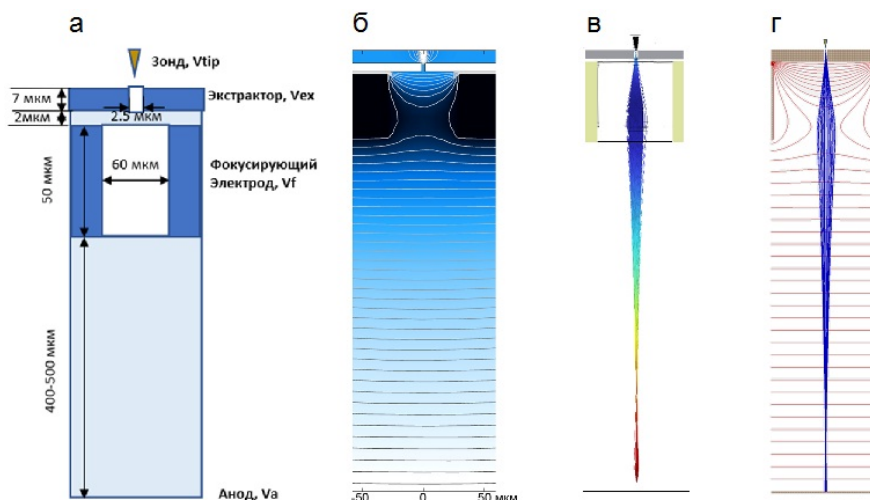


Рисунок 1. а- схема модели; б- электрическое поле, построенное в COMSOL; в,г – сравнение трассировки электронов в COMSOL и SIMION.

Таблица 1

Vtip, В	Vex, В	Vf, В	Va, В	Ток эмиссии, нА	Ширина сфокусированного пучка, нм	
					COMSOL	SIMION
- 300	- 170	- 305	0	0.017	175	409
- 500	- 400	- 506	0	15	115	310
- 700	- 550	- 708	0	330	97	246

Для изготовления МК применяются различные технологии: оптическая и электронная литография, групповая кремниевая технология микроэлектроники, технология фокусированного электронного пучка и др. Например в [9], использована технология фрезерования ионным пучком, а в [10] для изготовления многоколоночной мини электронно-оптической системы для инспекции больших пластин предлагается использовать групповую технологию микроэлектроники. Представленная выше мини электронно-оптическая система может быть изготовлена, например, с помощью фрезеровки тонкой металлической фольги с помощью ионного и лазерного пучков. При этом, с помощью фрезеровки сфокусированным ионным пучком может быть создана апертура с минимальным микронным и субмикронным диаметром для экстрактора электронов, а с помощью лазерной фрезеровки - широкоапертурная часть МК с диаметром отверстия в десятки микрон (рис.2).

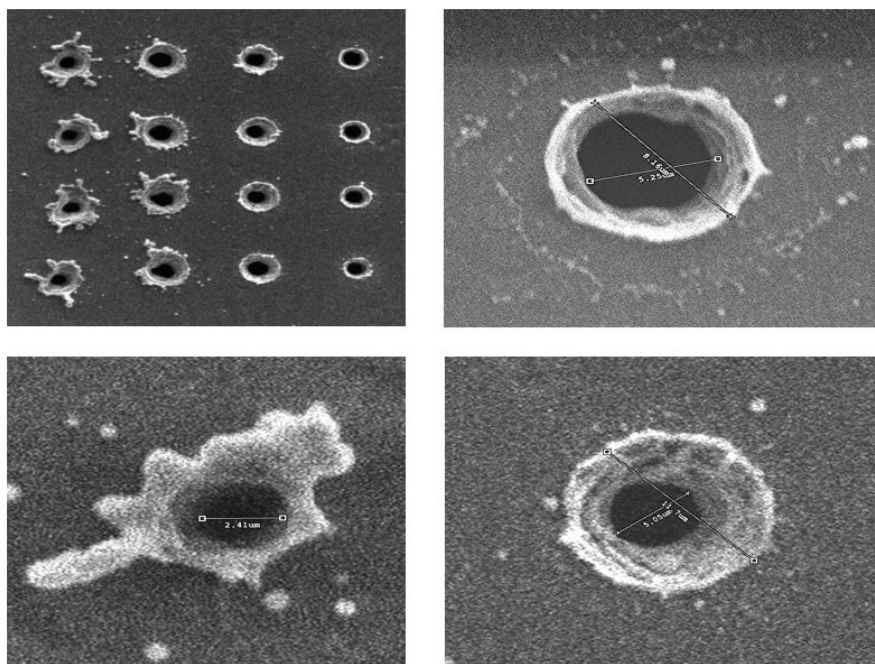


Рисунок 2. Изготовление отверстий для широкоапертурной части МК в алюминиевой фольге при помощи технологии лазерной фрезеровки.

Поскольку лазерная технология в принципе позволяет получать отверстия с микронными диаметрами, то в перспективе можно будет использовать единую лазерную технологию для изготовления апертур МК. В качестве основных материалов для создания заданной структуры МК предполагается использовать тонкие фольги алюминия, титана и вольфрама толщиной 10-20 мкм. В качестве эмиттера можно использовать вольфрамовое острие, изготовленное методом электрохимического травления.

*Работа выполнена при поддержке ООО «Петроаналитика Инструментс»
(к. ф.-м. н. О.В.Хаим)*

ЛІТЕРАТУРА

1. *Murray, L.P.* Developments in low-voltage microscopy instrumentation// *Scanning*. 2011 Vol. 33 P. 155-161 DOI:10.1002/sca.20245
2. *Park J.-Y., Lera J.-D., Yakshin M.A. Choi S.S., Lee Y., Chun K. J., Lee J.D., Jeon D., Kuk Y.* Fabrication of multiple microcolumn array combined with field emission array// *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1997 Vol.15, P. 2749 DOI: 10.1116/1.589720
3. *Roberts R. H., Gomati M. M., Kudjoe J., Barkshire I. R., Bean S. J., Prutton M.* A Miniature, all-electrostatic, field emission electron column for surface analytical microscopy// *Measurement Science and Technology*. 1997 Volume 8, No. 5 DOI: 10.1088/0957-0233/8/5/012
4. *Chang T. H. P., Thomson M. G. R., Yu M. L., Kratschmer E., Kim H. S., Lee K. Y., Rishton S. A., S. Zolgharnain.* Electron beam technology - SEM to microcolumn// *Microelectronic Engineering*. 1996 Vol.32 P.113-130. DOI: 10.1016/0167-9317(95)00366-5
5. *Zlatkin A., Garcia N.* Functional scanning electron microscope of low energy with integrated electron optical system for nanolithography// *Microelectronic Engineering*. 1999 Vol.46. P. 213-217. DOI: 10.1016/S0167-9317(99)00065-9
6. *Minh P. N., Ono T., Sato N., Mimura H., Esashi M.*; Microelectron field emitter array with focus lenses for multielectron beam lithography based on silicon on insulator wafer. *J. Vac. Sci. Technol. B* 1 May 2004; 22 (3): 1273–1276. DOI: 10.1116/1.1738118
7. *Kim Y.C., Ahn S.J., Oh T.S., Kim D.W., Kim H.S., Jang W.K.* Low energy microcolumn for large field view inspection// *Ultramicroscopy*. 2011 Vol.111, No.12. P.1645-1649. DOI: 10.1016/j.ultramic.2011.09.016
8. *Tuggle D.W., Li J. Z., Swanson L. W.* Point cathodes for use in virtual source electron optics// *Journal of Microscopy*. 1985 Vol. 140, No 3 P. 293-301. DOI: 10.1111/j.1365-2818.1985.tb02683.x
9. *Wicki F., Longchamp J.-N., Escher C., Fink H.-W.*, Design and implementation of a micron-sized electron column fabricated by focused ion beam milling // *Ultramicroscopy*. 2016 Vol. 160 P. 74-79. DOI: 10.1016/j.ultramic.2015.09.013
10. *Kazmiruk V., Savitskaja T.* Electron Optic Design of Arrayed E-Beam Microcolumns Based Systems for Wafer Defects Inspection// *arXiv:0805.0495v1 [physics.optics]*. 2008 DOI: 10.48550/arXiv.0805.0495

ВЫЯВЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ДЕЛЬТА- И ТЕТА-РИТМОВ СИГНАЛОВ ЛОКАЛЬНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ МОЗГА КРЫС

Д. Р. Грачев^{1,2}✉, Е. М. Сулейманова³, И. В. Сысоев^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

³Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН

✉ grachevr1@gmail.com

Введение. Одним из главных факторов риска возникновения нейродегенеративных заболеваний является возраст. С неизменным трендом по увеличению ожидаемой продолжительности жизни по всему миру все актуальнее становятся проблемы лечения и диагностики заболеваний мозга. Важной частью диагностики является различение ритмов активности головного мозга, поскольку изменение в их активности может указывать на патологии. Для этой цели применяются различные метрики. Наиболее часто используется спектральный анализ сигнала, однако он не всегда применим, например, при перекрытии частот. Иной способ, лишенный основных недостатков анализа спектра сигнала, основан на понятиях из теории динамического хаоса и теории сигналов. Далее, в частности, речь пойдет о фрактальной размерности (ёмкости) и корреляционной размерности.

Размерности. Фрактальная размерность — это показатель, описывающий сложность самоподобия системы (её шероховатость). Вычисление фрактальной размерности состоит в подсчете минимального необходимого для покрытия системы числа ячеек $N(\varepsilon)$ при разном линейном размере ε последних [1].

$$D = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (1)$$

График зависимости оценки фрактальной размерности от уменьшения масштаба в теории должен иметь монотонное поведение, но на практике действительным значением выбирается последнее значение фрактальной размерности перед нарушением монотонности.

Корреляционная размерность D_2 определяет сложность динамики системы. Её оценка дает информацию о количестве степеней свободы системы. Для её вычисления методом Грассбергера–Прокачиа необходимо подсчитать количество пар точек, находящихся на расстоянии, не превышающем ε [2]. Эта величина называется корреляционным интегралом $C(\varepsilon)$.

$$C(\varepsilon) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i,j=1}^M \theta(\varepsilon - \|x_i - x_j\|), \quad (2)$$
$$D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{C(\varepsilon)}{\log \varepsilon},$$

где M — количество точек, θ — функция Хевисайда. Построив корреляционный интеграл при различных значениях ε , необходимо найти на графике наиболее длинный линейный участок и вычислить тангенс угла его наклона. Полученная величина является оценкой корреляционной размерностью D_2 .

Известно, что экспериментальные данные часто имеют лишь одну координату (скалярный временной ряд). Однако для вычисления фрактальной и корреляционной размерностей

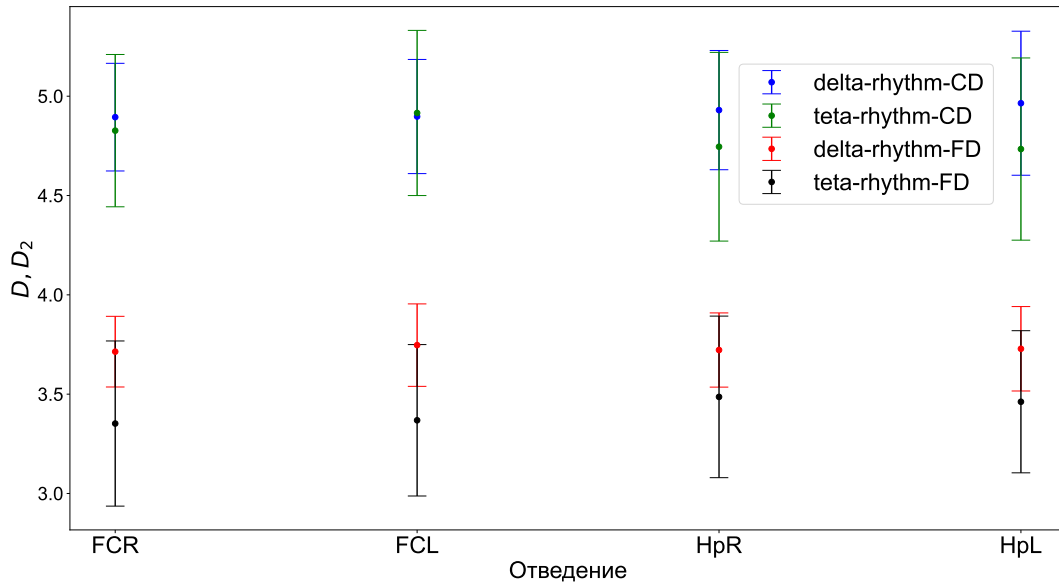


Рис. 1. Сравнение среднего значения и стандартного отклонения фрактальной (FD) и корреляционной (CD) размерностей тета- и дельта-ритмов активности мозга крыс для разных отведений.

требуется большее число переменных. Поэтому из скалярного ряда восстанавливают вектор состояний. В данной работе для этого был выбран метод задержек [3]. Он заключается в записи в качестве новых координат сдвинутых на время кратное τ копий изначального одномерного сигнала. Для выбора времени τ рассчитывается автокорреляционная функция (3) и находится её первое пересечение нуля [4]. При выборе времени сдвига τ таким образом в новой системе остается наибольшее количество информации об оригинальной системе.

$$K_x = \frac{1}{(N - \tau - 1)\sigma^2} \sum_{i=\tau}^{N-1} (x_i - \mu)(x_{i-\tau} - \mu), \quad (3)$$

где σ^2 — эмпирическая дисперсия, μ — оценка среднего, N — число значений во временном ряде.

Результаты. В данной работе исследовался вопрос о возможности выявления и различения тета- и дельта-ритмов активности у здоровых крыс линии Wistar по сигналам локальных потенциалов мозга (внутричерепных энцефалограмм) из двух отведений коры и двух отведений гиппокампа. Анализировались записи 9 животных. Записи снимались с частотой дискретизации 258 Гц, длина каждой составляла около 26 часов. Разметка тета- и дельта-ритмов осуществлялась вручную, длины разметок варьировались от 20 до 200 секунд. Для дельта-ритма количество разметок на одну крысу приходилось от 3 до 7, а для тета-ритма от 4 до 17.

Из рис. 1 видно, что значения корреляционной размерности строго превосходят значения фрактальной размерности, но для обеих размерностей во всех отведениях стандартное отклонение тета-ритма выше, чем у дельта-ритма. Также результаты расчёта указывают, что дельта-ритм имеет более высокую среднюю по всем животным размерность во всех четырёх отведениях для фрактальной размерности, и также для корреляционной, за исключением левого отведения фронтальной коры, в котором средние слабо различимы, хотя статистически данные выводы имеют низкую достоверность. Вывод о более высокой размерности дельта-ритма хорошо соответствует тому факту, что тета-ритм как правило имеет лучше выраженную основную

частоту, чем дельта-ритм.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-12-00176.

ЛИТЕРАТУРА

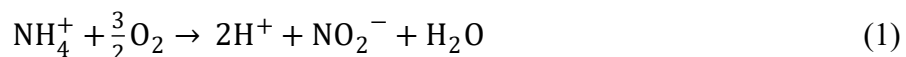
1. Кузнецов С. П. Курс лекций “Динамический хаос”. М.: Физматлит, изд. 2, 356 с., 2006. ISBN 5-94052-100-2.
2. Grassberger P., Procaccia I. Characterization of Strange Attractors // Physical Review Letters 1983. Vol 50, No. 5. DOI: 10.1103/PhysRevLett.50.346
3. Packard NH, Crutchfield JP, Farmer JD, Shaw RS. Geometry from a time series. Physical review letters. 1980 Sep 1;45(9):712.
4. П. А. Курников, Н. В. Крапухина, Реконструкция фазового пространства динамической системы высоконагруженного кэширующего механизма информационных систем, ИТиВС, 2019, выпуск 1, 49–65. DOI: 10.14357/20718632190105

АДАПТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУР ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ФРОНТА ПАРЕТО: ПРИМЕНЕНИЕ К МОДЕЛИ НИТРИФИКАЦИИ

А.О. Гречнева✉, В.Д. Тарасов, Д.А. Тархов, А.В. Шатров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ alinkagrechneva@mail.ru

Введение. Одной из ключевых операций биологической очистки сточных вод является нитрификация – аэробное окисление токсичного аммония до нитритов и нитратов, обеспечивающее экологическую безопасность сбросов. Математическое моделирование этого процесса сталкивается с двумя основными трудностями: неопределённостью кинетических параметров и необходимостью балансировать точность аппроксимации экспериментальных данных и соответствие физическим уравнениям – цели, конфликтующие при обучении физически информированных нейронных сетей (PINN). Существующие подходы часто используют фиксированную архитектуру сети [1,2], что ограничивает их адаптивность. В настоящей работе мы предлагаем адаптивный подход к построению PINN, в котором архитектура (число нейронов) и весовой коэффициент функции потерь оптимизируются совместно с помощью анализа фронта Парето – что позволяет объективно выявить компромиссные, физически осмысленные решения и избежать как недообучения, так и переобучения сети.

Модель. Бактерии вида *Nitrosomonas* окисляют аммоний до нитрита NO_2^- в соответствии со следующей схемой:



Рассмотрена упрощённая модель первого этапа нитрификации:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -\mu_1 \frac{N}{K_N + N} B \\ \frac{dB}{dt} = \mu_2 \frac{N}{K_N + N} - k_d B \end{cases} \quad (2)$$

Где: N – концентрации аммония; B – концентрация бактерий вида *Nitrosomonas*; $\mu_{1,2}$ – максимальная удельная скорость реакции; k_d – константа отмирания микроорганизмов *Nitrosomonas*; K_N – константа полунасыщения; t – время.

Стоит отметить, что μ_1 , μ_2 , k_d , K_N являются неизвестными параметрами и подлежат идентификации в процессе обучения сети вместе с поиском решения $N(t)$, $B(t)$ в виде нейронных сетей вида $\sum_{i=1}^n c_i \cdot \tanh[a_i(t - d_i)] + c_0$.

Обучение сети проводится минимизацией функции потерь, следующей подходу PINN для обратных задач [3]:

$$E(N, B) = \sum_{i=1}^m P_i + Ag \sum_{i=1}^{m1} Z_i \quad (3)$$

$$P_i = \left(\frac{dN}{dt} + \mu_1 \frac{N}{K_N + N} B \right)^2 (t_i) + \left(\frac{dB}{dt} - \mu_2 \frac{NB}{K_N + N} + k_d B \right)^2 (t_i) \quad (4)$$

$$Z_i = (N(tg_i) - N_i)^2 + (B(tg_i) - B_i)^2 \quad (5)$$

Здесь t_i пробные точки, которые регенерируются каждые 3-5 шагов обучения как случайные равномерно распределённые во всей области изменения переменных, tg_i – точки измерений, N_i – данные измерений, n – число нейронов. В связи с случайной

перегенерацией тестовых точек новая их выборка, сгенерированная на очередном шаге, может рассматриваться как тестовая для дифференциальных уравнений задачи.

Рассмотрены три стратегии построения архитектуры:

1. постоянное одинаковое число нейронов n ;
2. постоянное разное n_1, n_2 ;
3. метод растущих сетей [4] – последовательное добавление нейронов с дообучением.

Результаты. Поиск Парето-оптимальных решений для трёх стратегий построения архитектуры выполнен методом полного перебора параметров. В данном разделе подробно рассматриваются результаты, полученные для метода растущих сетей, при котором архитектура последовательно наращивается от 1 до n нейронов. На рисунке 1 представлена Парето-оптимальная диаграмма, построенная для определения оптимального количества нейронов в этом подходе.

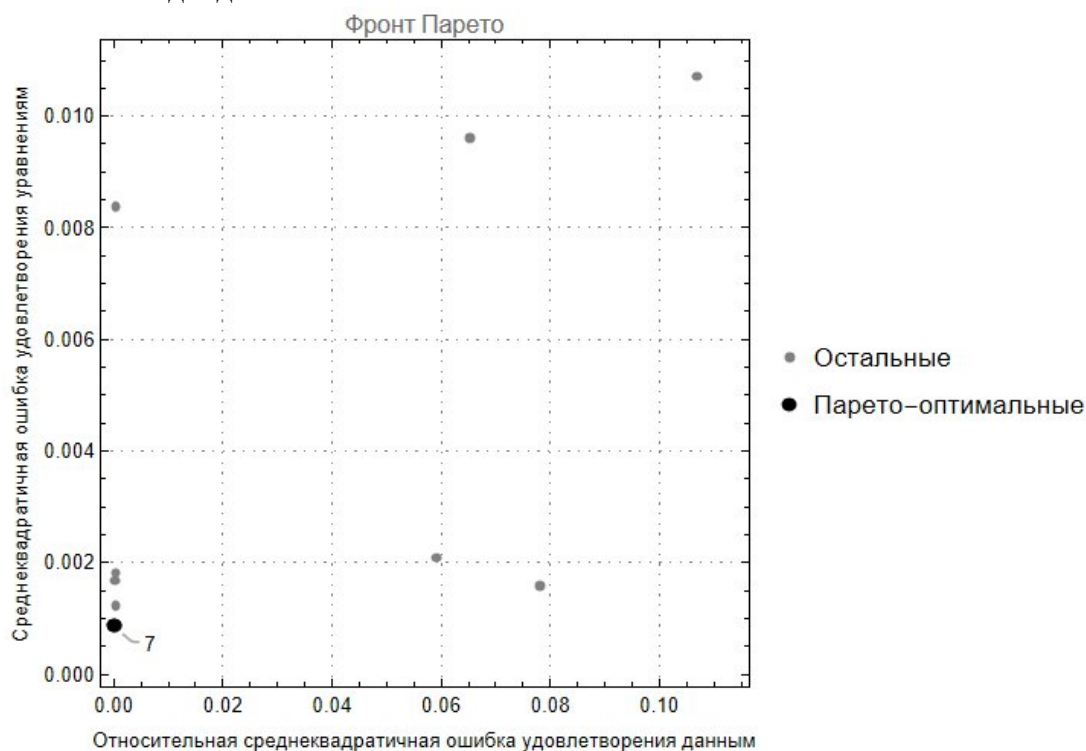


Рис. 1. Фронт Парето по числу нейронов для метода растущих сетей ($n \in [10, 20]$).

Анализ данных, представленных на рисунке 1 и в таблице 1, показал, что оптимальным количеством нейронов является $n = 18$. При данной конфигурации достигается наилучший баланс между двумя целевыми функциями: ошибка аппроксимации экспериментальных данных составляет $1,29 \cdot 10^{-4}$, а ошибка выполнения системы дифференциальных уравнений составляет $8,72 \cdot 10^{-4}$. Отклонение от найденного оптимального значения (как в сторону уменьшения, так и увеличения числа нейронов) приводит к существенному возрастанию одной из ошибок, что свидетельствует о недостаточной ёмкости сети или, напротив, о её переобучении.

Таблица 1. Фронт Парето для определения оптимального числа нейронов.

М	n	Относительная среднеквадратичная ошибка удовлетворения данным	Среднеквадратичная ошибка удовлетворения уравнениям
1	10	0,000275272	0,00123258
2	12	0,0781185	0,00158268

3	13	0,00029461	0,00181849
4	14	0,065242	0,00961172
5	15	0,0590832	0,00209045
6	16	0,106942	0,0107083
7	18	0,000129257	0,000872169
8	19	0,000274931	0,0083843
9	20	0,000196394	0,00168899

Примечание: M – номер значения на графике фронта Парето.

Далее определяем оптимальный весовой коэффициент Ag .

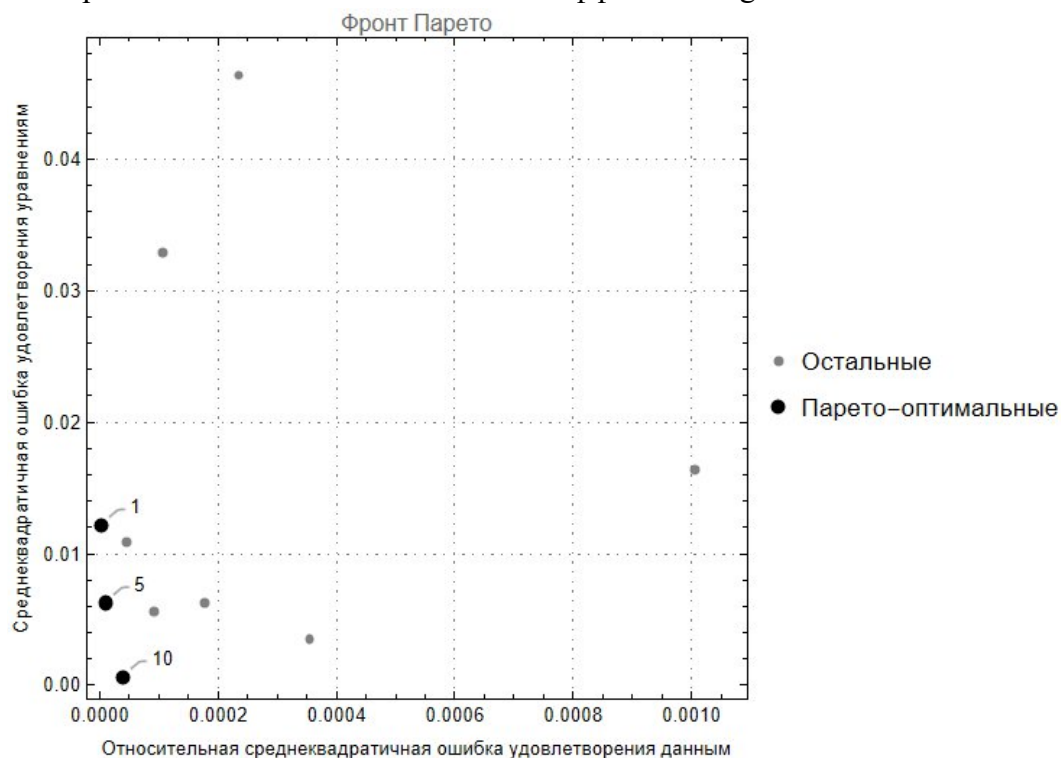


Рис. 2. Фронт Парето по весовому коэффициенту Ag для $n=18$.

Оптимизация весового коэффициента Ag на основе анализа рисунка 2 и таблицы 2 позволила выделить три Парето-оптимальных решения: $Ag = 64$, $Ag = 4$ и $Ag = 0,125$. Значение $Ag = 64$ демонстрирует наибольшую ошибку выполнения уравнений при сопоставимой точности аппроксимации данных, что делает его наименее предпочтительным. Вариант $Ag = 4$ обеспечивает минимальную ошибку по данным ($9,40 \cdot 10^{-6}$), однако при $Ag = 0,125$ достигается существенно более низкая ошибка по уравнениям ($6,23 \cdot 10^{-4}$) при сохранении высокой точности описания эксперимента ($3,87 \cdot 10^{-5}$). Поскольку различие в ошибке по данным между этими двумя конфигурациями незначительно, а выигрыш в точности выполнения физических законов при $Ag = 0,125$ является значимым, данный коэффициент был выбран в качестве оптимального для балансировки функции потерь.

Таблица 2. Фронт Парето для определения оптимального весового коэффициента для модели из 5 нейронов

M	Ag	Относительная среднеквадратичная ошибка удовлетворения данным	Среднеквадратичная ошибка удовлетворения уравнениям
1	64	2,30586E-06	0,0121609
2	32	0,000106221	0,0328924
3	16	4,52342E-05	0,0108722

М	Ag	Относительная среднеквадратичная ошибка удовлетворения данным	Среднеквадратичная ошибка удовлетворения уравнениям
4	8	0,00023452	0,0463735
5	4	9,39839E-06	0,00625498
6	2	9,20779E-05	0,00562328
7	1	0,000177312	0,00630066
8	0,5	0,000354329	0,00352178
9	0,25	0,00100484	0,0164072
10	0,125	3,87328E-05	0,000623123

Примечание: М – номер значения на графике фронта Парето.

Для наглядного сравнения эффективности трёх исследованных подходов в таблице 3 представлены Парето-оптимальные конфигурации по числу нейронов и весовому коэффициенту Ag , а также соответствующие значения ошибок.

Анализ таблицы 3 и фронта Парето (рис. 1, 2) показал, что использование различного числа нейронов обеспечивает наилучший компромисс: при наименьшем числе нейронов достигается минимальная совокупная ошибка и устойчивость к переобучению – сеть останавливает рост при выходе на фронт Парето.

Таблица 3. Парето-оптимальные конфигурации и соответствующие ошибки

Параметр/Ошибка	Постоянное одинаковое число нейронов n	Постоянное разное n_1, n_2	Метод растущих сетей
n или (n_1, n_2)	51	(14,8)	18
Ag	2	128	0,125
Относительная среднеквадратичная ошибка удовлетворения данным	$3,78 \cdot 10^{-4}$	$5,69 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$
Среднеквадратичная ошибка удовлетворения уравнениям	$6,36 \cdot 10^{-3}$	$5,88 \cdot 10^{-4}$	$8,72 \cdot 10^{-4}$

Как видно из Таблицы 3, подход с разным числом нейронов для N и V позволяет достичь наименьшей ошибки по данным, однако требует большего общего числа параметров. Метод растущих сетей демонстрирует близкую точность при существенно меньшем итоговом числе нейронов, подтверждая его эффективность в подборе оптимальной сложности архитектуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lu B., Moya C., Lin G. NSGA-PINN: a multi-objective optimization method for physics-informed neural network training // Algorithms. – 2023. – Т. 16. – №. 4. – С. 194.
2. Yuan-Zheng Lei, Yaobang Gong, Dianwei Chen, Yao Cheng, Xianfeng Terry Yang, Reconstructing physics-informed machine learning for traffic flow modeling: a multi-gradient descent and pareto learning approach, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 180, 2025, 105344, ISSN 0968-090X, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2025.105344>.
3. Тарасов В.Д., Тархов Д.А., Шатров А.В. Построение математической модели процесса окисления ионов аммония // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: Сб. ст. по материалам ХС междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2025. – С. 14–19.
4. Lu X., Dong W., Fang Z., et al. Growing-before-pruning: A progressive neural architecture search strategy via group sparsity and deterministic annealing // Pattern Recognition. 2025. Vol. 166. Art. 111697, <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2025.111697>

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТЕТА-РИТМА В ГИППОКАМПЕ ОДНОГО ИЗ ПОЛУШАРИЙ МОЗГА ПО СИГНАЛАМ ЛОКАЛЬНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ КРЫС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

А. С. Джафарова^{1,2} ✉, А. А. Грищенко², Е. М. Сулейманова³, М. В. Корнилов^{1,2}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

✉ dzhafarovaan@gmail.com

Введение. Мозг как сложная многокомпонентная система, чьи принципы функционирования остаются недостаточно изученными, активно исследуется посредством анализа электроэнцефалографической активности (ЭЭГ), в том числе сигналов локальных потенциалов, что является ключевым инструментом в изучении физиологии, фармакологии и возрастных изменений мозга. Поскольку проведение инвазивных экспериментов на человеке ограничено, в качестве модельных объектов широко используются млекопитающие, такие как крысы, что позволяет детально изучать нейронную активность. Особый интерес представляет тета-ритм, связанный с когнитивными процессами и навигацией, однако его однозначная функциональная роль остается многогранной и сложной, поскольку ритмы действуют как общие операторы, отражающие функциональное состояние мозга через такие параметры, как интенсивность, временное подавление, синхронизация фаз, задержка и продолжительность [1]. Комплексные функции мозга обеспечиваются синхронной активностью различных ритмов (тета, дельта, альфа, бета, гамма), которые могут запускаться сенсорными и когнитивными воздействиями, распространяясь по различным структурам с разной интенсивностью и временными характеристиками. В данной работе решается задача детектирования тета-ритма в гиппокампе одного из полушарий мозга по сигналам локальных потенциалов крыс с использованием вейвлет-преобразования, что позволяет проводить точный и быстрый временно-частотный анализ для выделения и исследования характеристик данного ритма.

Экспериментальные данные. В качестве исходных данных для исследования были использованы записи локальных потенциалов, полученные в рамках нейрофизиологического эксперимента, первоначальной целью которого являлось изучение влияния агониста эндоканнабиноидных рецепторов WIN55,212-2 на развитие эпилептического статуса у крыс [2]. Для данного анализа были отобраны фоновые записи ЭЭГ, зарегистрированные через две недели после хирургической имплантации электродов, до какого-либо фармакологического воздействия. Из общей когорты животных была сформирована финальная выборка, состоящая из 13 крыс, для которых был обеспечен высокий технический уровень сигнала во всех каналах регистрации при отсутствии критических артефактов, способных исказить результаты последующего вычислительного анализа. Для каждого животного осуществлялась непрерывная 48-часовая запись нейрофизиологической активности. В работе анализировались сигналы, отведенные от двух каналов, расположенных в гиппокампе — структуре, являющейся основным генератором тета-ритма в мозге млекопитающих. Таким образом, использованный массив данных представляет собой длительные непрерывные фоновые записи внутричерепной ЭЭГ из ключевой структуры лимбической системы, пригодные для детального анализа колебательной активности.

Метод. Для решения поставленной задачи был применен алгоритм детекции, состоящий

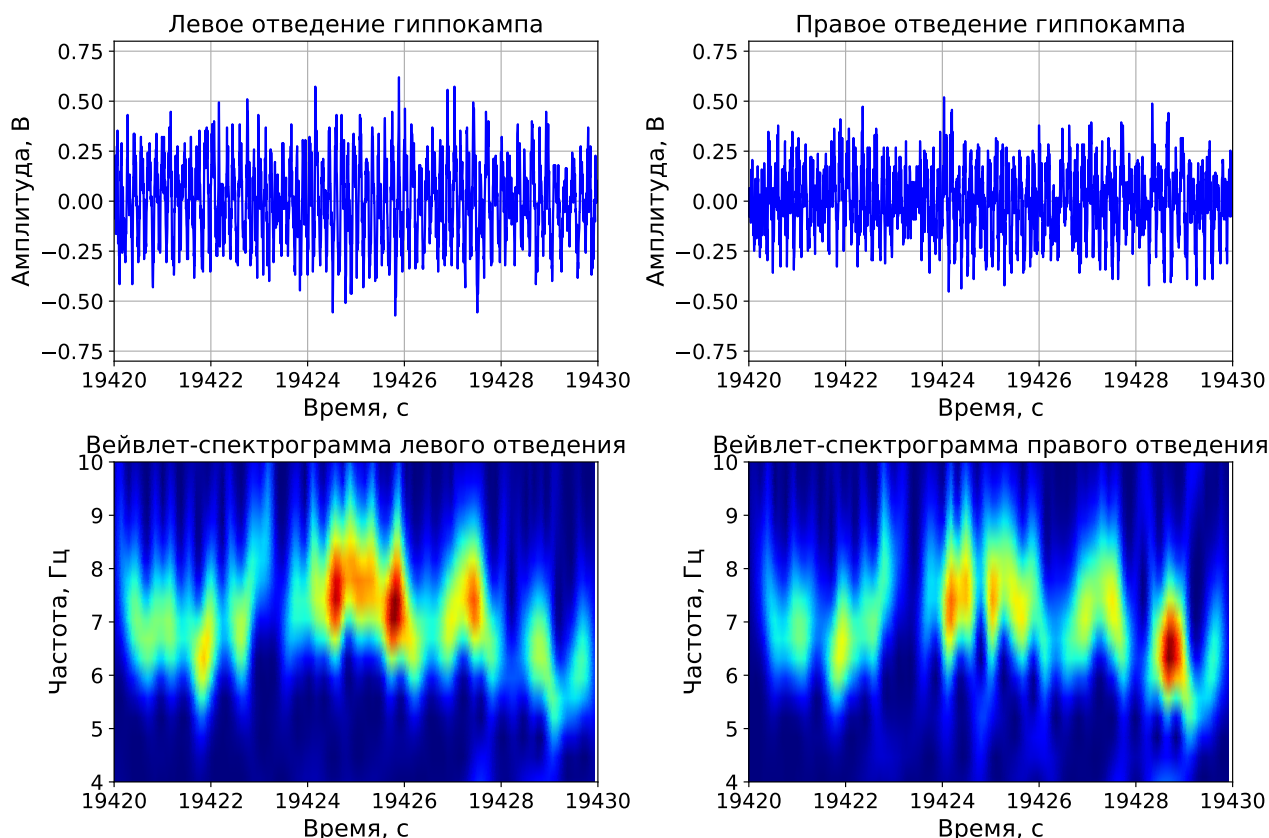


Рис. 1. Временные ряды и вейвлет-спектрограммы сигнала.

из двух основных этапов: предварительного отбора по амплитуде и последующего верифицирующего частотно-временного анализа. Первоначально производилась нормализация исходного временного ряда локальных потенциалов относительно его среднего значения. Далее осуществлялась первичная сегментация данных на основе длительности более 30 секунд и порогового критерия амплитуды, где в качестве порога использовалось значение, равное 1.5 от медианы всего ряда. Данная процедура позволяла выделить временные интервалы с низкоамплитудной активностью и длительностью, достаточной для последующего анализа.

Окончательное выделение эпизодов тета-ритма выполнялось на втором этапе с использованием вейвлет-преобразования, которое обеспечивает анализ локальных частотных характеристик сигнала во времени. В качестве базисной функции был выбран комплексный вейвлет Морле, оптимальный для анализа колебательных процессов, чье аналитическое представление приведено в формуле (1):

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}, \quad (1)$$

где ω_0 — безразмерная центральная частота, выбранная равной 6 для обеспечения оптимального соотношения между временным и частотным разрешением в интересующем диапазоне 4–8 Гц. На рис. 1 представлены графики правого и левого отведений гиппокампа и их вейвлет спектрограммы. Каждый выбранный сегмент, полученный на первом этапе, подвергался вейвлет-анализу с последующим вычислением средней мощности коэффициентов для каждой частоты. Критериями для выделения тета-ритма являлись: 1) нахождение частоты с максимальной средней мощностью в диапазоне 4–8 Гц; 2) устойчивость колебаний; 3) превышение максимального значения средней мощности порога в 0.1. Поскольку анализ проводился для последовательных неперекрывающихся 20-секундных окон внутри каждого сегмента, для фи-

Таблица 1. Таблица чувствительности и специфичности.

Номер животного	Чувствительность, %		Специфичность, %	
	HipL	HipR	HipL	HipR
1	70,91	67,20	95,12	96,55
2	91,26	84,81	92,88	92,71
3	88,82	91,12	98,62	95,59
4	97,02	96,70	91,85	91,99
5	96,13	95,10	96,13	95,62
6	87,65	86,15	93,42	91,06
7	52,54	79,28	77,50	88,89
8	63,33	17,74	51,35	50,00
9	75,31	90,40	92,42	96,58
10	94,87	96,23	92,50	87,79
11	95,81	92,40	91,96	91,33
12	95,35	91,64	91,79	92,99
13	81,71	66,67	72,83	91,80
Среднее	85,05	82,53	85,39	87,35

нального принятия решения о наличии ритма требовалось выполнение всех трех условий не менее чем в трех таких окнах.

Результаты. Для объективной оценки алгоритма автоматического выявления тета-ритма применялись стандартные метрики классификации: чувствительность и специфичность. Чувствительность вычислялась как доля корректно детектированных участков тета-ритма относительно общего количества эпизодов, отмеченных экспертом. Специфичность определялась как доля верно идентифицированных интервалов без тета-активности среди всех сегментов, не содержащих данный паттерн по экспертной оценке [3]. Верификация проводилась путём поточечного сопоставления результатов работы алгоритма с визуальной экспертной разметкой, принятой в качестве эталона.

Итоговые результаты для 13 экспериментальных животных представлены в таблице 1. Средняя чувствительность алгоритма составила 83.8%, а специфичность — 86.4%. Результаты могут сильно зависеть от качества сигналов, так например у животного №8 большое количество артефактов, сильно ухудшило работу алгоритма. Тем не менее, алгоритм показал высокую и сбалансированную эффективность, достоверно обнаруживая искомую активности. Такие значения метрик указывают на то, что предложенный метод пригоден для практического применения в качестве инструмента автоматизированного анализа, существенно сокращающего время рутинной экспертной оценки при сохранении высокой диагностической точности.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-22-00406.

ЛИТЕРАТУРА

1. Buzsáki G. Rhythms of the Brain. Oxford: Oxford University Press, 2006. 464 p.
2. Suleymanova E. M., Shangaraeva V. A., van Rijn C. M., Vinogradova L. V. The cannabinoid receptor agonist WIN55.212 reduces consequences of status epilepticus in rats // Neuroscience. 2016. Vol. 334. P. 191–200.
3. Ситникова Е. Ю., Короновский А. А., Храмов А. Е. Анализ электрической активности головного мозга при абсанс эпилепсии: прикладные аспекты нелинейной динамики // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 173–182.

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ЛОКАЛЬНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА КРЫС–МОДЕЛЕЙ

А. Ю. Долинина^{1,2}✉, И. В. Сысоев^{1,2}, Е. М. Сулейманова³, М. В. Сысоева¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского

³Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

✉ dolinina13nasty@yandex.ru

Введение. Электроэнцефалографическая (ЭЭГ) активность широко используется для исследования функциональной организации центральной нервной системы. В исследованиях с использованием моделей животных обычно регистрируются внутричерепные записи локальных потенциалов поля, которые в свою очередь позволяют более точно исследовать активность мозга в различных состояниях. Особое внимание в таких экспериментах уделяется анализу ритмической организации ЭЭГ-сигнала, поскольку различные частотные диапазоны отражают характерные режимы работы нейронных сетей. Для мозга крыс, как одного из наиболее распространенных лабораторных объектов, выделяют основные типы ритмической активности, демонстрирующие сходство с ритмами, наблюдаемыми у людей. Однако, анатомические и функциональные особенности мозга крыс приводят к выраженным видовым различиям, которые влияют на процессы генерации, пространственное расположение и динамику развития мозговых ритмов [1]. Так одним из наиболее выраженных и изученных ритмов является тета-ритм (5–10 Гц), который доминирует в гиппокампе и ряде связанных с ним структур. Этот ритм характерен для состояний активного бодрствования, ориентировочного поведения, исследования среды и других процессов. В состоянии спокойного бодрствования и медленного сна у крыс преобладают дельта-ритм (1–4 Гц) и медленные волны, отражающие высокую степень синхронизации нейронной активности. Эти ритмы связаны с процессами восстановления, консолидации памяти и снижением сенсорной обработки. Дельта-активность может быть зафиксирована в различных областях мозга, в том числе в областях фронтальной коры. Данная работа посвящена исследованию сигналов локальных потенциалов, записанных с лобной коры головного мозга крыс-моделей, а также поиску в них дельта- и медленноволновой активности.

Данные и методы. В распоряжении имелись фоновые записи электроэнцефалограмм, полученные в рамках эксперимента по изучению влияния агониста каннабиноидных рецепторов на эпилептический статус у крыс линии Wistar, разводимых в питомнике «Столбовая» [2]. Для мониторинга активности мозга у свободно передвигающихся крыс использовалась беспроводная система регистрации ЭЭГ NeuroLogger (TSE Systems, Germany). Сигналы ЭЭГ записывались с частотой дискретизации 258 Гц и передавались на компьютер с помощью программного обеспечения CommSW. Электрическая активность головного мозга регистрировалась с лобной коры и гиппокампа правого и левого полушарий. Каждая крыса наблюдалась в течение двух суток. Из общего числа животных были отобраны 14 ЭЭГ-записей, соответствующих требованиям по качеству сигнала и не содержащих артефактов, способных исказить вычисления.

В рамках данной работы использовались сигналы полученные с лобной коры. Для анализа выбирались временные отрезки, определенные на основе анализа поведения, длительностью от 30 минут до 1 часа. У каждой крысы были проанализированы пять таких фрагментов разбитых на 10-секундные отрезки с обоих полушарий.

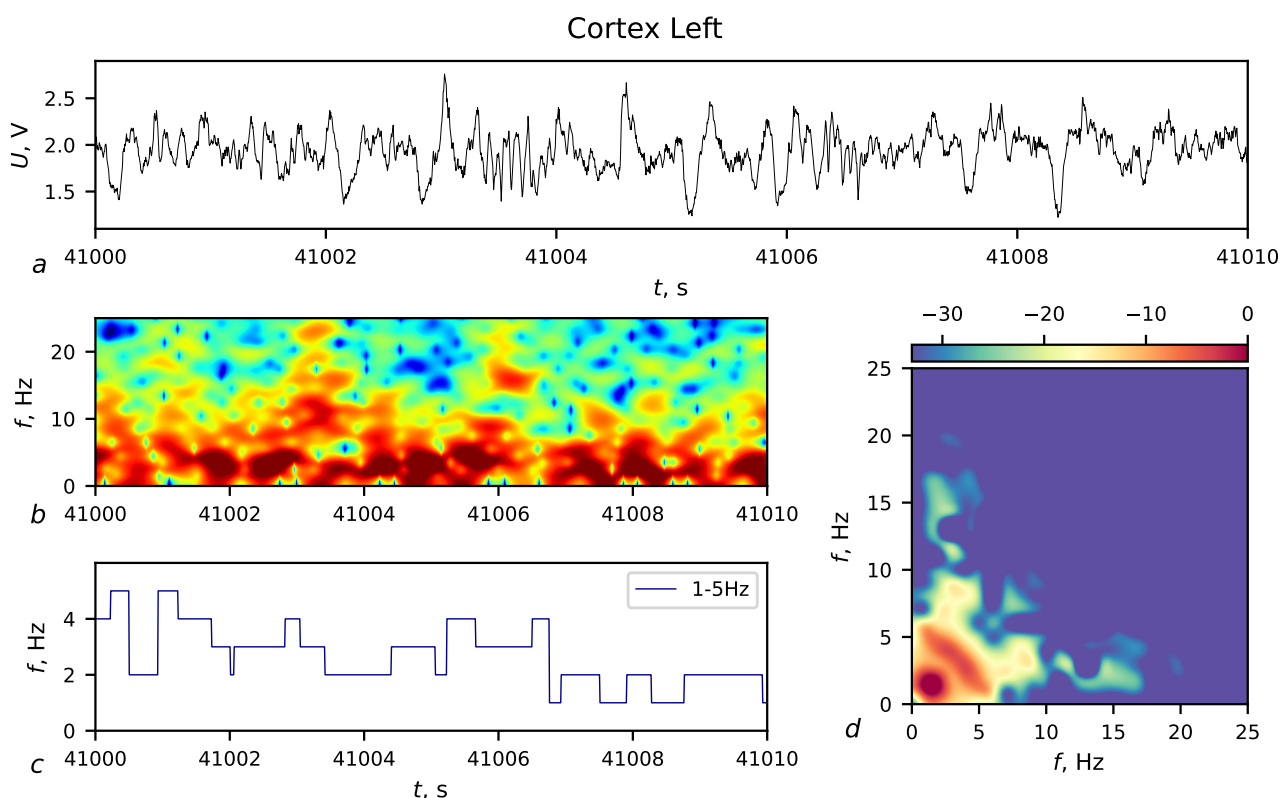


Рис. 1. Графики спектра, скелетона и биспектра для одного 10-секундного интервала сигнала с левого полушария для одной из исследуемых крыс. Первый график сверху (a) – временной ряд ЭЭГ, второй слева (b) – спектрограмма сигнала, третий (c) – его скелетон, четвёртый (d) – биспектр сигнала.

Для исследования временного ряда использовались методы спектрального и полиспектрального анализа, а именно осуществлялось построение спектрограмм, скелетонов и биспектров. Более подробно данные методы были описаны в работе [3] и использовались для исследования сигналов, полученных с гиппокампа. Так как в данной работе исследования проводятся на сигналах с другой области мозга, то для изучения их частотно-временной структуры методы были скорректированы. А именно исследовался частотный диапазон 1-5 Гц, для фильтрации (сглаживания) скелетонов время отсечки составило 0.05 секунды. Иные изменения в настройки используемых методов не вносились.

Результаты. В первую очередь была произведена разметка и разбиение отрезков сигналов на интервалы с выраженным дельта-ритмом и медленноволновой активностью. Разметка производилась исходя из особенностей структуры, формы сигнала и его частотных свойств, присущих для анализируемой активности. Длина каждого интервала составила 10 секунд. Для разметки временных рядов ЭЭГ был использован спектральный анализ. Графики временных рядов локальных потенциалов мозга, спектрограмм и скелетонов из обоих полушарий лобной коры представлены на рис. 1(a-c), 2(a-c).

В ходе анализа большинства исследуемых временных интервалов было установлено, что частотная активность в диапазоне 1–4 Гц носила выраженно нестабильный характер. Данная особенность существенно усложняла качественную оценку структуры сигналов локальных потенциалов поля, а также затрудняла выявление устойчиво выраженного дельта-ритма. Указанные особенности наглядно демонстрируются на спектрограммах, представленных на рис. 1b, 2b. На данных изображениях видно, что вместе со слабо выраженной активностью в дельта-диапазоне присутствует дополнительная неструктурированная частотная активность,

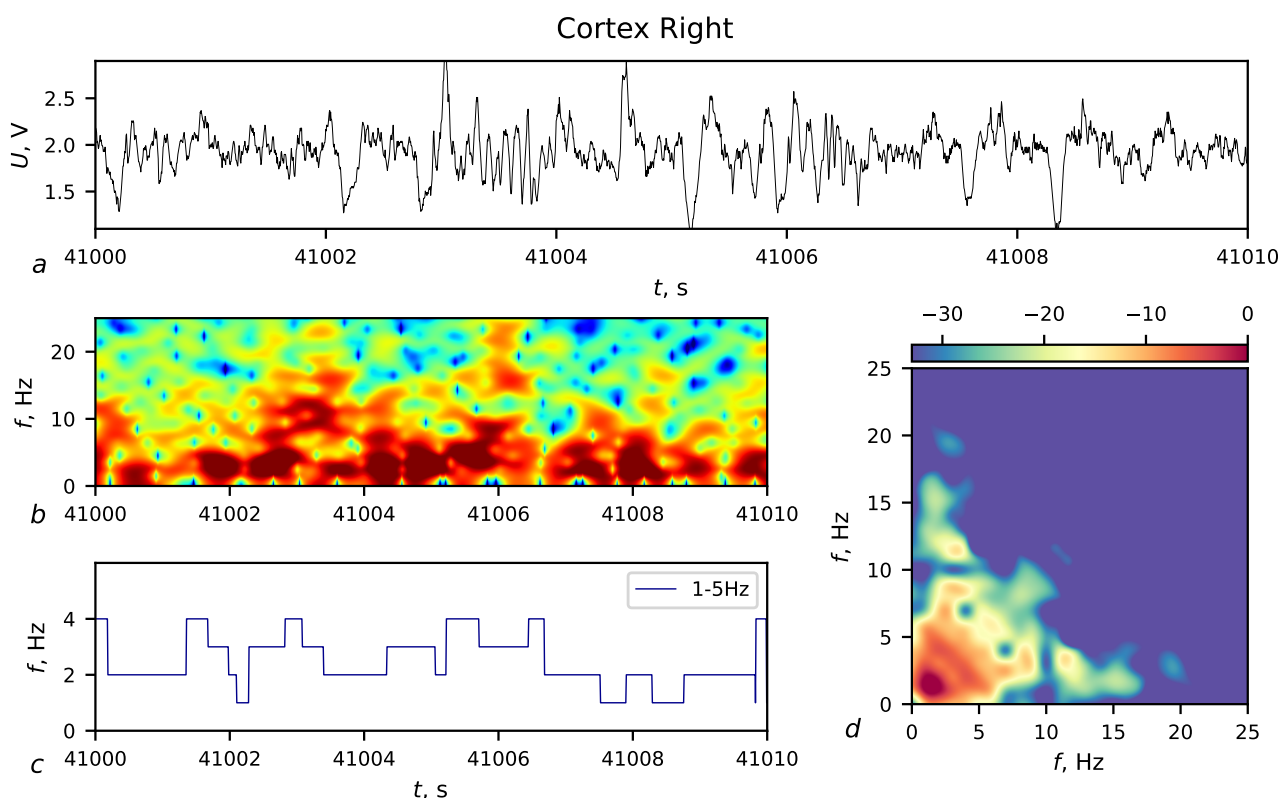


Рис. 2. Графики спектра, скелетона и биспектра для одного 10-секундного интервала сигнала с правого полушария для одной из исследуемых крыс. Первый график сверху (a) – временной ряд ЭЭГ, второй слева (b) – спектрограмма сигнала, третий (c) – его скелетон, четвёртый (d) – биспектр сигнала.

распределённая по более широкому спектру частот, что затрудняет однозначную интерпретацию низкочастотных компонентов сигнала.

В большинстве случаев достоверное выявление активности в дельта-диапазоне становилось возможным лишь при использовании дополнительных методов анализа, в частности при построении скелетонов (рис. 1с, 2с), а также при наличии предварительных знаний о характерной структуре сигналов локального поля мозга. Даже при таком подходе частотная динамика, отображаемая на графиках скелетонов, оставалась непостоянной для отдельных интервалов записи и могла демонстрировать выраженные флуктуации во времени. Кроме того, при сравнительном анализе сигналов, зарегистрированных из разных полушарий, выявлялись различия в динамике низкочастотной активности, что указывает на возможную асимметрию функционального состояния корковых структур или на вариабельность локальных нейронных процессов.

В результате применения описанных методов для каждой крысы было выделено различное число временных интервалов, в которых по совокупности критериев наблюдалась низкочастотная активность, соответствующая дельта-ритму.

В дополнение к анализу ранее выделенных временных интервалов был проведён биспектральный анализ. Примеры полученных биспектров представлены на рис. 1d и 2d. Рассмотрение данных графиков показывает, что в анализируемом 10-секундном временном интервале наблюдается выраженная низкочастотная активность, проявляющаяся в виде повышенных значений биспектральной мощности. В частности, на биспектре фиксируется отчётливый максимум, расположенный вдоль главной диагонали в области частот порядка 1–2 Гц, что визуальнo соответствует интенсивному красному участку на основной оси. Наличие данного максимума указывает на устойчивое взаимодействие низкочастотных компонент сигнала и может рассматриваться как

дополнительное подтверждение присутствия дельта-активности в рассматриваемом интервале записи.

Полученные результаты хорошо согласуются с динамикой, выявленной при анализе скелетонов спектральной мощности, где среднее значение доминирующей частоты сигнала на протяжении данного интервала сохранялось на уровне 2 Гц. В целом, обобщение результатов биспектрального анализа показало, что в большинстве случаев структура биспектров не противоречила данным, полученным на основе анализа скелетонов.

Проведенный анализ выявил значительную нестабильность и вариабельность дельта- и медленноволновой активности в локальных потенциалах лобной коры крыс, как в динамике, так и между полушариями. Использование традиционных спектральных методов не всегда дает четкий результат при определении дельта-ритма, что обуславливает необходимость применения более специфических подходов, например, анализа скелетонов и биспектрального анализа. Применение комплексного подхода позволило подтвердить согласованность применяемых методов и повысить точность обнаружения низкочастотной активности, относящейся к дельта-диапазону, даже при наличии сложной и изменчивой структуры исследуемых сигналов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-25-00219.

ЛИТЕРАТУРА

1. Waldhoer M., Bartlett S. E., Whistler J. L. Opioid receptors // Annu Rev Biochem. 2004. Vol. 73. P. 953-990.
2. Suleymanova E. M., Shangaraeva V. A., van Rijn C. M., Vinogradova L. V. The cannabinoid receptor agonist WIN55. 212 reduces consequences of status epilepticus in rats // Neuroscience. 2016. Vol. 334. P. 191–200.
3. Долинина А. Ю., Сулейманова Е. М., Корнилов М. В., Сысоева М. В., Сысоев И. В. Нелинейные свойства тета-ритма головного мозга // Известия вузов. ПНД. 2025. Т. 33, вып. 6. С. 873-897.

ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ПАРАМЕТРА МЕТОДА, ЗАВИСЯЩЕГО ОТ ПАРАМЕТРА ЗАДАЧИ

Д.С. Иванов✉, П.А. Павленко, Д.А. Тархов, А.Е. Яковлева
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ danilivanovgone@gmail.com

Введение. В задачах вычислительной математики эффективность численных методов часто зависит от правильного выбора их параметров, которые могут существенно изменяться в зависимости от характеристик решаемой задачи. Классические подходы к определению таких параметров основаны на эвристиках или требуют ручной настройки, что ограничивает их адаптивность при изменении условий. В данной работе предлагается подход автоматического определения параметров метода с помощью нейронной сети, параметризованной относительно параметра задачи. В отличие от традиционных методов, где нейросеть аппроксимирует непосредственно решение, в данном исследовании нейронная сеть обучается для определения оптимального параметра численного метода, зависящего от параметра задачи. В качестве модельных задач рассматриваются два метода построения нейросетевых моделей на основе модификации классических численных схем [1, 2].

Модель. В работе исследуются два метода построения нейросетевых моделей на основе модификации численных схем: обобщенный метод трапеций и метод регулировки разбиения интервалов. Оба метода основаны на модификации классического метода Эйлера и реализуют подход аналитической модификации численного метода (AMNM). Для обобщенного метода трапеций решается параметризованное дифференциальное уравнение второго порядка. В качестве модельной задачи для тестирования рассмотрено уравнение вида:

$$z'' + A(\alpha) z' + B(\alpha) z = 0,$$

где $A(\alpha) = \alpha + \frac{1}{\alpha}$, $B(\alpha) = -\alpha + \frac{1}{\alpha}$, с начальными условиями $z(0) = 0$, $z'(0) = 1$. Область определения $x \in [0, 1]$, $\alpha \in [0.01, 0.1]$.

Метод основан на введении весового коэффициента u в схему метода трапеций. Для каждого количества слоев $n = 1, 2, 3, 4, 5$ выводятся аналитические выражения решения $z_n(x, \alpha, u)$.

На первом этапе параметр u считается постоянным, и находится его оптимальное значение минимизацией функционала ошибки:

$$d(u) = \sqrt{\frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} \left[\frac{z_n'' + A(\alpha_n) z_n' + B(\alpha_n) z_n}{z_n(1, \alpha_i, u)} \right]^2},$$

где сумма берется по набору случайных точек в области определения.

На втором этапе проводится нейросетевая оптимизация, где параметр u представляется в виде нейронной сети, зависящей от параметра задачи α :

$$u(\alpha) = \sum_{i=1}^N c_i * \tanh[\alpha_i (\alpha - d_i)] + L_0,$$

где $N = 1, 3, 5$ – количество нейронов в скрытом слое.

Для метода регулировки разбиения интервалов исследование проводится по аналогичной двухэтапной схеме, однако аналитические выражения для решений имеют более сложный вид из-за особенностей метода (учета адаптивного разбиения интервала). Обучение нейронных сетей проводится методом RProp с минимизацией функционала ошибки, основанного на невязке исходного дифференциального уравнения. Пробные точки регенерируются каждые 5 шагов процесса оптимизации для повышения устойчивости обучения.

Результаты. Эксперименты проводились для трёх конфигураций нейросети с разным числом базисных функций: $n = 3, 5$ и 7 . Параметр задачи α изменялся в диапазоне $[0.01, 0.1]$. Количество потоков минимизации $n1 = 1000$, количество точек для вычисления функционала $m = 100$.

Таблица 1. Результаты минимизации функционала ошибки для обобщённого метода трапеции (2 слоя).

Число базисных функций (n)	Начальное значение ошибки	Конечное значение ошибки	Улучшение
3	0,376353	0,0306871	8,15%
5	0,202763	0,0620461	30,60%
7	0,267079	0,0319964	11,98%

Из таблицы видно, что наилучшая точность достигнута при $n = 5$. Увеличение числа базисных функций до 7 не привело к улучшению, что может быть связано с переобучением или сложностью оптимизации большего числа параметров.

Таблица 2. Результаты минимизации функционала ошибки для метода регулировки разбиения интервалов (2 слоя).

Число базисных функций (n)	Начальное значение ошибки	Конечное значение ошибки	Улучшение
3	0,337145	0,141192	41,88%
5	0,27898	0,0826391	29,62%
7	0,341545	0,141503	41,43%

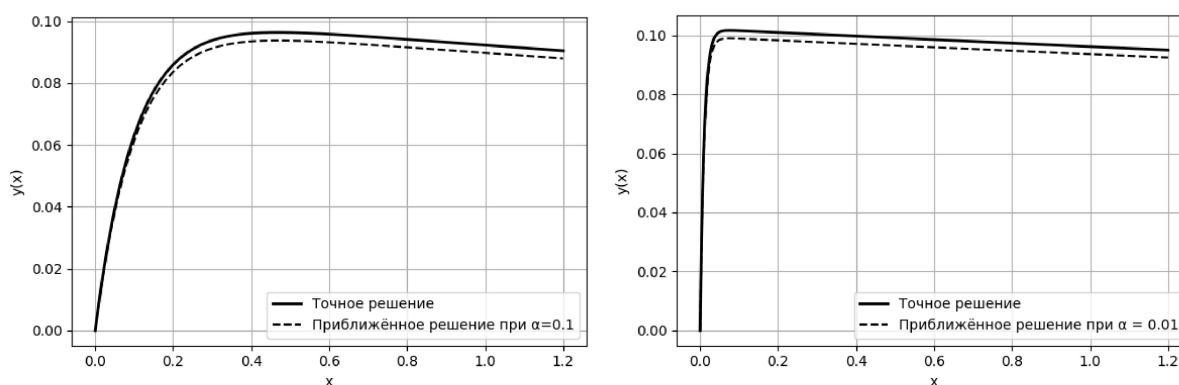


Рис. 1. Сравнение точного и приближённого решения при $\alpha = 0.1$ и $\alpha = 0.01$ (5 нейрона). Сплошная линия – точное решение, штриховая линия – приближённое решение при $\alpha = 0.1$, пунктирная линия – приближённое решение при $\alpha = 0.01$, полученное с использованием нейронной сети. Метод трапеции.

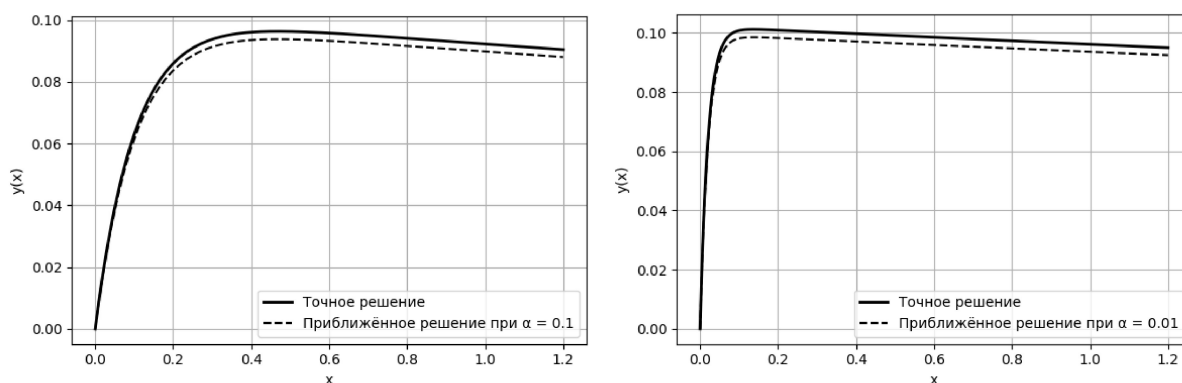


Рис. 2. Сравнение точного и приближённого решения при $\alpha = 0.1$ и $\alpha = 0.01$ (3 нейрона). Сплошная линия – точное решение, штриховая линия – приближённое решение при $\alpha = 0.1$, пунктирная линия – приближённое решение при $\alpha = 0.01$, полученное с использованием нейронной сети. Метод регулировки разбиения интервалов.

На рис. 1–2 приведены графики приближённого решения $u(x, \alpha)$ для разных значений α . Показано сравнение приближённого решения с точным решением $P(x, \alpha)$. Видно, что нейросетевая модель хорошо аппроксимирует точное решение, причём с увеличением числа базисных функций точность возрастает.

Закключение. Предложен метод обучения нейронной сети для автоматического определения параметров численного метода в зависимости от параметра задачи. Показано, что использование параметризованных нейронных сетей позволяет существенно улучшить точность моделей по сравнению с константным выбором параметров. Метод демонстрирует устойчивую сходимость благодаря использованию алгоритма RProp и может быть применён в задачах параметрической оптимизации и адаптивных численных методах.

Перспективы исследований:

- Использование более сложных архитектур нейросетей.
- Применение метода к другим классам дифференциальных уравнений.
- Оптимизация вычислительного процесса для уменьшения времени обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tarkhov D., Vasilyev A. Semi-Empirical Neural Network Modeling and Digital Twins Development. Academic Press, 2020.
2. Lazovskaya T., Malykhina G., Tarkhov D. Physics-Based Neural Network Methods for Solving Parameterized Singular Perturbation Problem // Computation. 2021. Vol. 9. P. 97.
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. MIT Press, 2016.

НЕСКОЛЬКО ТЕМ В ОДНОЙ ЗАДАЧЕ НА ЗАНЯТИЯХ ФАКУЛЬТАТИВА ПО ОЛИМПИАДНОЙ МАТЕМАТИКЕ

К.И. Иванов✉, А.А. Гольдберг, М.Р. Бортковская
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ kirill_iwa_2005@mail.ru

Введение. Весной 2023 года на занятии факультатива по олимпиадной математике (кафедра высшей математики СПбПУ) обсуждалась задача первого тура Международной интернет-олимпиады [1] этого же учебного года. В ходе занятия творческими усилиями студентов было предложено несколько подходов к решению, и попутно получены красивые и, если не знать предыстории, неожиданные тригонометрические формулы. В обсуждении решения задачи использованы темы: «школьная» планиметрия, тригонометрия, комплексная арифметика, многочлены, векторная алгебра, производные. По отзывам участников занятия, им показалось интересным увидеть в одной, и не самой сложной, задаче олимпиады взаимосвязь разных математических тем, часть которых была как раз в процессе освоения студентами первого курса-участниками факультатива. Ниже анализируется эффективность подобного подхода к обсуждению и решению задач как целенаправленного методического приёма.

Задача. Пусть $A_1, A_2, \dots, A_7$ – вершины вписанного в единичную окружность правильного семиугольника. Найти значение суммы $S + P$, где

$$S = |A_1 A_2|^2 + |A_1 A_3|^2 + \dots + |A_1 A_7|^2, P = |A_1 A_2| \cdot |A_1 A_3| \cdot \dots \cdot |A_1 A_7|.$$

Короткое решение. На сайте олимпиады [1] приведено авторское решение, однако приведем решение, полученное на занятии факультатива среди других, и наиболее короткое из них. Задачу решаем в общем виде для n -угольника, в нашей конкретной задаче $n = 7$.

Будем считать, что на плоскости введены декартовы прямоугольные координаты, вершины правильного многоугольника рассматриваем как точки комплексной плоскости, считаем, что центр многоугольника в начале координат, одна из вершин расположена в точке $z = 1$. Тогда все вершины многоугольника соответствуют корням многочлена $z^n - 1$, то есть каждая точка A_k изображает один из корней из единицы z_k , причем не умаляя общности они занумерованы так, что $k = 1, \dots, n; z_1 = 1$.

Тогда $P = \left| \prod_{k=2}^n (z_1 - z_k) \right|$. Применяя каноническое разложение многочлена на множители, получаем $P = \left| \left(\frac{z^n - 1}{z - 1} \right) \right|_{z=1} = \left| (z^{n-1} + z^{n-2} + \dots + 1) \right|_{z=1} = n$.

Теперь найдем сумму S . Для этого обозначим радиус-вектор каждой точки A_k как $\vec{r}_k$, все эти векторы единичной длины. Заметим, что из разложения $z^n - 1 = (z - z_1) \cdot (z - z_2) \cdot \dots \cdot (z - z_n)$ следует, что $\sum_{k=1}^n z_k = 0$, для проверки достаточно рассмотреть коэффициент при z^{n-1} в многочлене $z^n - 1, n > 1$. (Этот факт о сумме корней из единицы, безусловно, известен студентам второго и более старших курсов инженерных и физических направлений, но на нашем факультативном занятии были и первокурсники, которые лишь недавно познакомились с азами комплексной арифметики). Поэтому будет верно равенство $\sum_{k=1}^n \vec{r}_k = \vec{0}$. Отсюда вычисляем сумму $S = \sum_{k=1}^n (\vec{r}_1 - \vec{r}_k)^2 = n \cdot \vec{r}_1^2 + \sum_{k=1}^n \vec{r}_k^2 - 2\vec{r}_1 \sum_{k=1}^n \vec{r}_k = 2n$. Заметим, что здесь первое слагаемое $(\vec{r}_1 - \vec{r}_1)^2 = 0$, однако оно сознательно добавлено в сумму для удобства дальнейшего вычисления.

Таким образом, для произвольного правильного n -угольника получаем ответ задачи $P + S = n + 2n = 3n$, в частности при $n = 7$ имеем $P + S = 21$.

Примечание. Значение произведения P можно найти с помощью производной из равенства $(z^n - 1)' = (z - z_2)(z - z_3) \cdot \dots \cdot (z - z_n) + (z - z_1)(z - z_3) \cdot \dots \cdot (z - z_n) + \dots + (z - z_1)(z - z_2) \cdot \dots \cdot (z - z_{n-1})$.

Подставляя в обе части этого равенства $z = z_1$, то есть $z = 1$, получим

$$n z_1^{n-1} \Big|_{z=1} = \prod_{k=2}^n (z_1 - z_k), \text{ то есть } P = \left| \prod_{k=2}^n (z_1 - z_k) \right| = n.$$

Решение с помощью формулы корней комплексного числа и тригонометрии.

Первоначальная попытка решения сводилась к вычислению корней из единицы по известной формуле и суммированию квадратов модулей применением формулы суммы геометрической прогрессии и получению вещественной части комплексного числа.

Обозначая, как и раньше, $z_k = e^{i \frac{2\pi}{n}(k-1)}$, $k = 1, \dots, n$, получаем

$|z_1 - z_k|^2 = \left(1 - \cos \frac{2\pi}{n}(k-1)\right)^2 + \sin^2 \left(\frac{2\pi}{n}(k-1)\right) = 2 - 2 \cos \frac{2\pi(k-1)}{n}$. Заметим, что отсюда получится

$$|z_1 - z_k| = 2 \sin \frac{\pi(k-1)}{n}; k = 1, \dots, n. \quad (1)$$

Вычисляем сумму

$$S = \sum_{k=2}^n |z_1 - z_k|^2 = (n-1)2 - 2 \sum_{k=1}^{n-1} \cos \frac{2\pi k}{n} = 2(n-1) - 2 \operatorname{Re} \frac{e^{2\pi i} - e^{\frac{2\pi i}{n}}}{e^{\frac{2\pi i}{n}} - 1} = 2n.$$

Вычисление произведения модулей P с помощью формулы (1) не привело к быстрому результату, данное произведение всё же было вычислено, как в нашем коротком решении.

Замечание. Формулу (1) легко получить без комплексных чисел, зная угол при вершине правильного n -угольника и рассмотрев треугольник OA_1A_k , O – центр многоугольника. Из нее, переходя от квадратов синусов к косинусам двойных углов, можно получить слагаемые суммы S . Эту сумму можно также вычислить без комплексных чисел, находя сумму косинусов кратных дуг известным приемом: делим и домножаем всю сумму на $2 \sin \frac{2\pi}{n}$, а каждое произведение косинуса на синус в сумме представляем по тригонометрической формуле как разность синусов и приводим подобные.

Красивые цепочки синусов как дополнительный бонус. Несмотря на то, что второе решение задачи приводит к неполному ответу (частично совпадает с первым, находить произведение P приходится с помощью рассмотрения многочлена), полученная в этом решении формула (1), объединенная с результатом $P = n$, дает набор эффектных тригонометрических равенств. В самом деле, из формулы (1) получаем $P = 2^{n-1} \sin \frac{\pi}{n} \cdot \sin \frac{2\pi}{n} \cdot \dots \cdot \sin \frac{\pi(n-1)}{n}$. Замечая, что $\sin \frac{\pi(n-k)}{n} = \sin \frac{\pi k}{n}$, получим формулы для произведений квадратов синусов и приравняем их n (левая часть в общем виде различна в зависимости от четности n). Точно так же, используя полученный результат $S=2n$, выразим слагаемые суммы S по формуле (1), как и в произведениях, объединим одинаковые синусы, и получим общий вид суммы квадратов синусов. Например, получатся следующие формулы:

при $n = 7$

$$2^6 \sin^2 \frac{\pi}{7} \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{7} \cdot \sin^2 \frac{3\pi}{7} = 7; 4 \left(\sin^2 \frac{\pi}{7} + \sin^2 \frac{2\pi}{7} + \sin^2 \frac{3\pi}{7} \right) = 7;$$

при $n = 8$

$$2^6 \sin^2 \frac{\pi}{8} \cdot \sin^2 \frac{2\pi}{8} \cdot \sin^2 \frac{3\pi}{8} = 8; 2 \left(\sin^2 \frac{\pi}{8} + \sin^2 \frac{2\pi}{8} + \sin^2 \frac{3\pi}{8} \right) = 3$$

и так далее.

Результаты и выводы. Как мы видим на примере рассмотренной задачи, разные подходы к решению одной и той же задачи помогают студентам наглядно представить взаимосвязь разных тем курса математики, разных разделов и даже разных курсов (например, геометрия и комплексная переменная; алгебра, геометрия и математический анализ). При непосредственном участии в творческом обсуждении решения, порой нащупывая на ходу полезные ассоциации, студенты чувствуют вкус математического творчества, их интерес к занятиям растет, – это касается не только олимпиадной математики, но и математических учебных занятий вообще. Кроме того, при рассмотрении таких задач смешанной тематики могут возникать идеи новых олимпиадных задач: например, можно было бы рассмотреть полученные формулы с цепочками синусов как задачи на доказательство. Отметим, что методический прием решения задачи разными способами, его эффективность в преподавании математики и смежных дисциплин изучается педагогами [2], [3]. Также можно отметить, что, из-за сложностей согласования расписаний студентов разных курсов и направлений факультатив по олимпиадной математике проводится в дистанционном формате, а сами олимпиады студентов СПбПУ – в очном; поэтому коллективное обсуждение вариантов решения на факультативе является положительным примером творческой активности при смешанном формате занятий, подробно рассмотренном в статье [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://test.i-exam.ru/training/olymp/index.html> (задача 12. Дата обращения 08.01.2026).
2. Хадбаатар Б., Магсар Р. Решение одной задачи путем разных вариантов // Кронос: психология и педагогика. 2021. №2 (25). С. 26–38. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/reshenie-odnoy-zadachi-putem-raznyh-variantov> (дата обращения: 08.01.2026).
3. Нагаева М.В., Алифанов Р.Н., Стародубцев П.А. Алгоритмы решения метрических задач с использованием теории перпендикулярности // Вестник евразийской науки. 2018. №5. С. 1–10. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritmy-resheniya-metriceskih-zadach-s-ispolzovaniem-teorii-perpendikulyarnosti> (дата обращения: 08.01.2026).
4. Филимоненкова Н.В. Организационно-дидактическая модель смешанного обучения высшей математике // ДМ. 2025. №67. С. 71–87. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsionno-didakticheskaya-model-smeshannogo-obucheniya-vysshey-matematike> (дата обращения: 08.01.2026).

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА И СВОЙСТВ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА С ТИТАНОВОЙ МАТРИЦЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОРТОПЕДИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ

С.С. Иванов✉, И.М. Нужин, А.Г. Навроцкий, Е.А. Турчак, У.И. Янковская
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ ivanov.savva2005@yandex.ru

Введение. Проектирование новых биосовместимых металлических матричных композитов (ММК) для ортопедии является многопараметрической задачей, требующей поиска оптимального баланса между механической прочностью, низким модулем упругости (для предотвращения стресс-экранирования), пластичностью и стойкостью. Идеальный имплантационный материал должен сочетать высокую прочность, низкий модуль упругости (близкий к кости – 10-30 ГПа), отличную коррозионную стойкость в физиологической среде и полную биосовместимость [1]. Традиционный подход «проб и ошибок» ресурсозатратен. Целью данной работы является разработка подхода на основе машинного обучения для ускоренного прогнозирования свойств и оптимизации состава ММК на основе титана.

Литературный обзор и формирование датасета. В качестве первого этапа исследования проведен анализ современных исследований для формирования исходного набора данных, включающего состав сплава, технологические параметры и целевые свойства.

Сплав Ti-6Al-4V (BT6) долгое время являлся «золотым стандартом» в ортопедии и авиакосмической отрасли благодаря благоприятному сочетанию прочности, обрабатываемости и относительной биосовместимости [2]. Его состав регламентирован стандартами: 86.45-90.9% Ti, 5.3-6.8% Al, 3.5-5.3% V [3]. По данным, приведенным в [4], его типичные механические свойства: предел текучести ~880 МПа, предел прочности ~950 МПа, однако модуль упругости (Модуль Юнга) составляет около 110 ГПа. Несмотря на широкое применение, в долгосрочной перспективе ионы алюминия и ванадия, высвобождающиеся в результате коррозии и износа, проявляют цитотоксичность и потенциально могут вызывать неврологические осложнения [5, 6]. Высокий модуль упругости приводит к явлению «стресс-экранирования» – кость, несущая сниженную нагрузку, подвергается резорбции, что ведет к расшатыванию имплантата. Дополнительными недостатками являются низкая сопротивляемость сдвигу и склонность к схватыванию при трении [7].

Сплавы титана с ниобием (Ti-Nb) представляют наиболее изученный класс биосовместимых материалов с низким модулем упругости [1]. Ниобий (Nb) является β -стабилизатором, способствуя формированию объемно-центрированной кубической (ОЦК) β -фазы, которая характеризуется большей податливостью по сравнению с гексагональной (ГПУ) α -фазой чистого титана [8]. И Ti, и Nb относятся к «металлам-вентильям», образующим на поверхности в окислительных средах плотные пассивные оксидные пленки (TiO_2 , Nb_2O_5). Эти пленки, обладающие полупроводниковыми или изолирующими свойствами, обеспечивают исключительную коррозионную стойкость и биологическую инертность, делая сплавы Ti-Nb безопасными для длительного контакта с тканями организма [9]. Для сплава Ti-25Nb зарегистрирован модуль упругости в диапазоне 40–55 ГПа [1], что существенно ближе к костной ткани, чем у Ti-6Al-4V. Для Ti-25Nb в другой работе указано значение ~75 ГПа [8], а для Ti-30Nb также подтверждена низкая жесткость [9]. Это доказывает принципиальную возможность снижения упругости за счет легирования Nb.

Исследования в области высокоэнтропийных и многокомпонентных сплавов на основе титана направлены на поиск новых комбинаций свойств за счет эффекта замедленной диффузии и искажения кристаллической решетки. Например сплав Ti-Al-Nb-V

(Ti70Al15Nb10V5) указывают на сбалансированный набор свойств: плотность ~ 4.78 г/см³, удельная прочность ~ 153.67 МПа·см³/г и относительное удлинение $\sim 15.2\%$ [10]. Это демонстрирует потенциал для достижения высокой прочности.

В результате проведенного исследования были сформулированы следующие ключевые выводы обзора: бинарные сплавы Ti-Nb (Ti-25Nb, Ti-30Nb) подтвердили свой статус перспективных материалов благодаря исключительному сочетанию низкого модуля упругости (40–75 ГПа), высокой биосовместимости (отсутствие токсичных Al и V), отличной коррозионной стойкости и наличию эффектов памяти формы/суперэластичности при определенных составах; классический сплав Ti-6Al-4V (BT6) остается эталоном прочности (предел текучести ~ 880 МПа), однако его относительно высокий модуль упругости (~ 110 ГПа) и потенциальная цитотоксичность ионов Al и V стимулируют поиск альтернатив; многокомпонентные сплавы (например, Ti-Al-Nb-V) демонстрируют потенциал для достижения высоких значений удельной прочности, но их свойства и биосовместимость требуют дополнительного изучения, что повышает ценность их прогнозирования с помощью машинного обучения.

На основе литературного обзора были определены ключевые признаки для будущей модели: тип и содержание легирующих элементов (Nb, Al, V), а также целевые переменные: предел текучести, модуль упругости, относительное удлинение.

Метод. Исследование проводится по многоэтапному конвейеру (pipeline) данных, реализованному в среде Python с использованием библиотек scikit-learn, pandas, numpy, matplotlib, seaborn и XGBoost. Включает следующие этапы: предобработка данных и EDA, очистка, кодирование категориальных признаков, визуализация распределений и корреляций для выявления компромиссов (например, прочность - пластичность). На первом этапе был создан структурированный датасет на основе литературного обзора (как представлено выше). Данные агрегированы из научных статей и содержат информацию о составе, способе получения и механических свойствах титановых сплавов.

Name	Ti	Nb	V	H	Al	C	Co	Cr	Ca	Ni	Y	Cu	Sn	Zr	B	Mn	Fe	Mg	Si	La	Er	Zn	O	Degradation rates (mm/year)	Elastic modulus (GPa)	yield strength (MPa)	Corrosion rate (mm/year)	Elongation	
SL17L25	75																25									74			
Mg-22-10Sn															2														
CoCrNiTi0.3							23.26		23.26		23.26								23.26		97	1				112	350		
Ti-30Nb-6Sn	64												6					30									65.7		
Ti-30Nb-1Fe-25Sn	67												2					30									65.9		
Ti-30Nb-1Fe-45Sn	65												4					30									69		
Ti-30Nb-1Fe-45Sn	63												6					30									74.2		
Ti-30Nb-1Fe-45Sn	61												6					30									78.9		
Ti-30Nb-1Fe-45Sn	77												6					30									74.9		
Ti-30Nb-1Fe-45Sn	73												4					20									79.1		
Ti-30Nb-1Fe-45Sn	69												6					20									78.3		
Ti-30Nb-1Fe-45Sn	71												6					20									63.8		
Ti-30Nb-1Fe-45Sn	66												6					25									72.1		
Fe type Ti-Nb-Cu	132												4					43									73	339	
Ti	133.2																	13.1									4.2-16.5		
Ti-3	23.2																	17.1									4.2-16.5		
Zr01														0.7															
Mg-15Ca														1															
Mg-0.45Ca														0.45														0.32	
Mg-0.2Ca-0.2La														0.2														0.23	
Mg-0.22Ca-0.4Mg																												0.31	
Mg-0.22Ca-0.4Mg																												0.3	
Mg-0.22Ca-0.4Mg																												0.19	
Mg-0.22Ca-0.15V																												0.49	
Mg-0.22Ca-0.15V-0.35Ca																												0.34	
X1																													
XN100															0.7		0.0021											90	10.2
XN11															0.7		0.001											168	
AP1															0.7		0.005											177	19.7
AP2															0.7		0.003												6.9
AP3																													
AP4																													
AP5																													
AP6																													
AP7																													
AP8																													
AP9																													
AP10																													
AP11																													
AP12																													
AP13																													
AP14																													
AP15																													
AP16																													
AP17																													
AP18																													
AP19																													
AP20																													
AP21																													
AP22																													
AP23												</																	

Рис. 1. Снимок экрана из графического редактора таблиц: фрагмент сформированного датасета для обучения моделей.

Данные разделены на обучающую и тестовую выборки с сохранением стратификации по типам сплавов для обеспечения репрезентативности.

Таблица 1. Характеристика наборов данных, диапазон значений целевого признака

Источник	Кол-во сплавов	Средний YS (МПа)	Max YS (МПа)	Min Yield (МПа)
Обучающий датасет	46	181	1199	-
Валидационный датасет	68	202	347	28
Наши предсказания	4	227	318	135

Таблица 2. Сравнение метрик качества моделей на тестовой выборке

Номер предсказанного сплава	Размер тестовой выборки (% от общего кол-ва данных)	Точность (Precision)	Полнота (Recall)
0	20,00	1,00	1,00
1	25,00	0.6667	1,00
2	30,00	1,00	0.6667
3	35,00	0.6667	0.6667

Таблица 3. Состав предсказанных сплавов с разным разбиением датасета на выборки, сравнение их теоретических свойств с экспериментальными данными

Name	Ti	V	Al	Nb	yield strength (Mpa) generated	yield strength (Mpa) experimental
20,00	76.1			23.90	135,00	450-650
25,00	77.4			22.60	135,11	400-600
30,00	77.7	2,00	3,10	17.20	317,96	700-900
35,00	90.2	3,80	6,00		318,00	830-950

Для интерпретируемых моделей был проведен анализ важности признаков, позволяющий определить, какие химические элементы и технологические параметры вносят наибольший вклад в прогноз прочности.

Таблица 4. Важность признаков

Ранг	Элемент	Важность (условная степень влияния на свойство сплава)	Содержание в датасете (%)
1	Ti	1,00	38.802
2	V	0.5358	0.520
3	Nb	0.3750	10.630
4	Zr	0, 089	0.754
5	Y	<0.001	0.060
6	Sn	<0.001	1.348
7	Si	<0.001	0.008
8	Ni	<0.001	0.506
9	Nd	<0.001	0.001
10	Al	<0.001	0.783
11	C	<0.001	0.001
12	Mn	<0.001	0.119
13	H	<0.001	0.001
14	Cu	<0.001	0.088
15	Cr	<0.001	0.506

Результаты. В результате работы будет создан программный прототип, способный предлагать перспективные составы металлматричных композитов с прогнозируемым набором свойств. Это позволит существенно сузить область экспериментального поиска и

сократить время на разработку новых биосовместимых материалов для имплантологии. Дальнейшее развитие проекта предполагает расширение датасета за счет данных об упрочняющих добавках (керамических и углеродных) и параметрах технологической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moisa M. et al. Insights into the biocompatibility of human gingival fibroblasts cultured on a hydroxyapatite-coated new Ti-Nb Alloy. New perspectives for dentistry? // *Ceramics International*. 2025. Vol. 51, № 22. P. 36525-36536. Doi:10.1016/j.ceramint.2025.05.367
2. Wei S., Wang X., Shu T. Decoupled influence of chemical compositions and nanotopographies on the hydrophilicity of nanotextured Ti-6Al-4 V implants: Insights from molecular dynamics simulations // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2025. Vol. 704. P. 139464. Doi:10.1016/j.jcis.2025.139464.
3. ГОСТ 19807-91. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.splav-kharkov.com/gost/627.pdf
4. Boyer R., Welsch G., Collings E.W. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys* // ASM International, Materials Park, OH. 1994.
5. Zhong Q, Pan X, et al. Prosthetic Metals: Release, Metabolism and Toxicity // *Int J Nanomedicine*. 2024 Vol. 19. P.5245-5267. doi: 10.2147/IJN.S459255.
6. Khadija G., Ayisha S., et al. Short term exposure to Titanium, Aluminum and Vanadium (Ti 6Al 4V) alloy powder drastically affects behavior and antioxidant metabolites in vital organs of male albino mice // *Toxicology Reports*. 2018. Vol. 5. Doi:10.1016/j.toxrep.2018.06.006.
7. Baker B., Wisdom K. Additively Manufactured Ti-6Al4V before and after Hot Isostatic Pressing // *World Journal of Engineering and Technology*. 2021. Vol. 9 №.2. P. 268-284. doi: 10.4236/wjet.2021.92019.
8. Santos R.R., Elias C.N., Ferreira E.A., et al. Characterization of thin oxide layers formed by Ti-Nb alloy anodization // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 33. P. 2519-2529. Doi:10.1016/j.jmrt.2024.09.213.
9. Kuroda P.A.B., Cardoso G. C., Grandini C.R. The effect of Nb on the formation of TiO₂ anodic coating oxide on Ti-Nb alloys through MAO treatment // *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 29. P. 1165-1171. Doi:10.1016/j.jmrt.2024.01.210.
10. Liu Y., He Y., Zhang Zh. BCC Lightweight Ti-Based Multi-Principal Element Alloy Ti₇₀Al₁₅Nb₁₀V₅ with Good Specific Strength and Ductility // *Physics of Metals and Metallography*. 2025. Vol. 126. P. 703-713. Doi:10.1134/S0031918X24602658.

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ ПОДГОТОВКИ К МАТЕМАТИЧЕСКИМ ОЛИМПИАДАМ ДЛЯ УЧАЩИХСЯ 5-6 КЛАССОВ

П.Д. Ижак✉

Нижегородский государственный педагогический университет им.К.Минина, Н.Новгород

✉ Polina_izhak@mail.ru

Введение. Вопрос организации подготовки к олимпиаде по математике в 5-6 классах представляет собой актуальную задачу, направленную на выявление и развитие математических способностей учащихся [1]. Цель данной работы заключается в разработке и внедрении эффективной модели подготовки, которая будет учитывать возрастные и психофизиологические особенности школьников, а также соответствовать современным образовательным стандартам. Проблема, с которой сталкиваются педагоги, заключается в недостаточной структурированности существующих программ, что может приводить к перегрузкам и снижению интереса к математике.

Актуальность исследования определяется необходимостью создания системы, способствующей не только подготовке к олимпиадам, но и формированию устойчивой мотивации к изучению математики. В условиях растущей конкуренции на образовательном рынке важно обеспечить учащимся возможности для раскрытия их потенциала [2]. В рамках данного исследования выделяются три основные задачи: анализ существующих методик подготовки, разработка интегрированной модели обучения и апробация предложенных решений в учебном процессе.

Методология исследования включает в себя как теоретический анализ, так и практическое внедрение разработанной модели в условиях общеобразовательной школы. Объектом исследования выступают учащиеся 5-6 классов, которые участвуют в олимпиадах по математике. Исследование направлено на изучение влияния различных форматов занятий на успеваемость и мотивацию учащихся, а также на определение критериев их эффективности.

Таким образом, реализация предложенной модели подготовки к олимпиадам может способствовать не только повышению результатов учащихся, но и формированию у них интереса к математике как к предмету. Внедрение элементов геймификации и системы поощрений в учебный процесс позволит создать положительную атмосферу для обучения и развить соревновательный дух. Практические рекомендации, выработанные в ходе исследования, помогут педагогам оптимизировать процесс подготовки и повысить его эффективность.

Трехуровневая модель подготовки: теоретические основания и структура. Теоретической основой предлагаемой модели служит концепция зоны ближайшего развития Л.С. Выготского и принципы дифференцированного обучения [3]. Подготовка строится не как линейное «натаскивание» на сложные задачи, а как поступательное движение от простого к сложному, гарантирующее каждому ученику опыт успеха и точку роста.

Ядро модели составляет трехуровневая система заданий, применяемая к каждому тематическому блоку олимпиадной программы (логические задачи, задачи на возраст, геометрические задачи и т.д.).

1. Базовый (стартовый) уровень. Направлен на устранение понятийных пробелов, отработку базовых алгоритмов и снятие психологического барьера перед «олимпиадной» математикой. Задания этого уровня тесно связаны с материалом основной школьной программы, что демонстрирует ученикам преемственность знаний. (Пример: задачи на различение операций «старше на» и «старше в»).

2. Технологический (основной) уровень. Фокусируется на освоении ключевых методов решения олимпиадных задач (составление уравнений, построение таблиц, метод перебора, принцип Дирихле). Главная дидактическая задача — показать вариативность подходов к решению и научить выбирать оптимальную стратегию.

3. Творческий (олимпиадный) уровень. Включает нестандартные задачи, требующие комбинации методов, выдвижения гипотез и их доказательства. Работа на этом уровне развивает гибкость мышления, умение анализировать и преодолевать интеллектуальные затруднения.

Переход с уровня на уровень является ключевым критерием формирующего оценивания, смещая фокус с фиксации ошибок на фиксацию прогресса и индивидуальных достижений ученика [4].

Практическая реализация модели на примере блока «Задачи на возраст». По результатам анализа заданий школьного этапа Всероссийской олимпиады школьников по математике для 5 класса, задачи на определение возраста являются одним из наиболее распространенных и важных тематических блоков [5]. Предлагаемая трехуровневая система для данного блока выглядит следующим образом.

3.1. Базовый уровень: ликвидация «понятийных ловушек»

Цель — сформировать четкое понимание условий. Используются простые задачи на прямые вычисления и задачи из основного учебника, переформулированные в олимпиадном ключе.

Задача 1 (адаптировано из [6]): Внук моложе дедушки на 48 лет. Запиши формулу, выражающую возраст дедушки через возраст внука. Найди по формуле возраст дедушки, если внуку 11 лет.

Данная задача учит формализации условия, что является первым шагом к решению более сложных задач алгебраическим методом.

3.2. Технологический уровень: освоение методов

Цель — научить переводить текстовое условие в математическую модель. Активно используются методы уравнения и таблиц.

Задача 2: Сейчас брату 4 года, а сестре 12. Сколько лет будет брату, когда сестра будет вдвое старше его? (Решение методом составления таблицы и уравнения).

Задача 3: Мама старше дочери на 24 года. Через 5 лет мама будет старше дочери в 3 раза. Сколько лет дочери сейчас? (Решение с помощью уравнения с одной переменной).

3.3. Творческий уровень: применение методов в нестандартной ситуации

Цель — развитие способности анализировать сложные, многоходовые условия.

Задача 4 (по мотивам [5]): Семья состоит из отца, матери и сына. Сейчас сумма их возрастов 62 года, а 7 лет назад была 44 года. Сколько лет отцу, если он старше сына на 24 года? Решение требует анализа «лишних» лет и понимания, что 7 лет назад сын мог не родиться.

Задача 5: Когда Кошей Бессмертный познакомился с Бабой Ягой, он был в 6 раз её старше. Сейчас Кошей 2025 лет, а Бабе Яге 480. Сколько лет прошло с момента знакомства? Решение требует введения двух переменных и составления системы уравнений.

Такое структурирование материала позволяет педагогу гибко формировать индивидуальные образовательные маршруты в рамках групповых занятий.

Интеграция проектной деятельности и цифровых инструментов. Для поддержания высокой учебной мотивации и создания устойчивого сообщества учащихся модель дополнена проектной компонентой — созданием и ведением ученического канала в мессенджере «МАХ» «Математика 5+». Цифровая среда выполняет несколько ключевых функций:

1. Мотивационная: Ученик становится не потребителем, а создателем образовательного контента (автор задач, редактор, модератор).

2. Учебная: Канал служит платформой для публикации анонсов, дополнительных материалов, разборов задач и «лайфхаков».

3. Коммуникативная: Формирует пространство для неформального общения, обмена идеями и взаимопомощи, выходящее за рамки урочного времени [7].

Примерная структура наполнения канала:

ЗадачаДня с указанием уровня сложности.

ЛайфхакНедели: краткий видео- или текстовый разбор полезного приема (например, «Как составить таблицу для задачи на возраст»).

МояЗадача: рубрика для публикации авторских задач от учеников.

Турнир: анонсы внутренних онлайн-соревнований с интерактивными опросами и голосованиями.

Аналогичный проектный подход применяется и к другим блокам. Например, в рамках темы «Геометрические задачи на составление фигур» в канале может быть запущена рубрика #ФигураНедели, где участники публикуют фотографии фигур, сложенных из танграма или полимино, и предлагают друг другу повторить или усложнить конструкцию.

Заключение и перспективы. Представленная трехуровневая модель подготовки к математическим олимпиадам для учащихся 5-6 классов представляет собой целостную методическую систему. Её ключевые преимущества:

1. Дифференциация и доступность: Модель обеспечивает индивидуальный прогресс за счет четко структурированных уровней сложности.

2. Методологическая ясность: Акцент делается не на решении максимального количества задач, а на освоении ключевых методов и развитии математического мышления.

3. Мотивационная устойчивость: Интеграция проектной деятельности в цифровой среде переносит познавательный интерес во внешкольный контекст, формируя устойчивое учебное сообщество.

Апробация модели в условиях общеобразовательной школы показала положительную динамику как в росте олимпиадных результатов учащихся, так и в повышении их интереса к предмету. Перспективными направлениями дальнейшего исследования являются разработка аналогичных трехуровневых модулей для других тематических блоков (комбинаторика, теория чисел), а также создание цифрового тренажера на базе чат-бота для автоматизации проверки заданий базового и технологического уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подлипский О.К. Работа с одаренными детьми: система подготовки к олимпиадам по математике / О.К. Подлипский // Математика в школе. – 2020. – № 5. – С. 34-40.
2. Агаханов Н.Х., Подлипский О.К. Всероссийские олимпиады школьников по математике 1993-2009 / Н.Х. Агаханов, О.К. Подлипский. – М.: МЦНМО, 2010. – 552 с.
3. Выготский Л.С. Мышление и речь / Л.С. Выготский. – М.: Лабиринт, 1999. – 352 с.
4. Бурмистрова Т.А. Формирующее оценивание в математическом образовании школьников / Т.А. Бурмистрова // Народное образование. – 2019. – № 3. – С. 123-129.
5. Разбор заданий школьного этапа ВсОШ по математике для 5 класса, 2023/24 учебный год [Электронный ресурс] // 2023_Математика_5 класс_группа 3.pdf. — URL: filesolym_standart.php.
6. Виленкин Н.Я. Математика. 5 класс: учебник для общеобразовательных учреждений / Н.Я. Виленкин, В.И. Жохов, А.С. Чесноков, С.И. Шварцбурд. – М.: Мнемозина, 2020. – 280 с.
7. Джалилова Ф.Г. Использование социальных сетей в образовательном процессе: возможности и риски / Ф.Г. Джалилова // Информатика и образование. – 2021. – № 6. – С. 45-52.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ИЗ ДВУХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПО ВРЕМЕННЫМ РЯДАМ ОДНОЙ ИЗ ПЕРЕМЕННЫХ

А.А. Капустников✉, И.В. Сысоев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

✉ anton.kapustnikov.02@mail.ru

Введение. Идентификация моделей и реконструкция их параметров по экспериментальным данным является одной из самых значимых прикладных задач, особенно, когда появляются методы, которые позволяют сделать это через косвенные вычисления. Последний критерий становится особенно значимым, когда речь заходит о сложных системах, в которых некоторые переменные невозможно измерить с помощью имеющейся на данный момент техники. Здесь мы создаем метод идентификации динамических систем второго порядка по скалярному временному ряду — ряду одной переменной модели. Рассматриваемый класс реконструируемых обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) очень широк. Хотя он не охватывает все возможные ОДУ второго порядка, рассматриваемый класс включает в себя множество популярных моделей из разных областей, например, три популярные нейронные модели: модель ФитцХью-Нагумо [1-2], модель Уилсона-Коуэна [3-4] и модель Морриса-Лекара [5], система Лотки-Вольтерра [6] и даже модель динамики p53-белка в ДНК, которая относится к изменению концентрации белка-супрессора опухоли p53 в ответ на клеточный стресс [7].

Модель и метод. В данной работе рассматривается обобщенное уравнение для класса ОДУ 2-ого порядка и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= f(u) + v \cdot g(u), \\ \frac{dv}{dt} &= h(u) + v \cdot \varphi(u),\end{aligned}\tag{1}$$

где u и v — две динамические переменные; t — время; f , g , h и φ — произвольные непрерывные функции. Хотя система (1) не является наиболее общим классом ОДУ 2-го порядка, многие хорошо известные и очень важные для прикладных систем могут быть описаны в представленном виде.

Выразим переменную v из первого уравнения системы (1):

$$v = \frac{1}{g(u)} \cdot \frac{du}{dt} - \frac{f(u)}{g(u)}.\tag{2}$$

Затем, подставим её во второе уравнение системы (1):

$$\frac{dv}{dt} = h(u) + \left(\frac{1}{g(u)} \cdot \frac{du}{dt} - \frac{f(u)}{g(u)} \right) \cdot \varphi(u).\tag{3}$$

После чего проинтегрируем уравнение (3) по времени и получим уравнение для переменной v , которое зависит только от переменной u :

$$v = \int \left(h(u) - \frac{\varphi(u) \cdot f(u)}{g(u)} \right) dt + \int \frac{\varphi(u)}{g(u)} du.\tag{4}$$

Теперь введем несколько новых обозначений:

$$H(u) = h(u) - \frac{\varphi(u) \cdot f(u)}{g(u)} \approx \sum_{i=0}^P \alpha_i \cdot (u - u_0)^i,\tag{5}$$

$$G(u) = \int \frac{\varphi(u)}{g(u)} du,$$

$$U_i = \int (u - u_0)^i dt,$$

где $G(u)$ — новая неизвестная функция, которую можно дифференцировать, поскольку она является первообразной непрерывной функции $\frac{\varphi(u)}{g(u)}$ (возможно, за исключением некоторых точек, где $g(u) = 0$); мы также предполагаем, что константа интегрирования является частью функции $G(u)$. $H(u)$ — это еще одна непрерывная функция от u , возможно, за исключением

некоторых точек, где $g(u) = 0$. Мы разложили функцию $H(u)$ в ряд Тейлора вблизи некоторой произвольной точки u_0 , которую можно выбрать для некоторого удобства, например, чтобы исключить среднее значение u .

Теперь используя новые обозначения из (5) подставим переменную v из (4) в первое уравнение системы (1):

$$\frac{du}{dt} = f(u) + \left(G(u) + \sum_{i=0}^P \alpha_i \cdot U_i \right) \cdot g(u). \quad (6)$$

И перепишем уравнение (6) следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \Phi(u) + g(u) \cdot \sum_{i=0}^P \alpha_i \cdot U_i, \\ \Phi(u) &= f(u) + G(u) \cdot g(u) = f(u) + g(u) \cdot \int \frac{\varphi(u)}{g(u)} du, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\Phi(u)$ – новая непрерывная функция. Эта функция может быть выражена из первого уравнения (7) следующим образом:

$$\Phi(u) = \frac{du}{dt} - g(u) \cdot \sum_{i=0}^P \alpha_i \cdot U_i. \quad (8)$$

Идентификация уравнения (8) гораздо выгоднее, чем исходной системы (1), поскольку, во-первых, нам больше не нужно аппроксимировать ряд скрытой переменной v ; во-вторых, у нас есть только две неизвестные функции и третья, разложенная в ряд, вместо четырех неизвестных функций. Если мы рассмотрим гладкость функции $\Phi(u)$ для построения целевой функции $S(\alpha_i)$ вместо прямой аппроксимации $\frac{du}{dt}$, это позволит исключить еще одну нелинейную функцию.

В общем виде целевая функция задается следующим образом:

$$\begin{aligned} S(\alpha_i) &= \sum_{n=1, p_n \neq 0}^N \delta_n^2, \\ \delta_n &= \Phi(u(n)) - \Phi(u(p_n)), \end{aligned} \quad (9)$$

где N – длина временного ряда; а $u(n)$ – значение u ; измеренное в момент времени t_n ; p_n – индекс для предыдущего элемента, в новом отсортированном по возрастанию величины $u(n)$ ряду, по отношению к $u(n)$ элементу. Поскольку $\Phi(u)$ – непрерывная функция, то если $|u(n) - u(p_n)|$ мало, то $|\delta_n|$ тоже мало. А также мы должны принять дополнительное условие, что для первой точки в отсортированном ряду нет предшественника.

После реализации данной методики мы получаем две функции $\Phi(u)$. Функцию из уравнения (8) назовем $\Phi_{num}(u)$, она получается путем оптимизации целевой функции, с использованием экспериментального временного ряда для переменной u . Чтобы идентифицировать конкретную модель, мы должны сопоставить данную функцию с аналитически посчитанной для каждой конкретной модели функцией из уравнения (7), которую мы назовем $\Phi_{mod}(u)$. Для оценки качества подгонки $\Phi_{mod}(u)$ к $\Phi_{num}(u)$ может быть использована нормализованная среднеквадратическая ошибка ε_Φ^2 :

$$\varepsilon_\Phi^2 = \frac{1}{\sigma_\Phi^2 \cdot N} \sum_{n=1}^N (\Phi_{num}(u(n)) - \Phi_{mod}(u(n)))^2, \quad (10)$$

где σ_Φ^2 – дисперсия $\Phi_{num}(u)$ в рассматриваемом диапазоне $[u_{min}; u_{max}]$ (для измеренных значений u), N обозначает эффективное число точек, используемых для вычисления $\Phi_{num}(u)$ (за исключением некоторых точек, удаленных в связи с вычислением производной).

Результаты. Для тестирования предложенного метода мы сгенерировали временные ряды из всех пяти систем, описанных во введении, с четырьмя различными уровнями аддитивного шума измерений: без шума, с шумом в 0.1% (т.е. стандартное отклонение шума составляло 0.001 от стандартного отклонения сигнала), с 1% шума и с шумом в 10%. Во всех случаях использовался некоррелированный шум с нормальным распределением и нулевым средним значением. В результате были получены и рассмотрены 20 временных рядов переменной u . Все пять систем рассматривались в периодическом режиме, переходная динамика

была исключена. Результаты идентификации по моделируемым данным подтверждают удобство использования метода: во всех рассмотренных случаях система была идентифицирована правильно, а восстановленные нелинейные функции имели форму, аналогичную исходной. Однако, видны возможные проблемы и недостатки в методе, которые требуют дальнейшего рассмотрения и улучшения для повышения качества процедуры идентификации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-12-00176.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. FitzHugh, "Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane," Biophysical J., vol. 1, pp. 445–466, 1961.
2. J. Nagumo, S. Arimoto, and S. Yoshizawa, "An active pulse transmission line simulating nerve axon," Proc. IRE, vol. 50, pp. 2061–2070, 1962.
3. H. R. Wilson and J. D. Cowan, "Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons," Biophysical Journal, vol. 12, no. 1, pp. 1–24, 1972.
4. H. R. Wilson, "Simplified dynamics of human and mammalian neo- cortical neurons," Journal of Theoretical Biology, vol. 200, no. 4, pp. 375–388, 1999.
5. C. Morris and H. Lecar, "Voltage oscillations in the barnacle giant muscle fiber," Biophysical Journal, vol. 35, no. 1, pp. 193–213, 1981.
6. A. J. Lotka, "Contribution to the theory of periodic reaction," J. Phys. Chem., vol. 14, no. 3, p. 271–274, 1910.
7. G. Demirkiran, G. Kalaycı Demir, and C. Güzelis, "Two-dimensional polynomial type canonical relaxation oscillator model for p53 dynamics," IET Systems Biology, vol. 12, no. 4, pp. 138–147, 2018.

РАЗРАБОТКА ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЙ МОДЕЛИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЯДРА КОМЕТЫ

И.А. Керестень¹✉, Н.Ю. Быков¹, В.В. Захаров², А.Я. Лукин¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²LIRA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université Paris Cité, Meudon, France

✉ keresten_ia@spbstu.ru

Введение. Исследование комет является важной и актуальной задачей [1, 2]. Во-первых, кометы представляют собой “остатки” материала начальной стадии формирования Солнечной системы. То есть кометы являются “капсулами времени”. Новые данные о структуре и составе кометных ядер позволят развить эволюционную модель Солнечной системы. Согласно ряду гипотез, кометы могут являться источником появления воды и зарождения жизни на нашей планете. Во-вторых, кометы потенциально представляют собой опасность с точки зрения возможного столкновения с Землей. Прогнозирование их активности необходимо для проведения высокоточных расчетов траекторий их движения.

Кометы представляют собой малые небесные тела, состоящее из льдов различной природы (прежде всего H_2O , CO_2 , CO) и тугоплавких элементов (минералов, органических веществ и пр.) [3]. Проведенные исследования комет (например, 67P/Чурюмова-Герасименко) показывают очень неравномерную морфологию поверхности кометного ядра, содержащего перемежающиеся участки разного состава и структуры [1].

Одним из основных вопросов является отсутствие надежных данных о структуре поверхностного слоя ядра кометы и механизмах выброса фрагментов твердого вещества с поверхности [1]. Существует ряд предположений о природе таких выбросов: унос пыли потоком сублимированных летучих соединений с поверхности кометы, гейзерный механизм выброса из глубины поверхностного слоя и пр. Однако, в литературе не рассматривался механизм разрушения поверхностного слоя под действием термоупругих деформаций (ТД), ведущих к появлению трещин и отслоению фрагментов поверхностного слоя. Изучению такого механизма посвящена настоящая работа.

Появление ТД связано с неравномерным нагревом (охлаждением) поверхностного слоя ядра как в пространстве, так и во времени под действием солнечного излучения (например, из-за вращения ядра). Учет ТД требует решения двух задач – тепловой (определение нестационарного теплового поля) и прочностной (разрушение поверхности).

Постановка задачи и результаты расчетов.

А) Общая постановка. Коэффициенты теплового расширения тугоплавких элементов и льда существенно различаются, поэтому основные ТД возникают именно в ледяной составляющей и могут служить одним из механизмов разрушения поверхностного слоя кометы. Поскольку наличие вкраплений минералов (пыли) в лед ведет к увеличению разрушительных последствий ТД, для получения предельных оценок рассматривается ситуация, когда их содержание близко к нулю. Таким образом, моделируется канал в твердой, мало расширяющейся фазе, заполненный льдом или близкой по теплофизическим свойствам замерзшей водно-пылевой смеси. Рассчитываются механические напряжения в этом канале, возникающие в результате ТД при неравномерном нагреве, по их величине можно сделать вывод о возможности появления трещин и последующего разрушения.

Численные модели реализованы с использованием программной системы конечно-элементного анализа ANSYS (ANSYS Inc.). Расчеты проводились на 6-ядерном компьютере с процессором Intel i7 и 64 Гб RAM.

Б) Тепловая модель. В данной работе рассматривается “стандартная” тепловая модель приповерхностного слоя ядра кометы, предполагающая учет теплофизических свойства гомогенного льда [4]. Решается уравнение теплопроводности, описывающее нестационарный одномерный процесс распространения тепла в глубину слоя ядра кометы. Граничные условия расчетной модели включают радиационное излучение, тепловой поток энергии от Солнца и испарение льда на внешней границе.

Расчеты на базе тепловой модели (рис. 1) позволяют определить амплитуду колебаний температуры в приповерхностном слое и глубину, на которой данные температурные изменения, связанные с процессом вращения кометы являются существенными. На рис. 1 приведены зависимости температуры от глубины для наиболее показательных дневной и ночной сторон кометы. Также на рис. 1 приведено распределение нагрева дневной стороны кометы относительно значения температуры на максимальной глубине прогревания. Этот размах температуры, в дополнение к кинематическим и силовым граничным условиям, влияет на решение термонапряженной задачи.

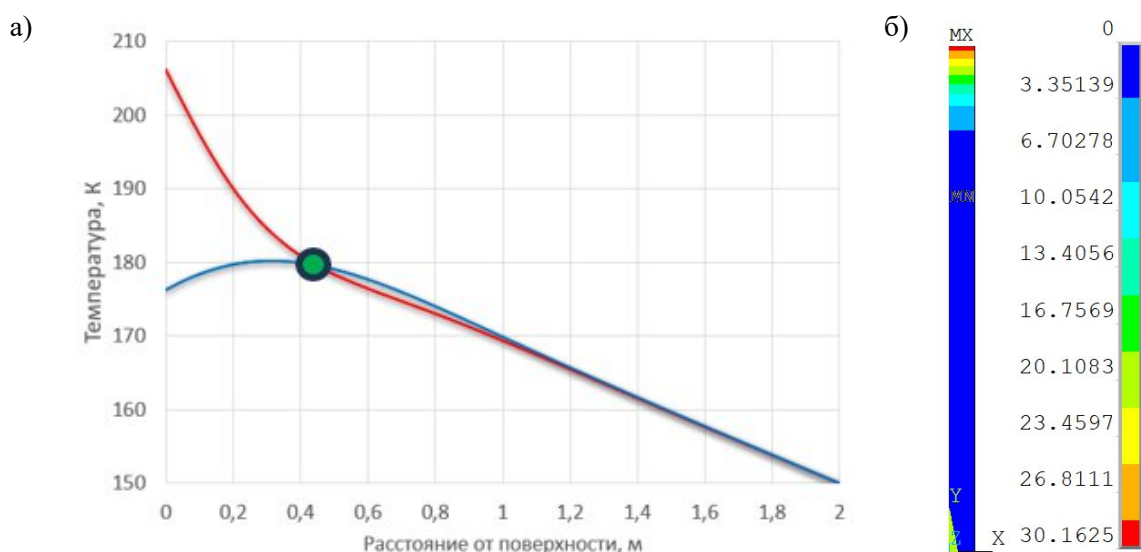


Рис. 1. Результаты решения тепловой задачи для точки на экваторе кометы: а) распределение температуры в зависимости от расстояния от поверхности кометы (прогрев до температуры 179.53 К на глубине 0.449 м); б) нагрев дневной стороны кометы.

В) Прочностная модель. После решения тепловой задачи и определения размаха температуры становится возможным решение термонапряженной задачи и определение напряженно-деформированного состояния приповерхностного слоя кометы не только вследствие механических (кинематических и силовых) граничных условий, но и с учетом ТД. Для определения напряженно-деформированного состояния используется математическая модель теории упругости в равновесном состоянии и закон Гука [5].

Для решения термонапряженной задачи теплофизические свойства гомогенного льда необходимо дополнить механическими свойствами (модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент температурного расширения) [6]. Конкретные кинематические и силовые граничные условия определяются геометрической конфигурацией и окрестностью приповерхностного слоя ядра кометы. В результате решения термонапряженной задачи можно определить деформированное состояние и компоненты тензора напряжений. При наличии сведений о структуре приповерхностного слоя кометы и пределе прочности на разрушение можно определить наличие или отсутствие области, превышающей предел прочности на разрушение и как следствие, ответить на искомый вопрос – может ли комета разрушаться

вследствие ТД. На рис. 2 приведены результаты расчетов на базе прочностной модели для дневной стороны кометы.

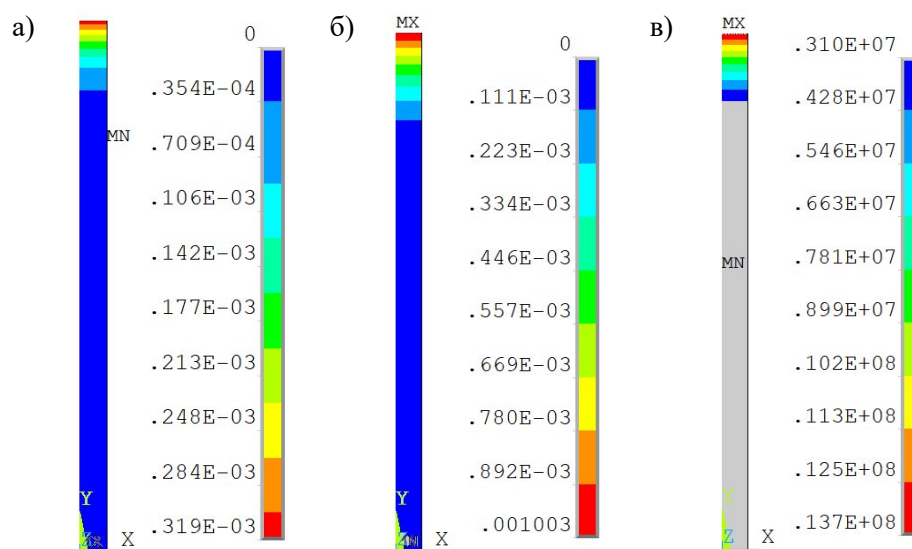


Рис. 2. Результаты решения термонапряженной задачи для точки на экваторе кометы: а) распределение компоненты вертикальных перемещений; б) распределение ТД; в) распределение эквивалентных по Мизесу напряжений.

Выводы. Механизм разрушения вследствие ТД может иметь место. Согласно сделанным оценкам в упругой постановке, глубина разрушаемого слоя может достигать 35 см, что находится в согласии с наблюдаемыми в коме крупными фрагментами кометного вещества.

В дальнейшем планируется включение в расчет критерия разрушения для определения массо-инерционных характеристик разрушаемых фрагментов и их дальнейшего движения, а также уточнение структуры кометного вещества.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-12-00299.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thomas N. An Introduction to Comets : post-Rosetta perspectives. Astronomy and Astrophysics Library. 2020. 503 p.
2. Еленин Л.В. Кометы. Странники Солнечной системы. Москва : Эксмо. 2024. 304 с.
3. Güttler C., Mannel T., Rotundi A., Merouane S., Fulle M., Bockelée-Morvan D., Lasue J., Levasseur-Regourd A.C., Blum J., Naletto G., Sierks H., Hilchenbach M., Tubiana C., Capaccioni F., Paquette J.A., Flandes A., Moreno F., Agarwal J., Bodewits D., Bertini I., Tozzi G.P., Hornung K., Langevin Y., Krüger H., Longobardo A., Della Corte V., Tóth I., Filacchione G., Ivanovski S.L., Mottola S., Rinaldi G. Synthesis of the morphological description of cometary dust at comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // A&A. 2019. Vol. 630. No. A24. 15 p.
4. Groussin O, Attree N, Brouet Y, Ciarletti V, Davidsson B, Filacchione G, Fischer H-H, Gundlach B, Knapmeyer M, Knollenberg J, Kokotanekova R, Kührt E, Leyrat C, Marshall D, Pelivan I, Skorov Y, Snodgrass C, Spohn T, Tosi F. The thermal, mechanical, structural, and dielectric properties of cometary nuclei after Rosetta // Space Sci Rev. 2019. Vol. 215. No. 29. pp. 51.
5. Кац А.М. Теория упругости: учебник. 2-е изд., стер. СПб.: Лань. 2002. 207 с.
6. Hirata N., Morishima R., Ohtsuki K., Nakamura A.M. Disruption of Saturn's ring particles by thermal stress // Icarus. 2022. Vol. 378. pp. 114919.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗ ТОЧКИ РАВНОВЕСИЯ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-МОДЕЛЕЙ ТОЧЕК ЛАГРАНЖА СИСТЕМЫ СОЛНЦЕ-ЗЕМЛЯ В ИНЖЕНЕРНОЙ ПРАКТИКЕ

З.С. Костина✉, Е.В. Гайлит

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

✉ Kostina.zs@edu.spbstu.ru

Аннотация. В работе определяется положение точек Лагранжа системы Солнце – Земля и создана модель движения в трёх измерениях. Для решения данной проблемы моделируется с использованием программы “Vectary”. Этот вопрос интересен в изучении динамики движения малых тел, например, космических аппаратов разного назначения. Созданная модель движения с использованием изображений, смоделированных в онлайн программе «Vectary», позволяет иллюстрировать гравитационное взаимодействие космических объектов.

Целью данной статьи является определение положения точек Лагранжа системы Солнце – Земля и создание объемной модели движения в трёх измерениях.

Введение. Каждое массивное тело в космосе, будь то планета или звезда, словно бы лежит на дне гравитационного колодца, и Земля - не исключение. Точки Лагранжа[1] системы Солнце-Земля, представляющие собой гравитационно-балансированные орбитальные позиции, превращаются из чисто теории астрофизики в инструмент инженерного проектирования. Трёхмерное моделирование этих точек открывает новые возможности для создания космических аппаратов, телескопов и научных станций следующего поколения.[4]

Формализация задачи. Точки, что лежат на прямой, соединяющей массивные тела (первая, вторая и третья) носят название коллинеарных. Четвертая и пятая точки называются треугольными или троянскими.[2]

Расположим начало координат в центре самого массивного тела (Солнца), ось x направим к менее массивному телу[3], а ось y перпендикулярно x . Тогда координаты первых трех точек запишутся следующим образом (1):

$$\begin{aligned}r_1 &= (R[1 - (\frac{\alpha}{3})^{\frac{1}{3}}]; 0) \\r_2 &= (R[1 + (\frac{\alpha}{3})^{\frac{1}{3}}]; 0) \\r_3 &= (-R[1 + \frac{5}{12}\alpha]; 0) \\ \alpha &= \frac{M_1}{M_1 + M_2},\end{aligned}\tag{1}$$

где R - расстояние между телам, M_1 - масса более массивного тела, M_2 - масса второго тела.

Четвертая и пятая точки уже будут иметь координату по y , и их радиус-вектор запишется следующим образом (2):

$$\begin{aligned}r_4 &= (\frac{R}{2}\beta; \frac{\sqrt{3}R}{2}) \\r_5 &= (\frac{R}{2}\beta; -\frac{\sqrt{3}R}{2}) \\ \beta &= \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2}.\end{aligned}\tag{2}$$

Практическое применение точек Лагранжа. Точки Лагранжа имеют огромный потенциал для космических исследований. Например, в точке L1 системы Земля— Солнце удобно разместить космическую солнечную обсерваторию — она никогда не будет попадать в тень Земли, а значит наблюдения могут вестись непрерывно.

Точка L2 подходит для космического телескопа — здесь Земля почти полностью заслоняет солнечный свет, да и сама не мешает наблюдениям, поскольку обращена к L2 неосвещенной стороной. Аппараты долгое время могут работать в L-точках с минимальными затратами энергии, почти не расходуя ее на корректировку своего положения, чем уже пользуются астрофизики. Например, телескоп «Джеймс Уэбб» в точке L2 расходует на поддержание позиции в несколько раз меньше топлива, чем аналогичный аппарат на геостационарной орбите Insalat.[5]

Точки Лагранжа системы Солнце-Земля используются как временные стоянки для космических аппаратов перед отправкой к другим планетам, что позволяет оптимизировать общее время полета.

3D-моделирование. Современные 3D-модели учитывают не только основные гравитационные силы, но и негравитационные воздействия, позволяя рассчитать оптимальные траектории с минимальными энергозатратами. Техника «маневров слабых устойчивых границ» стала возможной именно благодаря точному моделированию областей вокруг точек Лагранжа.

Несмотря на преимущества, проектирование для точек Лагранжа имеет сложности в высоких требованиях к точности учета долгосрочных орбитальных возмущений и сложности наземно-космической координации из-за больших расстояний.

Для того чтобы показать силу тяжести Солнца и Земли, создан гравитационный колодец в виде усеченного конуса. Также у точки L1 создан мост, чтобы показать силу притяжения между планетами (Н). Эта связь планет выглядела бы как сегмент шара.

Фиолетовой планетой показан спутник SOHO, который изучает активности и вспышки Солнца, предсказывает климат (I). В точке L2 находится телескоп “Планк”, созданный для изучения вариаций космического микроволнового фона, в виде планеты с красными кратерами. В точках L4 и L5 – спутники STEREO, созданный для наблюдений за солнцем. Если предмет находится в точке Лагранжа, то он затрачивает меньшее количество топлива во время движения.

Чтобы показать направление векторов сил гравитаций и их равные модули, поставлены одинаковые стрелки этих сил (К). Белым вектором представлен сила притяжения к Солнцу. Бирюзовым вектором – сила притяжения Земли. У точек L4 и L5 желтые вектора являются сложением векторов. Фиолетовый вектор - вектор центробежной силы, который противоположен сумме векторов.

В итоге, получается объёмная модель движения объектов. Gif было снято с помощью OBS studio и отредактировано в Microsoft Clipchamp из-за ограничений в приложении “Vectary” для российских пользователей. Модель приводилось в движение при помощи мыши и поэтому на gif виден бегунок.

Заключение. Расчеты, связанные с выходом на точки Лагранжа на сегодняшний момент, является актуальными, ведь от этого зависит динамика движение малых тел, например, космических аппаратов разного назначения. В данной работе была создана визуальная 3D модель точек Лагранжа системы Солнце – Земля, которая позволяет наглядно представить расположение точек либрации.

Полученная модель позволяет иллюстрировать гравитационное взаимодействие, и демонстрирует осмотр объёмной системы Солнце – Земля, вместе точками Лагранжа в различных плоскостях. Что облегчает понимание важных проблем полётов космических

аппаратов. Данная иллюстрация может быть использована в качестве учебного пособия на уроках физики и астрономии.

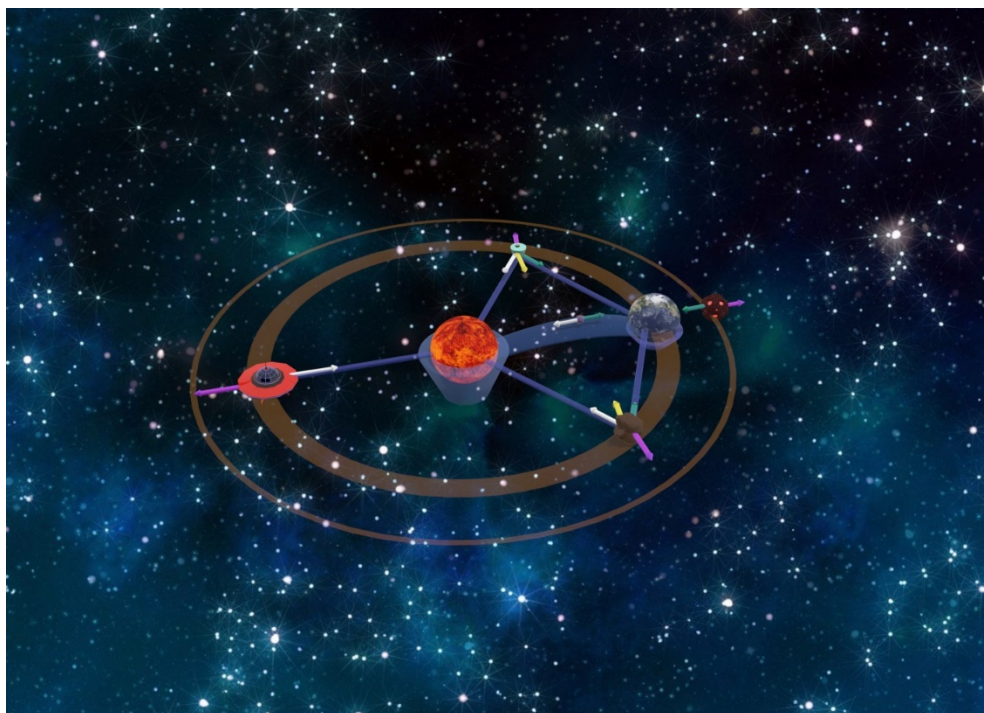


Рис. 1. 3D-модель расположения точек Лагранжа в системе Солнце-Земля

ЛИТЕРАТУРА

1. Работы Лагранжа [Электронный ресурс] Режим доступа: (<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k229225j/f4.item.r=Oeuvres+de+Lagrange.langFR>)
2. Решения Лагранжа теоремы о трех телах - Лекции по небесной механике, Зигель К.Л., 1959 [страницы 103-111]
3. Координаты точек Лагранжа - Лекции по Динамике Массачусетского технологического института, 2009 -[Лекция 18. Исследование окрестностей: ограниченная проблема трех тел]
4. Чанова Н.,Сергей Замоздра «Ищу запасную планету»-интервью /Н.Чанова // Газета ЧелГУ Университетская набережная. – 2023. – № 2 (1234). – С.4-5
5. Список искусственных спутников в точках Лагранжа [Электронный ресурс] Режим доступа: (https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_objects_at_Lagrange_points)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ VR- И MR-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ НАНОСИСТЕМ

М.Ю. Крылова✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

✉ krylova_myu@spbstu.ru

Введение. Системы виртуальной (VR), смешанной (MR) и дополненной (AR) реальности относятся к активно развивающимся направлениям в иммерсивных технологиях, в том числе для образования. При этом работа с ними требует определенных навыков и технических возможностей. Говоря об иммерсивных технологиях как глобальном тренде, отметим, что они объединяют в себе не только VR, MR, AR, но и такие средства как 360°-видео, -фото, цифровые двойники, сложные симуляторы на базе различных гибридных подходов. Отметим, что авторы работ [1-5] под иммерсивными технологиями понимают цифровые системы, создающие ощущение «погружения» и присутствия в смоделированной среде, поддерживающие интерактивность и манипулирование объектами [1, 2]. При этом выделим и более подробно опишем ключевые виды таких систем. Виртуальная реальность создает полностью синтетические трехмерные среды. Пользователи взаимодействуют с ними через специальные гарнитуры или системы CAVE (Cave Automatic Virtual Environment), которые обеспечивают максимально глубокий эффект присутствия. Эта технология предоставляет исследователю полный контроль над визуализацией наноструктур и их динамики. Дополненная реальность подразумевает наложение виртуальных объектов на реальный мир (мобильные устройства, веб-AR). Это удобно для демонстраций и смешанных практических заданий. Смешанная реальность обеспечивает более тесную интеграцию физических и виртуальных компонентов, дающую ощущение «смешанного» взаимодействия. Технология полезна для лабораторных установок с реальным оборудованием и виртуальными наномоделями.

Основная образовательная ценность таких технологий при изучении наносистем заключается в возможности визуализации недоступных напрямую объектов и процессов на атомно-молекулярном уровне, создании интерактивных лабораторных опытов и развитии пространственного мышления у студентов [3-5, 8, 9].

В сфере образования ряд авторов [6-8] выделяет преимущества таких технологий при изучении сложных молекулярных и атомных наносистем. К ним в первую очередь относятся визуализация абстрактных понятий. VR/AR позволяют «увидеть» атомные структуры, поверхности, интерфейсы и механизмы самосборки [3, 5]. Кроме того, позволяет улучшить развитие пространственного мышления. Исследования показывают улучшение пространственных навыков и понимания геометрии молекул у студентов, использующих иммерсивные среды [8, 9].

Важным пунктом при проведении любых экспериментов являются вопросы безопасности и доступности для массового использования. Виртуальные лаборатории и симуляторы дают возможность проводить исследования без затрат на сложное оборудование и без риска для здоровья.

Также важным моментом при обучении является мотивация и вовлеченность. Создание элементов геймификации в таких виртуальных средах зачастую проще, чем при прочих условиях. Игровые и интерактивные элементы в VR/AR повышают мотивацию студентов, уменьшают тревогу перед практическими работами и увеличивают вовлеченность [1, 2, 6].

Целью данного исследования является изучение возможности внедрения элементов VR и MR технологий в курсы связанные с изучением физических наносистем. Для этого

рассматриваются ряд подходов к генерации такого контента и внедрение их в действующий курс лабораторных работ «Моделирование наносистем».

Методы и подходы. Эффективное внедрение иммерсивных технологий в образовательный процесс базируется на двух ключевых компонентах: аппаратном обеспечении для отображения контента и программных средствах для его создания и воспроизведения.

Как демонстрирует опыт, представленный в работе [12], для группового использования в условиях учебной аудитории целесообразно применение специализированных образовательных гарнитур, таких как ClassVR, обеспечивающих централизованное управление контентом через веб-портал. Для задач, требующих более высокой вычислительной мощности, детализации и интерактивности (например, визуализация молекулярной динамики), могут быть использованы потребительские и профессиональные устройства: Meta Quest Pro, HTC Vive или гарнитур смешанной реальности Microsoft HoloLens 2.

Самостоятельное создание моделей. На начальном этапе, следуя описанной методике [12], возможно использование доступных редакторов (Paint 3D) для создания базовых трехмерных объектов. Для разработки научно-грамотных и детализированных моделей наноструктур рекомендуется применение профессионального свободного программного обеспечения, такого как Blender.

В отличие от рассмотренного в работе [12] подхода, ориентированного преимущественно на создание статических моделей для демонстрации, изучение наносистем требует акцента на динамическое моделирование. Ключевой задачей становится визуализация не только структуры, но и временной эволюции системы, что предполагает работу с более сложным программным обеспечением, способным обрабатывать и отображать результаты вычислительных экспериментов в реальном времени. Предлагается модульный принцип интеграции VR/MR-технологий в существующий курс «Моделирование наносистем».

На первом этапе трехмерная визуализация статических структур. В этом случае студенты знакомятся с базовыми атомными конфигурациями, типами кристаллических решеток и дефектов в наноматериалах посредством интерактивного изучения заранее подготовленных 3D-моделей.

Далее иммерсивная визуализация динамических процессов. Студенты загружают результаты собственных расчетов молекулярной динамики или методом Монте-Карло в специализированные симуляторы (OVITO, VMD) для их анализа в виртуальной реальности. Это позволяет детально исследовать температурные колебания, диффузионные процессы и фазовые переходы, с применением визуализаторов данных систем. VR-технология обеспечивает погружение в среду, обеспечивает детальное рассмотрение процессов.

Наиболее сложной составляющей как методически, так и технически является виртуальный лабораторный практикум. В рамках специально разработанных сценариев на платформе Unity студенты получают возможность интерактивно изменять параметры моделируемой системы (потенциалы взаимодействия, граничные условия, внешние поля) и мгновенно наблюдать отклик системы в VR-среде.

Результаты. Таким образом, в работе предложен подход интеграции VR- и MR-систем в курс, посвященный наномасштабным системам. Это будет способствовать формированию глубокого пространственного представления о наноразмерных объектах, обеспечению безопасного и экономически эффективного доступа к моделированию сложных или невозпроизводимых в учебной лаборатории процессов. Кроме того возможно повышение познавательной мотивации и учебной вовлеченности за счет интерактивности и новизны формата. Это будет способствовать развитию цифровых компетенций будущих

специалистов, связанных с работой в современных научных виртуальных средах и образовательном пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tene T.* A systematic review of immersive educational technologies in medical physics and radiation physics // *Frontiers in Medicine*. 2024. Vol. 11. P. 1384799.
2. *Muzata A.R.* Immersive Learning: A Systematic Literature Review // *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*. 2024. Vol. 23. No. 4. P. 26-48.
3. *Peng X., Isaac B., Wilkins R.* Development of Nanoscale Virtual Reality Simulations for the Teaching of Nanotechnology // *ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings*. 2012. P. 25.1266.1-25.1266.13.
4. *Flint M., Palmerius K., Host M., Schönborn K.* Virtual nanoworlds for learning // *Proceedings of the 11th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2019)*. 2020. Vol. 2. P. 192-199.
5. *Schönborn K.* Nano education with interactive visualization: Using interactive visualizations to support learning and teaching in nanoscience and nanotechnology. Linköping: Linköping University Electronic Press, 2016. P. 56.
6. *Guajardo Cuéllar A., Vázquez Cervantes A., Ramírez Moreno M.A., et al.* Mixed Reality Laboratory for Teaching Control Concepts // *Education Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 7. P. 883.
7. *Sung R.-J., Wilson A.T., Lo S.M.* BiochemAR: An Augmented Reality Educational Tool for Teaching Macromolecular Structure and Function // *Journal of Chemical Education*. 2020. Vol. 97. No. 1. P. 147-153.
8. *Laricheva E.N., Lane A.K., Shultz G.V.* Exploring the Effect of Virtual Reality on Learning in General Chemistry Students with Low Visual Spatial Skills // *Journal of Chemical Education*. 2023. Vol. 100. No. 8. P. 2882-2892.
9. *Gallardo Williams M.T., Swamy S.M., Bounmythavong S., et al.* Designing Diverse Virtual Reality Laboratories as a Vehicle for Inclusive Chemistry Education // *Journal of Chemical Education*. 2022. Vol. 99. No. 1. P. 308-316.
10. *Ward L.W., Coffey A.J., Glover S.R.* Lessons learned: the use of an augmented reality app for NMR teaching // *Frontiers in Education*. 2024. Vol. 9. P. 1384129.
11. *Sakshuwong S., Saland L., Gutenkunst R.N., et al.* Bringing chemical structures to life with augmented reality (MolAR) // *Journal of Chemical Education*. 2023. Vol. 100. No. 3. P. 1111-1118.
12. *Дудышева Е.В., Захаров П.В.* Использование сред виртуальной и смешанной реальности при изучении студентами моделей кристаллов в физике твердого тела // *Вестник Московского городского педагогического университета. Серия: Информатика и информатизация образования*. 2020. № 2 (52). С. 67–74.

РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЕКТОВ СТАРШЕКЛАССНИКОВ КАК ПУТЬ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ШКОЛЕ (ИЗ ОПЫТА РЕАЛИЗАЦИИ ВСЕРОССИЙСКОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ИНИЦИАТИВЫ «СИРИУС.ЛЕТО»)

Г.М. Куценко^{1,2}✉, Н.В. Шемякина³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²ГБОУ «Академическая гимназия №56 имени М.Б.Пильдес» Санкт-Петербурга

³Институт эволюционной физиологии и биохимии имени И.М.Сеченова РАН,
Санкт-Петербург

✉ gmk0210mail@gmail.com

Введение. Среди актуальных проблем развития современной российской школы особое место занимает проблема повышения качества математического и естественно-научного образования. Для решения данной проблемы разработан и утвержден Правительством Российской Федерации «Комплексный план мероприятий по повышению качества математического и естественно-научного образования на период до 2030 года» [1]. Данный план включает разделы, связанные с модернизацией содержания учебных предметов, расширением сети профильных классов с углубленным изучением математики, физики, химии, биологии и совершенствованием системы управления качеством преподавания этих предметов, а также с совершенствованием системы подготовки учителей математики и естественно-научных дисциплин. Как показывает опыт образовательных организаций Санкт-Петербурга, реализующих программы углубленного изучения математики, физики, химии, биологии и программы профильных инженерных классов, значительную роль в повышении качества освоения названных предметов играют как программы общего образования (включая программы внеурочной деятельности), так и междисциплинарные программы дополнительного образования, ориентированные на создание учащимися учебных исследований и проектов и их представление в рамках региональных и всероссийских ученических конференций и форумов. Отдельного внимания заслуживают ученические проекты, выполняемые по заказу и/или на базе научных и производственных объединений региона. К числу таких проектов относится Всероссийская образовательная инициатива по поиску и реализации научно-технологических проектов «Сириус.Лето: начни свой проект» [2].

Опыт реализации научно-технологического проекта в рамках образовательной инициативы «Сириус.Лето». Сегодня междисциплинарные программы, реализуемые в рамках внеурочной деятельности и дополнительного образования школьников, - один из трендов профильного инженерного и естественно-научного образования. Такие программы позволяют не только преодолеть ориентацию на сумму предметных знаний по математике, физике, химии, биологии, но и делают обучение практикоориентированным: помогают учащимся осмыслить связь учебных дисциплин и приобрести опыт применения полученных знаний в процессе выполнения проектного задания, создания продукта с опорой на знания из разных научных областей и с использованием цифровых инструментов.

С 2022 года в ГБОУ «Академическая гимназия №56 имени М.Б.Пильдес» Санкт-Петербурга реализуется дополнительная образовательная программа «Хемотроника», включающая три программы: «Инфохимия», «Когнитивные исследования», «Молекулярные системы и химия материалов». «Хемотроника» адресована учащимся 9-11 профильных естественно-научных и инженерных классов. Актуализируя знания, полученные

старшеклассниками на уроках физики, химии, биологии, информатики, программа «способствует расширению границ сознания школьников, позволяет рассмотреть поставленную задачу под новым углом» [3, 37]. Программа была разработана и реализуется при участии научных сотрудников Высшей школы биомедицинских систем и биотехнологий Политехнического университета Петра Великого, ИЭФБ РАН им. И.М.Сеченова, Научно-образовательного центра «Инфохимия» Университета ИТМО. Интерес старшеклассников к программе, её востребованность, успешная защита проектов на региональных конференциях (включая региональный трек Всероссийского конкурса «Большие вызовы») обусловили поиски дальнейших форматов взаимодействия «школа – технический вуз», «школа – научный центр». Одним из таких форматов взаимодействия стал командный учебный проект учеников 10 инженерного класса, выполненный под нашим руководством по заказу лаборатории сравнительных эколого-физиологических исследований ИЭФБ РАН – «Разработка игрового приложения для вывода обратной связи в рамках создания интерфейса мозг-компьютер».

Интерфейс мозг-компьютер (ИМК) – это инвазивная или неинвазивная технология, позволяющая преобразовывать нейрофизиологические сигналы в команды, адресованные внешнему техническому устройству или компьютеру. В настоящее время разрабатываются прежде всего ИМК для двигательной реабилитации (после инсульта) или в качестве ассистивных технологий при нарушении двигательных функций (набор текста на основе когнитивного компонента P300). Целью проекта, предложенного учащимся в рамках «Сириус.Лето», являлось создание неинвазивного электроэнцефалографического (ЭЭГ) интерфейса мозг-компьютер для развития когнитивных способностей в игровой форме (игрового интерфейса). Игровое приложение, создаваемое командой учащихся, было ориентировано на поддержание и развитие когнитивных функций (внимания, памяти, мышления и творческих способностей) и адресовано пользователям, у которых вследствие неврологических заболеваний может быть снижена волевая регуляция деятельности. Выполнение технического задания (ноябрь – апрель 2024-2025 учебного года), презентация промежуточных и итоговых результатов (декабрь 2024 года, май 2025 года) показали, что данный междисциплинарный проект актуализировал знания и потребовал углубления знаний ряда школьных дисциплин:

- Математики (в частности – теории вероятностей и статистики) – для обработки (усреднения) полученных вызванных потенциалов;
- Физики – для понимания природы нейрофизиологического сигнала (колебания и волны), устройств (аппаратуры), применяемых в рамках тестирования приложения;
- Биологии (физиологии) – для понимания природы ритмов головного мозга, вызванных потенциалов и их влияния на когнитивные функции;
- Информатики и ИКТ – для создания собственно интерфейса и его взаимодействия со специализированным программным обеспечением для проведения и записи ЭЭГ.

Кроме того, проектное задание способствовало формированию метапредметных компетенций учащихся: опыта написания мотивационного письма, взаимодействия с членами проектной команды в процессе решения задач, определения цели, задач, методов проектной работы, описания результатов и презентации продукта экспертному сообществу. Названные навыки, очевидно, выходят за рамки работы над конкретным проектом: проектный опыт необходим старшекласснику для успешного освоения междисциплинарных программ вузов и выполнения проектов на следующей (вузовской) ступени обучения.

Работа над проектным заданием велась в следующих формах: семинары с наставником, практикумы работы со специализированным оборудованием, индивидуальная работа в библиотеке (анализ источников по тематике проекта), консультации с учителями-предметниками (информатика, физика, биология), презентация этапов работы в рамках

школьного курса «Индивидуальный проект» и гимназического просветительского проекта «День технических наук». Одним из наиболее эффективных форматов стали онлайн-консультации с заказчиком, включавшие как теоретические мини-лекции ученого, так и «мозговой штурм» по выполнению задания.

Создание проекта в рамках «Сириус.Лето» позволило активно использовать лабораторное оборудование образовательной организации для проведения нейрофизиологических экспериментов (Мицар и SmartBCI) и обусловило необходимость организации учебных экскурсий и демонстрационно-обучающих занятий на базе лаборатории сравнительных эколого-физиологических исследований ИЭФБ РАН. Последнее, в свою очередь, способствовало и профессиональной ориентации учащихся инженерных и естественно-научных классов – знакомству с кругом инженерных специальностей, повышению мотивации «к построению таких траекторий непрерывного образования, которые были бы связаны со специальностями научно-технологического кластера» [3, 37].

Успешная презентация проекта перед экспертами инициативы «Сириус.Лето» (июнь 2025 года), а также в рамках городской открытой научно-практической конференции старшеклассников «Шаги в науку XXI века» (март 2025 года) и тестирование продукта в лаборатории ИЭФБ РАН показали актуальность продолжения подобной работы, для которой заказчиком ИЭФБ РАН вновь было предложено уточненное проектное задание на ресурсе «Сириус.Лето» и открыты 2 ученические проектные команды (по 5 человек в каждой). Кроме того, для учащихся 10-х инженерных классов ГБОУ «Академическая гимназия №56 имени М.Б. Пильдес» была разработана программа внеурочной деятельности «Информационные технологии в когнитивных исследованиях» (составитель – Куценко Г.М.), опирающаяся на опыт названной выше программы «Хемотроника» («Когнитивные исследования»). Участие в программе ориентирует 10-классников на создание проектов и продуктов с опорой на знания математики, информатики, физики, химии, биологии, включение в междисциплинарные олимпиады и конкурсы всероссийского и регионального уровней.

Заключение. Проектная деятельность старшеклассников, актуализирующая знания математики и естественно-научных дисциплин, а также применение опыта работы с информационными технологиями, позволяет, наряду с углубленным изучением предметов, повысить качество образования и мотивацию к получению инженерных профессий. При этом реализация научно-технологических проектов (включая проекты «Большие вызовы», «Сириус.Лето») под руководством наставников из числа студентов и аспирантов технических вузов диктует необходимость приобретения наставниками и студентами (аспирантами) непедагогических вузов, реализующими в школах внеурочные и дополнительные программы, связанные с инженерными компетенциями, специальных педагогических знаний, позволяющих грамотно отбирать методы и технологии обучения, организовывать эффективное сопровождение ученических учебных исследований и проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексный план мероприятий по повышению качества математического и естественно-научного образования на период до 2030 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/4qqxivejzhgf8h086uqqadj0pqcqktgh.pdf> (дата обращения: 07.01.2026)
2. Программа «Сириус.Лето: начни свой проект». URL: <https://siriusleto.ru/#about> (дата обращения: 07.01.2026)
3. Сухов И.Б. и др. Программа «Хемотроника» как путь профессионального самоопределения учащихся химико-биологических классов / И.Б.Сухов, П.И. Зырянова, В.А. Галкин, М.А. Кутырев, Е.Д. Тенютина // Академический вестник. – 2023. - № 1 (59). – С. 34-39.

АНАЛИЗ НАПРАВЛЕННОЙ СВЯЗАННОСТИ В КОРТИКАЛЬНОЙ СЕТИ ПО СИГНАЛАМ ЛОКАЛЬНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ МОЗГА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛНЫ РАСПРОСТРАНЯЮЩЕЙСЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ

Д. А. Лачинова^{1,2} ✉, М. П. Смирнова¹, Л. В. Виноградова¹, И. В. Сысоев^{1,2,3}

¹Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

✉ lachinova-dasha@yandex.ru

Введение. Взаимодействие между полушариями головного мозга имеет важное значение для когнитивных процессов, обработки соматосенсорной информации и поддержания нормального уровня сознания. При различных заболеваниях нервной системы, например, аутизм или шизофрения, отмечается нарушение связности между корковыми областями обоих полушарий [1], [2]. В случае острой локальной дисфункции — например, при инсульте, мигренозных приступах или очаговых эпилептических припадках — процесс распространяющейся деполяризации (РД) запускается в одном из полушарий мозга [3], [4]. Мы предположили, что развитие односторонней волны РД может нарушать межполушарную функциональную связность и вносить вклад в патогенез заболеваний ЦНС. Работа направлена на изучение влияния волны РД на межполушарную функциональную связь головного мозга крыс.

Данные и методы. Электрофизиологическое исследование выполнялось на взрослых самцах крыс линии Wistar (n=6) в условиях свободного поведения. Записи корковой активности (локальных потенциалов поля) продолжительностью 900 секунд фиксировались в двух корковых зонах (соматосенсорной и ретроспленальной) обоих полушарий до и после повреждения фронтальной коры. У каждого животного вызывали РД в коре одного полушария и записывали сигналы, затем повторяли то же самое (т.е. вызов РД) в коре другого полушария. Возникновение РД определялось по характерным медленным сдвигам внеклеточного потенциала. Записи, полученные до повреждения, использовались для оценки фонового уровня связности. Полученные данные разбивались на последовательные 20-секундные неперекрывающиеся последовательные интервалы.

Соматосенсорная кора отвечает за обработку сенсорных сигналов, тогда как ретроспленальная область участвует в механизмах памяти и пространственной ориентации. Считается, что координированная работа этих корковых областей имеет ключевое значение для реализации когнитивных функций.

Для изучения изменений в характере взаимодействия между регионами был применён метод расчета энтропии переноса (TE) — статистического показателя, позволяющего оценивать направленную связность [5]. Формула для вычисления оценки энтропии переноса, которая использовалась для написания алгоритма:

$$TE_{Y \rightarrow X} = \psi(k) + \langle \psi(n_X(i) + 1) - \psi(n_{X,Y}(i) + 1) - \psi(n_{X,X_\tau}(i) + 1) \rangle_i, \quad (1)$$

где $n_X(i)$ и $n_Y(i)$ — число соседей i -й точки на плоскости (X, Y) , $\psi(n)$ — дигамма-функция, $n_{X,Y}(i)$ и $n_{X,X_\tau}(i)$ вычисляются как количество соседей для X и Y или X_τ (например, X , сдвинутый во времени на τ точек данных в будущем) соответственно.

Значения TE , как и значения любых других показателей, могут увеличиваться или умень-

шаться из-за случайных факторов. Так как распределение оценок TE далеки заведомо не является нормальным (величина ограничена как снизу, так и сверху) было решено использовать непараметрическую статистику. Для этого были рассчитаны средние значения фоновой активности для каждой пары каналов в обоих направлениях, усредняя по всем временным интервалам для всех записей (всего ~ 300 значений). Для каждого выбранного временного интервала после инициации волны РД также рассчитывались максимальное и минимальное по выборке из $n = 6$ записей значение TE в каждую сторону отдельно. Затем мы рассмотрели нулевую гипотезу о том, что эти значения имеют то же среднее значение, что и среднее значение базового уровня. Если это так, то вероятность того, что конкретное значение будет больше (меньше) среднего значения фоновой активности, составляет $1/2$, и для всех n значений эти вероятности независимы. Таким образом, если минимальное значение было больше базового значения, то вероятность этого в рамках нулевой гипотезы составляет $p_6 = 2^{-N} \approx 0.0156$, что считается обычно вполне приемлемым уровнем. Фактически, это вероятность ошибиться, опровергая нулевую гипотезу, то есть утверждая, что среднее после прохождения волны РД на самом деле выше (ниже) базового уровня.

Результаты. Фокальное повреждение коры всегда приводило к возникновению волны РД, которая распространялась во все области коры поврежденного полушария, но не проникала в кору противоположного (неповрежденного) полушария.

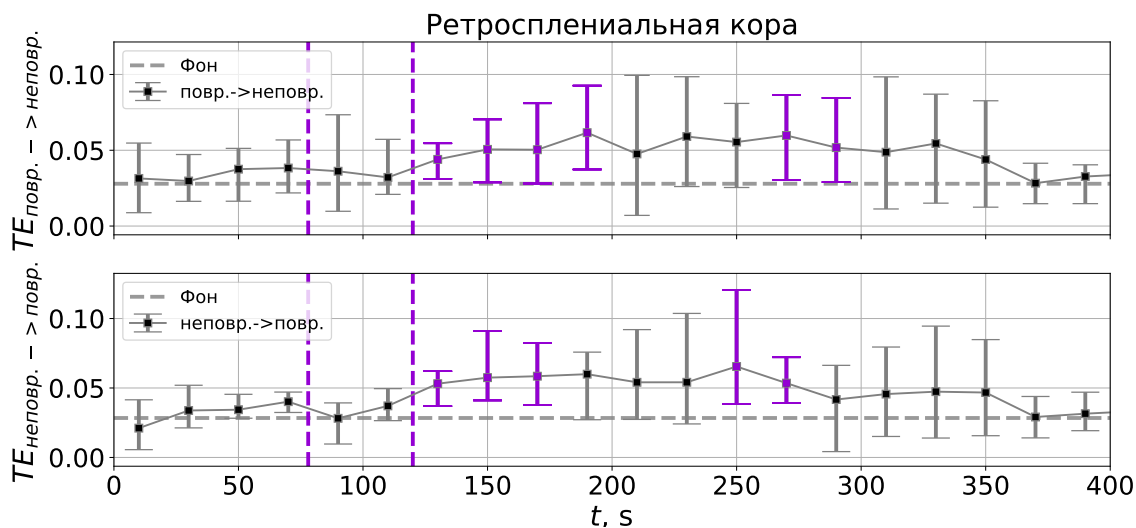


Рис. 1. Влияние РД на направленную связность ретросплениальной коры двух полушарий. Значения энтропии переноса (TE), рассчитанные в 20-секундных неперекрывающихся временных интервалах в обоих направлениях: верхний график — направление от поврежденного полушария, нижний график — направление к поврежденного полушарию. Показаны средние, минимальные и максимальные значения ($n=6$). Горизонтальная пунктирная линия показывает среднее значение, рассчитанное на основе всей фоновой активности всех крыс. Средняя длительность волны РД отмечена вертикальными пунктирными линиями.

Оценка значений энтропии переноса для ретросплениальной коры (рис. 1) показывает двустороннее усиление: и для воздействия от поврежденного полушария к неповрежденного, и в обратную сторону. Значения $TE_{повр. \rightarrow неповр.}$ и $TE_{неповр. \rightarrow повр.}$ не различались до и во время волны РД, но после прекращения РД их уровень изменился.

В течение трех последовательных 20-секундных интервалов $t \in [130; 190]$ и интервала $t \in [270; 290]$ (верхний график рис. 1) сила от пораженного полушария к неповрежденному стала значительно больше фоновой активности.

В обратном направлении тоже наблюдаем повышение связанности на двух последовательных интервалах $t \in [130; 170]$ и $t \in [250; 270]$ (нижний график рис. 1).

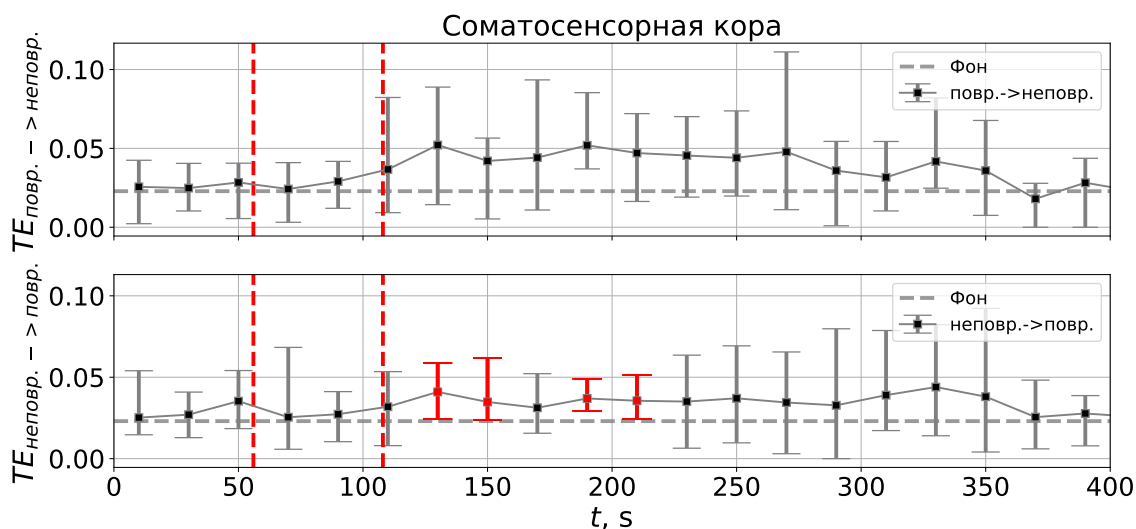


Рис. 2. Влияние РД на направленную связность соматосенсорной коры двух полушарий. Значения энтропии переноса (TE), рассчитанные в 20-секундных неперекрывающихся временных интервалах в обоих направлениях: верхний график — направление от поврежденного полушария, нижний график — направление к поврежденного полушарию. Показаны средние, минимальные и максимальные значения ($n=6$). Горизонтальная пунктирная линия показывает среднее значение, рассчитанное на основе всей фоновой активности всех крыс. Средняя длительность волны РД отмечена вертикальными пунктирными линиями.

Расчёт энтропии переноса для соматосенсорной коры показал, что имеется увеличение воздействия со стороны неповрежденного и незатронутого волной РД полушария на повреждённое ($t \in [130; 150]$ и $t \in [190; 210]$ (нижний график рис. 2)).

Связь в противоположном направлении $TE_{\text{повр.} \rightarrow \text{неповр.}}$ существенно не изменилась. Не было обнаружено интервалов, для которых увеличение $TE_{\text{повр.} \rightarrow \text{неповр.}}$ было бы значимым по сравнению с фоновым уровнем. Таким образом, волна распространяющейся деполяризации не изменила влияние пораженного полушария на неповрежденное.

Такой механизм можно рассматривать как стремление неповрежденных участков полушария компенсировать нарушения в поврежденных зонах, тем самым используя нейропластичность для восстановления естественного характера электрической активности коры. У большинства особей параметры связности через 350–400 секунд возвращались к фоновым значениям. Эти результаты демонстрируют значительную степень функциональной гибкости нейронных цепей у бодрствующего мозга, а также их способность к оперативной перестройке при нарушении функций.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-15-00327-П.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang P., Jiang Y., Biswal B. B. Aberrant interhemispheric structural and functional connectivity within whole brain in schizophrenia // *Schizophr. Res.* 2024. V. 264. P. 336–344.
2. Hartings J. A. Spreading depolarization monitoring in neurocritical care of acute brain injury // *Curr. Opin. Crit. Care.* 2017. V. 23(2). P. 94–102.
3. Vinogradova L. V., Suleymanova E. M., Medvedeva T. M. Transient loss of interhemispheric functional connectivity following unilateral cortical spreading depression in awake rats // *Cephalalgia.* 2021. V. 41(3). P. 353–365.
4. Leao A. A. P. Spreading depression of activity in the cerebral cortex // *Journal of Neurophysiology.* 1944. V. 7(6). P. 359–390.
5. Schreiber T. Measuring information transfer // *Physical review letters.* 2000. V. 85(2). P. 461–464.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРОТЕЗОМ

А.В. Могильников^{1,2,3}✉

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь

²АО «Силовые машины», Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

✉ mogilnikov.andrej@mail.ru

Введение. Информационная система управления биоэлектрическим протезом (ИСУБП) на основе датчиков регистрации биоэлектрических потенциалов человека BiTronics NeuroLab представляет собой инновационное решение для людей с ограниченными возможностями здоровья. Работа такого протеза основана на использовании электрической активности мышц (электромиограммы, ЭМГ) и мозга (электроэнцефалограммы, ЭЭГ). Основные направления работы в области бионейротехнологий и существующие проблемы подробно были освещены еще советскими учеными [1]. В настоящее время пути их решения рассматриваются и реализуются компанией BiTronics Lab [2]. Исследования проводятся по двум основным направлениям:

1. Разработка методов регистрации биопотенциалов. Включает в себя создание новых принципов отведения биоэлектрических сигналов, проектирование усовершенствованных электродов-датчиков, а также анализ и снижение уровня шумов, обусловленных электрохимическими процессами на интерфейсе «датчик-ткань»;

2. Разработка алгоритмов технической обработки биоэлектрической информации. Основное внимание уделяется методам фильтрации и выделения полезного сигнала из смешанных биологических и технических шумов. Также исследуются оптимальные варианты логических схем и алгоритмов преобразования биоинформации (аналоговой или цифровой) с целью достижения максимальной помехоустойчивости и надежности при формировании управляющих команд.

ИСУБП предназначена для реализации интуитивного и высокоэффективного интерфейса управления протезным устройством, а также для обеспечения гибкой конфигурации его параметров в соответствии с антропометрическими и функциональными особенностями пользователя.

Модель. Создание прототипа биоэлектрического протеза осуществляется посредством использования образовательного комплекта LEGO MINDSTORMS Education EV3 в сочетании с модулями BiTronics NeuroLab. Последние обеспечивают возможность управления моделью на основе регистрации и обработки биоэлектрических сигналов человека. Функционирование макета руки базируется на контроле амплитуды электромиографического сигнала (рис. 1). Сегменты макета, имитирующие фаланги пальцев, осуществляют сгибание и разгибание в зависимости от величины амплитуды поступающего ЭМГ-сигнала.

ИСУБП представляет собой систему из восьми зубчатых колес, расположенных попарно между четырьмя центральными сервоприводами и основаниями спроектированных конечностей, которая имитирует функциональность пястно-фаланговых суставов. Такая конфигурация обеспечивает возможность сгибания и разгибания фаланг вокруг фронтальной оси (рис. 2). В исследовании [3] детально рассматриваются методы регистрации и обработки биопотенциалов, применяемые для управления робототехнической системы.

Информационная система EV3 предоставляет интуитивно понятный пользовательский интерфейс для управления протезом. Она также включает функционал для мониторинга его состояния, проведения диагностических процедур и анализа собранных данных об эксплуатации. Внедрение данной системы направлено на оптимизацию комфорта и

производительности биоэлектрического протеза, предоставляя пользователю расширенные возможности контроля над двигательными функциями.

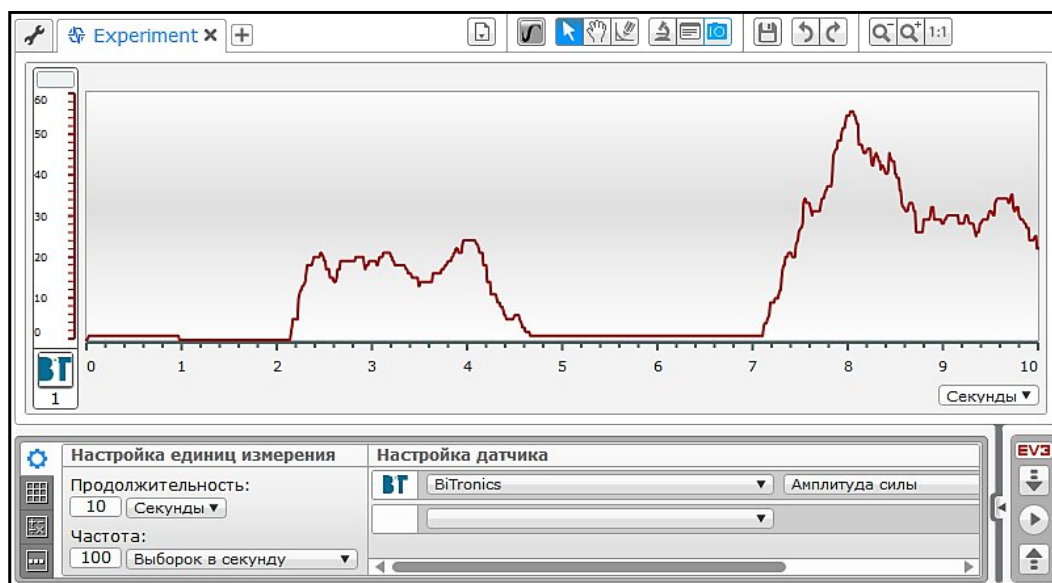


Рис. 1. Регистрация сигнала модуля ЭМГ в режиме «амплитуда силы» в программном обеспечении LEGO MINDSTORMS Education EV3

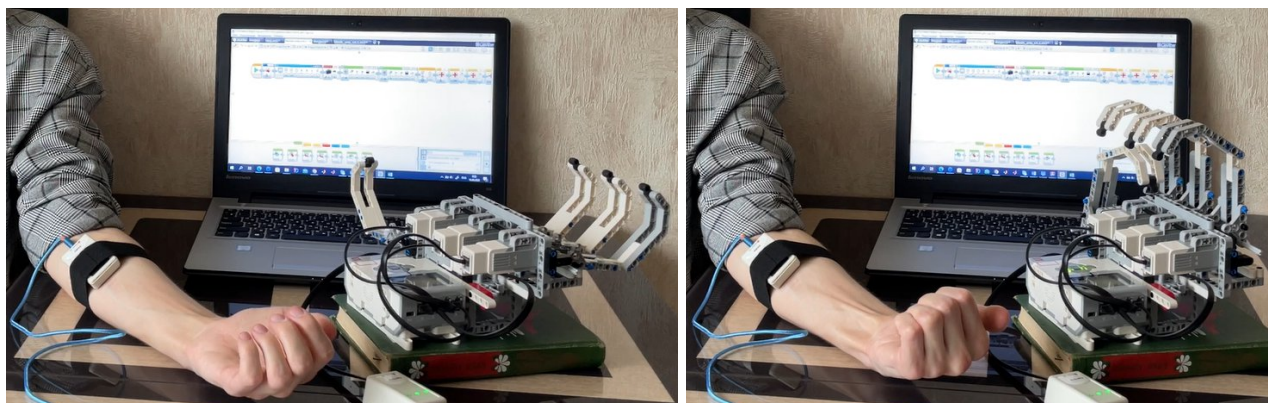


Рис. 2. Функционирование ИСУБП (при расслабленных мышцах – слева, при напряженных – справа) на основе образовательного набора-конструктора LEGO MINDSTORMS Education EV3 и комплекта модулей BiTronics NeuroLab

Результаты. Результаты проведенного исследования [3] дают возможность детализировать механизмы воздействия управляющих импульсов на технические параметры робототехнической системы. Установлена корреляция между биоэлектрическими сигналами, циркулирующими в контуре обратной связи, и угловыми перемещениями (в градусах или полных оборотах) осей сервоприводов, осуществляющих управление проксимальными фалангами. Данная зависимость поддается математическому описанию посредством формулы (1) [3]:

$$\varphi = f(U) \quad (1)$$

где φ – фактический угол поворота сервопривода в градусах; U – сигнал модуля ЭМГ в режиме амплитуды силы в относительных единицах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурфинкель В.С., Малкин В.Б., Цетлин М.Л., Шнейдер А.Е. Биоэлектрическое управление. – М.: Наука, 1972. – 245 с.
2. *BiTronics NeuroLab*. Методические рекомендации по использованию комплекта модулей BiTronics NeuroLab. 2020. – 148 с.
3. Могильников А. В. Исследование и оптимизация систем управления с биологическими обратными связями на базе робототехнического комплекса LEGO Mindstorms education EV3 и биосенсоров Bitronics Neurolab / А. В. Могильников // Наука настоящего и будущего. – 2024. – Т. 3. – С. 87-92. – EDN WMVYVZ.

ПРОГРАММА КОНСТРУИРОВАНИЯ АТОМИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ С УГЛЕРОДНЫМИ НАНОСТРУКТУРАМИ

А.С. Нарсеев ✉, У.И. Янковская
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ narseev.as@mail.ru

Введение. Молекулярно-динамическое моделирование в настоящее время широко применяется в различных областях науки, в том числе в материаловедении. Данный метод позволяет эффективно исследовать свойства материалов на атомистическом уровне, получать количественно достоверные результаты и при этом не требует значительных материальных затрат. Процесс молекулярно-динамического моделирования, как правило, включает несколько основных этапов: построение атомистической модели, подготовку входных файлов для расчёта, проведение вычислений и анализ полученных результатов [1-3]. Разработанная в рамках данной работы программа предназначена для упрощения и ускорения этапа построения атомистических моделей металломатричных композитов, армированных углеродными наноструктурами, в частности фуллеренами и углеродными нанотрубками. Использование современных языков программирования и открытых программных библиотек позволяет автоматизировать значительную часть процесса генерации моделей и повысить его воспроизводимость. Программа реализована для операционной системы Windows и оснащена интуитивно понятным графическим пользовательским интерфейсом, а также необходимыми инструкциями для практического применения.

Для построения релевантных атомистических моделей металломатричных композитов, армированных углеродными наноструктурами, требуется их случайное пространственное распределение и ориентация под произвольными углами в объёме металлической матрицы без взаимных перекрытий. Реализация данных процедур вручную является крайне трудоёмкой и требует значительных временных затрат. Использование стандартных инструментов пакетов AtomsK [4] и LAMMPS [5] для решения указанных задач также не обеспечивает достаточной эффективности и удобства. В связи с этим была поставлена задача разработки специализированной программы, предназначенной для автоматизации и оптимизации процесса формирования атомистических моделей металломатричных композитов

Особенности и принцип работы программы. Программа реализована на языке Python, что обусловлено его широким применением в вычислительном материаловедении, наличием развитых научных библиотек и удобством интеграции с внешними программными пакетами. Архитектура приложения является модульной и включает основной графический модуль управления, вспомогательные модули для геометрических расчётов и генерации наноструктур, интерфейс взаимодействия с внешними утилитами обработки атомистических конфигураций. Такой подход обеспечивает расширяемость программы и упрощает её модификацию под различные типы композитных систем.

Для удобной работы в программе используются некоторые библиотеки и инструменты. Стандартные библиотеки Python, такие как «math», «random», «subprocess» и другие применяются для работы с файловой системой, выполнения внешних команд, генерации случайных величин, регулярных выражений и математических вычислений. Библиотека CustomTkinter обеспечивает современное оформление интерфейса и улучшенную эргономику по сравнению со стандартным Tkinter. Библиотека Pillow (PIL) применяется для загрузки и обработки графических ресурсов (иконок интерфейса). Модули ase, ase.io, ase.build используются для работы с атомистическими структурами, чтения и записи файлов в форматах, применяемых в вычислительной физике твёрдого тела (в том числе XSF), а также

для генерации молекул и нанотрубок. Модули `func` и `fullerene_maker` созданы внутри программы и реализуют специализированные функции генерации и встраивания углеродных наноструктур в матрицу, включая создание углеродных нанотрубок с заданными параметрами и корректное размещение фуллеренов.

На первом этапе осуществляется загрузка исходной атомистической модели металлической матрицы, представленной в виде конфигурационного файла. Такой файл должен иметь расширение `cif`. Далее, в зависимости от выбранного пользователем режима армирования (фуллерены или углеродные нанотрубки), активируется соответствующий алгоритмический блок. Каждый режим включает процедуры вычисления необходимого числа наноструктур, генерации их пространственных параметров и последовательного встраивания в матрицу с контролем геометрических ограничений.

В режиме армирования фуллеренами количество вставляемых наноструктур определяется либо по заданной массовой, либо по объёмной доле. В случае массовой доли расчёт основан на соотношении массы одного фуллерена (определяемой числом атомов углерода) и массы металлической матрицы. Все расчёты происходят в автоматическом режиме, от пользователя требуется ввести только массовую или объёмную долю в процентах. При задании объёмной доли используется отношение объёма сферической модели фуллерена к объёму расчётной ячейки. Фуллерен аппроксимируется сферой, радиус которой вычисляется эмпирической зависимостью от числа атомов углерода. На основе данного радиуса определяется минимально допустимое расстояние между центрами фуллеренов, исключающее их взаимное перекрытие, а также радиус вырезаемой в матрице области.

Поиск мест для размещения фуллеренов осуществляется с использованием стохастического алгоритма генерации случайных точек в трёхмерном объёме расчётной ячейки. Для повышения устойчивости алгоритма область генерации ограничивается внутренней частью ячейки с отступом от границ. Каждая новая точка принимается в качестве центра фуллерена только в том случае, если расстояние до всех ранее размещённых центров превышает заданное минимальное значение. В противном случае точка отклоняется и генерируется новая. Процесс продолжается до достижения требуемого числа фуллеренов или до превышения максимально допустимого числа попыток. Для каждого найденного центра выполняется последовательная модификация атомистической структуры: из металлической матрицы удаляются атомы, попадающие в сферическую область заданного радиуса, после чего в освободившийся объём вставляется фуллерен. Операции выполняются поэтапно с использованием временных конфигурационных файлов, что обеспечивает корректность геометрии на каждом шаге. Программа позволяет армировать матрицу любым типом фуллеренов, если их модель будет подготовлена правильным образом. В исходной версии программы предлагается 24 модели фуллеренов (от C_{20} до C_{720}).

Процесс армирования нанотрубками аналогичен в целом армированию фуллеренами. Общее количество углеродных нанотрубок задаётся пользователем. Для обеспечения случайной ориентации трубки делятся на две группы, ориентированные преимущественно вдоль двух взаимно перпендикулярных осей расчётной ячейки. Для каждой трубки случайным образом генерируется угол наклона в диапазоне от 0 до 90° , что обеспечивает изотропность ориентационного распределения. Длина каждой нанотрубки вычисляется с учётом угла её наклона. Расчёт производится на основе тригонометрических соотношений, связывающих длину трубки с размером ячейки и углом наклона.

Положение нанотрубки в плоскости, перпендикулярной её основной ориентации, задаётся случайным образом в пределах допустимого диапазона, исключающего выход трубки за границы расчётной области. Таким образом обеспечивается случайное пространственное распределение трубок в объёме металлической матрицы.

Генерация нанотрубок выполняется последовательно, с поэтапным обновлением атомистической конфигурации. Для каждой трубки создаётся отдельная модифицированная структура, которая используется в качестве входных данных на следующем шаге. Дополнительно формируется текстовый файл, содержащий значения углов ориентации всех сгенерированных нанотрубок, что обеспечивает воспроизводимость моделирования.

Графический интерфейс. Графический пользовательский интерфейс программы предназначен для упрощения процесса построения атомистических моделей металломатричных композитов и обеспечения удобного взаимодействия пользователя с основными функциями приложения. Интерфейс позволяет выполнять все этапы подготовки модели в интерактивном режиме без необходимости ручного редактирования входных файлов. Основное окно программы содержит элементы ввода параметров металлической матрицы и углеродных наноструктур, а также средства выбора режима армирования (фуллерены или углеродные нанотрубки). Параметры моделирования сгруппированы логически и снабжены проверками корректности вводимых данных. Запуск генерации модели осуществляется с помощью управляющих элементов интерфейса, при этом пользователю отображается информация о ходе выполнения операций и возможных ошибках. По завершении работы обеспечивается сохранение итоговой атомистической конфигурации и вспомогательных файлов, необходимых для воспроизводимости моделирования.

Интерфейс реализован с использованием библиотеки CustomTkinter и адаптирован для работы в операционной системе Windows. Его применение снижает трудоёмкость этапа построения моделей и повышает эффективность подготовки данных для молекулярно-динамического моделирования. Изображение вводного окна и окон для армирования фуллеренами представлены на рис. 1.

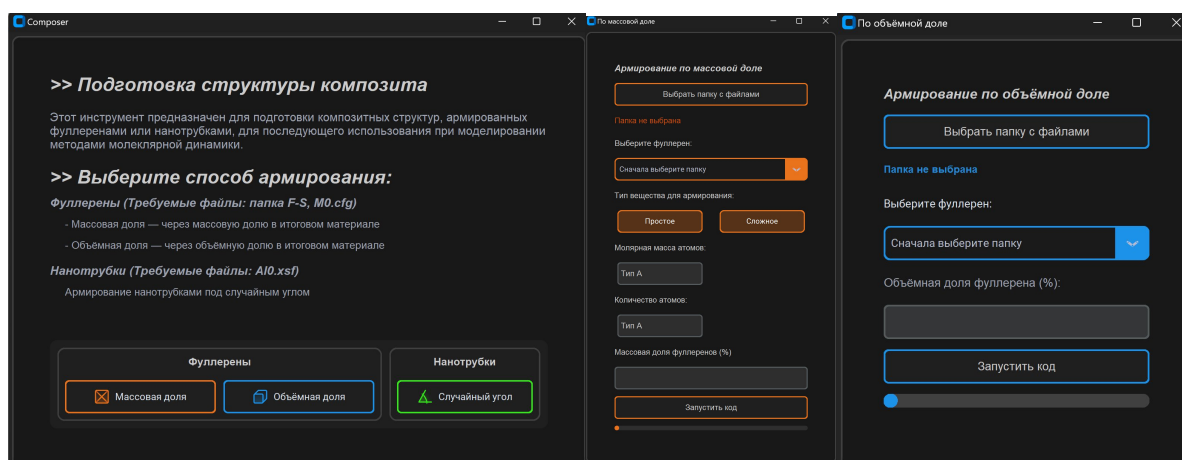


Рис.1. Графический интерфейс программы

Результаты. Таким образом, разработанная программа представляет собой удобный и расширяемый инструмент для подготовки атомистических моделей металломатричных композитов с углеродными наноструктурами, обеспечивая воспроизводимость геометрии и контроль ключевых структурных параметров. Она может применяться как в учебных, так и в исследовательских целях. Программа применялась при проведении научных исследований [6-8]. Для защиты авторских прав на программу получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [9].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-20038 (<https://rscf.ru/project/24-22-20038/>) и гранта Санкт-Петербургского научного фонда № 24-22-20038. Часть результатов работы была получена с использованием вычислительных

ЛИТЕРАТУРА

1. Батаев И.А., Эмурлаев К.И., Головин Е.Д., Огнева Т.С., Довженко Г.Д. Молекулярная динамика для материаловедов: учебное пособие. Новосибирск, 2024.
2. Захаров П.В., Еремин А.М., Чередниченко А.И. Основы атомистического моделирования кристаллов в физике конденсированного состояния: учебное пособие. Бийск, 2016.
3. Харламов Г.В. Метод молекулярной динамики и его применение в физике наночастиц: учебное пособие. Новосибирск, 2012.
4. AtomsK: программный комплекс для атомистического моделирования.
5. LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator): программный пакет молекулярной динамики.
6. Zakharov P.V., Yankovskaya U.I., Kazakov A.M. Molecular dynamics study of the mechanical behaviour and dislocation evolution in metal–carbon nanotube nanocomposites // Journal of Micromechanics and Molecular Physics. 2025. Vol. 10, No. 4. P. 83–92.
7. Нарсеев А.С., Захаров П.В., Янковская У.И. Механические свойства композита Al_2Ni_3 , армированного углеродной нанотрубкой, при одноосной деформации растяжения // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2025): материалы XIX Всероссийской научной конференции с международным участием. Челябинск, 2025. С. 218–225.
8. Янковская У.И., Старостенков М.Д., Нарсеев А.С., Ганин С.А., Захаров П.В. Молекулярно-динамическое моделирование влияния концентрации вакансий на механические свойства α -Ti, армированного УНТ, при одноосном растяжении // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 4. С. 445–455.
9. Захаров П.В., Нарсеев А.С., Янковская У.И. Программа создания структуры металломатричного композита, армированного углеродными нанотрубками: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2025611925 от 23.01.2025.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНОГО ПОЛИУРЕТАНА С ОДНОСТЕННЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

А.Г. Никитин✉, И.Д. Веневцев, Д.Н. Тонков, Н.А. Грозова, И.А. Кобыхно
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ nikitin_ag@spbstu.ru

Введение. Наноккомпозиты на основе термопластичного полиуретана (TPU — от англ. Thermoplastic polyurethane) с одностенными углеродными нанотрубками (SWCNT — от англ. Single-walled carbon nanotubes) перспективны для создания гибкой электроники, где ключевое значение имеют не только механические и электромагнитные [1], но и управляемые оптические свойства. Измерение коэффициентов пропускания и отражения для разных длин волн, а также построение рентгенолюминесцентных спектров позволяет оценить степень дисперсности нанотрубок и эффективность экранирования электромагнитного излучения, что напрямую связано с формированием проводящей сети в полимерной матрице [2]. Также, как показано в работах [2, 3, 4], определение ширины запрещённой зоны и энергии Урбаха по найденным спектрам даёт важную информацию об электронной структуре и степени упорядоченности в композите. В данной работе исследуется влияние массовой концентрации SWCNT в TPU на вышеуказанные оптические параметры для установления корреляции между составом, микроструктурой и функциональными свойствами наноккомпозитов TPU+SWCNT.

Материалы и методы. В ходе работы были исследованы композитные плёнки на основе матрицы TPU, наполненной SWCNT. Введение нанотрубок в полимерную матрицу придало всем образцам характерный чёрный цвет, что визуально свидетельствует о сильном поглощении света во всей видимой области спектра. Для изучения зависимости оптических свойств композита от содержания SWCNT была изготовлена серия образцов с разной массовой концентрацией нанотрубок (C), которая варьировалась в диапазоне от 0 до 1% и рассчитывалась по формуле:

$$C = \frac{m(SWCNT)}{m(SWCN) + m(TPU)} \cdot 100\%,$$

где $m(SWCNT)$ — масса углеродных нанотрубок, $m(TPU)$ — масса полимерной матрицы TPU в граммах.

Для корректного сравнения оптических характеристик важным параметром является геометрическая толщина d исследуемой композитной плёнки, которая измерялась для каждого образца с помощью микрометра (данные представлены в Таблице 1).

Таблица 1. Толщины d исследуемых образцов с различной массовой концентрацией C нанотрубок.

C , %.	0,00	0,05	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00
d , мм	0,58	0,15	0,22	0,18	0,08	0,12	0,09

У данных образцов были измерены такие оптические характеристики, как коэффициент пропускания T (от англ. Transmittance — безразмерная величина, показывающая, какая доля интенсивности падающего на образец оптического излучения прошла через него без рассеяния и поглощения, и определяемая как отношение прошедшего через образец потока излучения к падающему, т. е. $T = \frac{I}{I_0}$, где I и I_0 — интенсивности прошедшего и падающего излучения) и коэффициент отражения R (от англ. Reflectance — безразмерная величина, характеризующая способность тела отражать падающее на него излучение и показывающая какая доля

интенсивности падающего излучения отразилась от поверхности образца; количественно R равен отношению потока излучения, отражённого образцом, к потоку, упавшему на образец).

Значения T и R образцов были измерены в области спектра от 300 нм до 1100 нм с помощью спектрофотометра SPECORD 200 PLUS. При этом коэффициент отражения R измерялся спектрофотометром с использованием интегрирующей сферы, чтобы учитывать весь отражённый свет, что критически важно для корректной характеристики шероховатых или рассеивающих композитных плёнок.

Спектры рентгенолюминесценции представляют собой зависимости интенсивности излучения, испущенного образцами с разной концентрацией SWCNT, от длины волны λ , которая изменялась от 200 нм до 640 нм. Спектры регистрировались на специальной измерительной установке, включающей рентгеновскую трубку, вакуумный криостат, монохроматор, фотоэлектронный умножитель и компьютер для обработки данных. Измерения спектров проводились в двух температурных режимах: при комнатной температуре $RT \sim 295$ К и при температуре жидкого азота $NT \sim 77$ К.

Для расчёта коэффициента поглощения α и ширины запрещённой зоны E_g следующая система уравнений, в которую входят закон Бугера-Ламберта с учётом многократного отражения фотонов внутри композитной плёнки и диаграмма (формула) Тауца:

$$I = I_0 \cdot \frac{(1 - R)^2 \cdot \exp(-\alpha \cdot d)}{1 - (\exp(-\alpha \cdot d))^2 \cdot R^2},$$

$$(\alpha \cdot E)^{\frac{1}{n}} = k \cdot (E - E_g), \quad E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda},$$

где α — линейный коэффициент поглощения; d — толщина образца; i — мнимая единица; E и ν — энергия и частота излучения фотона; h — постоянная Планка; c — скорость света; n — показатель степени, определяющий тип оптического перехода (принимается $n = 2$, что высоковероятно для непрямых запрещённых переходов, характерных для неупорядоченных систем и углеродных нанотрубок [2]); k — положительная константа, характеризующая вероятность оптических переходов в материале и зависящая от параметров TPU+SWCNT.

Поскольку значение $(1 - (\exp(-\alpha \cdot d))^2 \cdot R^2)^{-1}$ при любых физически возможных α и d лежит в диапазоне от 1 до 1,0082, то его можно не учитывать. Для удобства вычислений из закона Бугера-Ламберта была выведена следующая формула для расчёта линейного коэффициента поглощения в явном виде:

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \cdot \ln \frac{(1 - R(\lambda))^2}{T(\lambda)}$$

Также необходимо определить энергию Урбаха E_u — параметр, который количественно характеризует степень беспорядка в неупорядоченных системах и материалах с дефектами. Чем выше E_u , тем больше в материале структурных неоднородностей и дефектов [4]. Расчёт E_u (в эВ) был произведён при комнатной температуре с учётом правила Урбаха, которое описывает поведение низкоэнергетического края полосы поглощения:

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \cdot \exp\left(\frac{E}{E_u}\right)$$

где α_0 — коэффициент пропорциональности для данного материала, зависящий от величины матричного элемента оптического перехода, эффективной массы носителей заряда и других параметров композита TPU.

Результаты. Искомые спектры люминесценции $I(\lambda)$ (интенсивности измерялись в условных единицах — по-англ. arbitrary units, a.u.) и зависимости $T(\lambda)$, $R(\lambda)$, $\alpha(E)$ были измерены, построены и обработаны в программе Origin и представлены на рисунках ниже.

На рис. 1 видно, что и при комнатной, и при температуре жидкого азота максимум интенсивности находится в ультрафиолетовом диапазоне от 285 нм до 295 нм. Также очевидно, что с увеличением концентрации SWCNT в TPU уменьшаются интенсивности

люминесценции образцов. При NT наблюдается изменение формы спектра и добавление новых пиков в диапазоне от 400 до 600 нм. Также при RT максимум интенсивности находится на 310 нм (для $C = 1\%$ — на 333 нм), а при NT в том же диапазоне — на 305 нм, сами же значения интенсивности образцов при RT более чем на порядок меньше, чем при NT . Видно и то, что добавление в TPU нанотрубок ($C = 0,05\%$) при температуре жидкого азота в 3,8 раз уменьшает интенсивности по сравнению с TPU без SWCNT, а вот при комнатной температуре аналогичное уменьшение — лишь в 1,7 раз. При больших концентрациях SWCNT ($C = 1\%$) меняется форма и уменьшается количество пиков интенсивности, спектр в области от 400 нм до 600 нм сглаживается. Похожая форма спектра для комнатной температуры при фотовозбуждении наблюдается в [3].

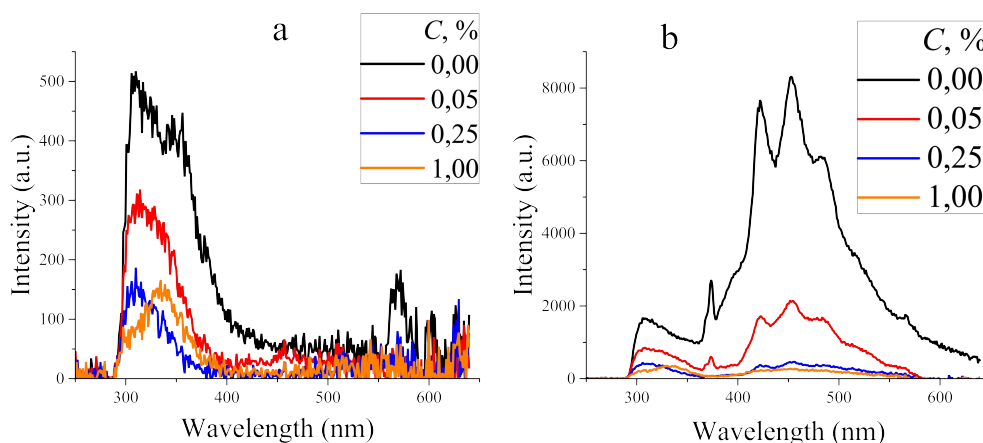


Рис. 1. Спектры рентгенолюминесценции образцов: а — спектр при комнатной температуре, б — спектр при температуре жидкого азота.

На рис. 2а видно, что при увеличении C уменьшается коэффициент пропускания T , причём добавление 0,05%-ной концентрации нанотрубок в TPU уменьшает его T в 3 раза (с 90% до 34%) на 900 нм. При этом у TPU+SWCNT видны 2 области существенного роста T : с 370 нм до 500 нм и с 700 нм до 830 нм. На основании измеренных кривых пропускания и отражения были получены значения коэффициентов поглощения (рис. 2б).

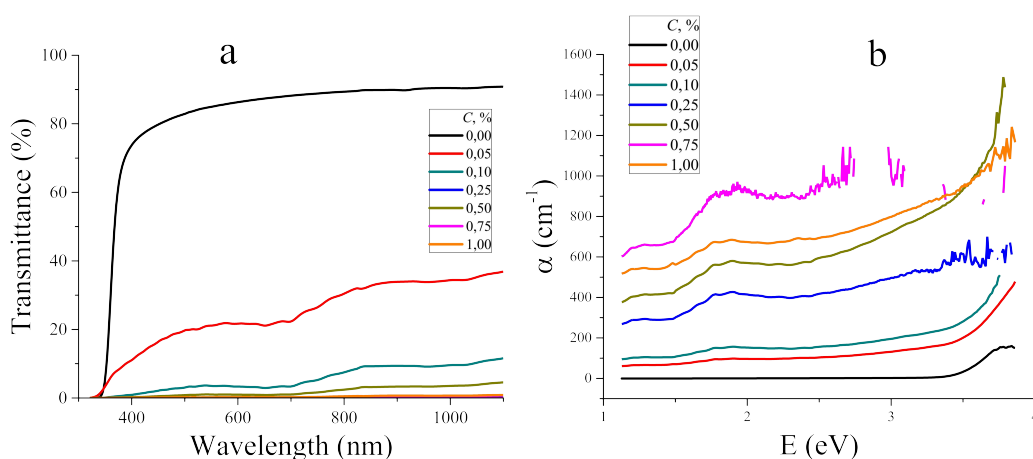


Рис. 2. а — зависимость коэффициента пропускания от длины волны, б — зависимость коэффициента поглощения α от энергии.

Значения $E_g(\alpha)$ и $E_u(\alpha)$ были определены с применением линейной аппроксимации данных на рис. 3а и 3б и показаны в таблице 2. Ширина запрещённой зоны была определена

путём экстраполяции прямой на рис. 3а, найденной на линейном участке в области высоких (E_{g_max}) и низких (E_{g_min}) энергий, до пересечения с осью абсцисс. Энергия Урбаха рассчитывалась как величина, обратная угловому коэффициенту наклона прямой линейного участка в низкоэнергетической области поглощения $E < E_g$ на рис 3б.

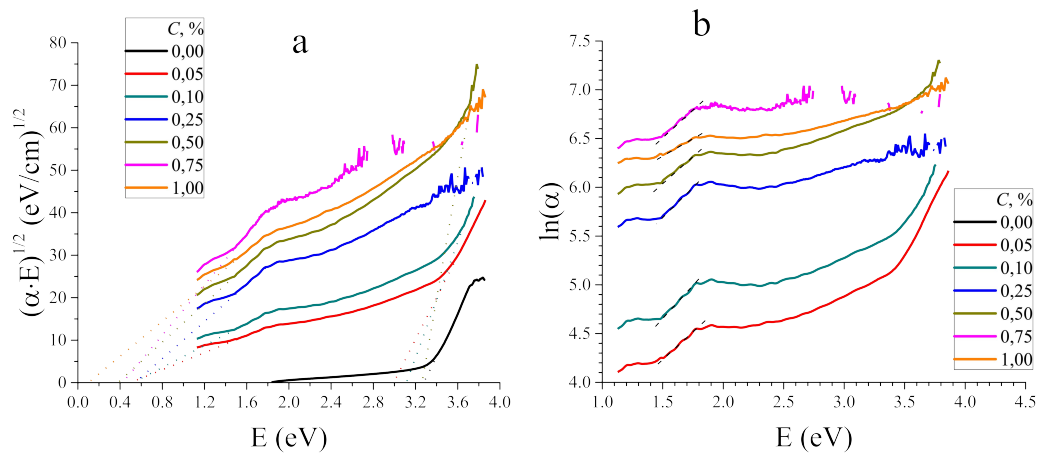


Рис. 3. а — диаграмма Тауца, б — зависимость логарифма коэффициента поглощения от энергии.

Таблица 2. Зависимость ширины запрещённой зоны и энергии Урбаха от концентрации SWCNT (прочерком обозначены ячейки, значения которых определить не удалось).

C, %	0,00	0,05	0,10	0,25	0,50	0,75	1,00
E_{g_max}	3,296	2,998	3,118	-	3,27	-	-
E_{g_min}	-	0,475	0,53	0,512	0,358	0,419	0,087
E_u	-	0,901	0,823	0,849	1,032	0,926	1,457

Из данных, представленных на табл. 2, можно сделать вывод, что добавление одностенных нанотрубок в TPU при малых концентрациях не приводит к значительному изменению значения ширины запрещённой зоны в высокоэнергетической области поглощения (E_{g_max}), которое, вероятно, соответствует TPU. Ширина запрещённой зоны в низкоэнергетической области (E_{g_min}), предположительно, соответствует SWCNT и меняется незначительно вплоть до $C = 0,75$ %, а при увеличении концентрации до 1 % резко уменьшается. В то же время энергия Урбаха также остаётся примерно постоянной вплоть до концентрации в 0,75 %, а при 1 % резко возрастает.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тонков Д. Н., Гасумянц В. Э., Романов В. В., Руль Н. И., Грозова Н. А., Кобыхно И. А. Магнитные свойства и электропроводность полимерных композитов на основе термопластичного полиуретана и одностенных углеродных нанотрубок // 4-я международная конференция «Физика конденсированных состояний». 2025. №4.
2. Zaidi, B., Smida, N., Althobaiti, M.G., Aldajani, A.G., Almdhaibri, S.D. Polymer/Carbon Nanotube Based Nanocomposites for Photovoltaic Application: Functionalization, Structural, and Optical Properties. *Polymers* 2022, 14, 1093. DOI: 10.3390/polym14061093
3. Ismail A. M., El Desouky F. G. Multifunctional Thermoplastic Polyurethane Modified with Holmium Oxide: Insights into Optical, Luminescence, and Dielectric Trends // *Journal of Cluster Science*. 2025. Vol. 37. Article number 3. DOI: 10.1007/s10876-025-02952-6.
4. Younes Ziat, Hamza Belkhanchi, Maryama Hammi, Ousama Ifguis. Epoxy/Silicone Blend Loaded with N-Doped CNT Composites: Study on the Optoelectronic Properties // *International Journal of Photoenergy*. 2021. Article ID 3749722. DOI: 10.1155/2021/3749722.

РАСШИРЕНИЕ ПРИБОРНОЙ БАЗЫ УСТРОЙСТВ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И СЕНСОРИКИ НА ПРИМЕРЕ МАГНИТНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

И.А. Новиков^{1,2}✉

¹ООО «Активная Фотоника», Москва

²Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина)

✉ i.novikov@ntmdt-russia.com

Введение. Необходимость дальнейшей миниатюризации устройств микро- и нанoeлектроники, а также поиск новых физических принципов, лежащих в основе работы компонентов электронной техники, актуализирует многие современные материаловедческие задачи. Среди них особое место занимают синтез и исследование магнитных материалов, которые могут быть применимы в устройствах записи, хранения и передачи информации, высокоразрешающих датчиках магнитного поля, актюаторах и тд [1, 2]. Решение современных диагностических задач в области нанотехнологий сопряжено с созданием актуальной приборной базы [3]. В данной работе представлено три различных вспомогательных модуля для сканирующего зондового микроскопа, способных улучшить и расширить возможности традиционной магнитно-силовой микроскопии (МСМ).

Зондовый датчик капиллярного типа. Традиционные зондовые датчики для магнитно-силовой микроскопии относительно просты в изготовлении, а их применение ничем не отличается от обычных кантилеверов для атомно-силовой микроскопии. Однако есть существенный недостаток, ограничивающий их применимость для исследований, и это быстрая деградация покрытия ввиду механического истирания магнитного слоя с кончика зонда.

В качестве решения данной проблемы был разработан аналог [4] в виде полого капиллярного элемента с запаянным кончиком, внутри которого располагаются магнитные наночастицы со структурой ядро-оболочка [5, 6]. Упомянутые наночастицы могут представлять собой мицеллы, ядром которых выступают оксиды железа, а оболочкой – диоксид кремния. Магнитные наночастицы должны обладать эффектом суперпарамагнетизма, т.е. иметь однодоменное состояние [7]. Благодаря этому, под влиянием внешнего магнитного поля они будут мгновенно ориентироваться внутри капилляра. Использование структуры ядро-оболочка позволяет предотвратить агрегацию наночастиц, из-за чего зонд дольше сохраняет свои магнитные свойства. После наполнения капилляра магнитными наночастицами, он крепится к кварцевому камертону так, как показано на рисунке 1 далее, для работы в режимах shear-force или прерывистого контакта [8].

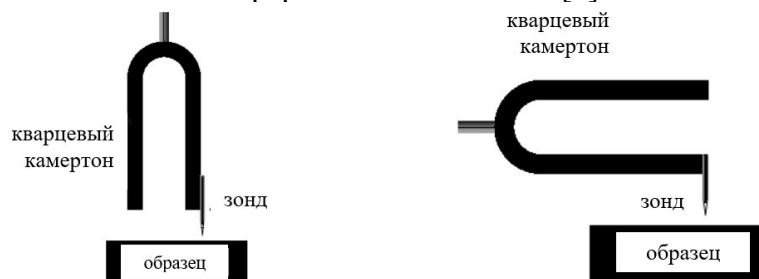


Рис. 1. Схемы возможного крепления капилляра к кварцевому камертону.

Источник внешнего магнитного поля. При анализе магнитных свойств наноматериалов немаловажно оценивать поведение доменной структуры при воздействии внешним магнитным полем. Для этих целей был внедрен источник внешнего магнитного поля [9-11],

встраиваемый в базу атомно-силового микроскопа. Конструкция данного модуля предполагает использование постоянных неодимовых магнитов, обеспечивающих величину магнитного поля до 2500 Гс в зазоре между магнитопроводами. Отсутствие электромагнитов позволяет сделать модуль более легким и не требующим дополнительного охлаждения, что исключает влияние внешних вибраций и термического дрейфа на измерения.

Проблемой многих предшествующих прототипов источников магнитного поля для МСМ является невозможность менять ориентацию магнитных полей относительно плоскости поверхности измеряемого образца, поэтому, как правило, линии магнитного поля были ориентированы либо ортогонально, либо параллельно плоскости образца [12-14]. Предлагаемая конструкция выполнена таким образом, чтобы нивелировать данный недостаток. Магнитопровода изготовлены с асимметричной геометрией, что позволяет создавать участки с разным направлением магнитного поля в рамках одного устройства (рис. 2).

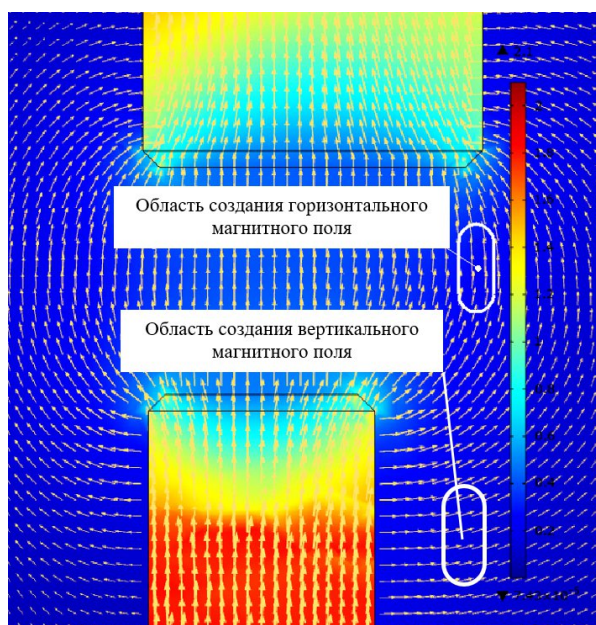


Рис. 2. Области создания горизонтального и вертикального магнитных полей.

С помощью предложенного источника внешнего магнитного поля становится возможно проводить измерения стандартных для атомно-силовой микроскопии образцов размерами $5 \times 5 \text{ мм}^2$ с толщиной не более 1,3 мм.

Магнитооптический модуль. Внедрение магнитооптического модуля в стандартную систему СЗМ позволяет решить несколько задач, непреодолимых в рамках традиционных МСМ измерений [15]. Во-первых, скорость получения данных с помощью зондового микроскопа как правило составляет несколько минут. Если же структура поверхности образца заранее известна, то время сканирования можно сократить и до долей минуты. Однако наблюдать и регистрировать мгновенные изменения СЗМ не может априори. Эту проблему решает микроскоп, основанный на эффекте Керра, позволяя сразу же наблюдать перестройку доменных границ при, например, приложении внешнего магнитного поля. Во-вторых, размер области сканирования атомно-силового микроскопа ограничен ходом пьезосканера, который составляет не более 100 мкм в латеральных направлениях XY. Если же размер доменов оказывается больше этой величины или сопоставим с ней, то полноценно оценить характер распределения магнитных доменов по поверхности образца становится невозможным. Для оптической регистрации же данные величины являются стандартными.

Данный магнитооптический модуль может быть установлен в рамках совмещения со стандартной системой вспомогательного видеонаблюдения, которой оснащены большинство сканирующих зондовых микроскопов. Установка поляризатора после источника света и анализатора на вращающейся платформе перед камерой позволяет подбирать угол поляризованной электромагнитной волны и исследовать материалы с перпендикулярной магнитной анизотропией [16]. В качестве примера на рис. 3 далее приведено изображение, полученное с вышеописанного модуля, интегрированного со сканирующим зондовым микроскопом.

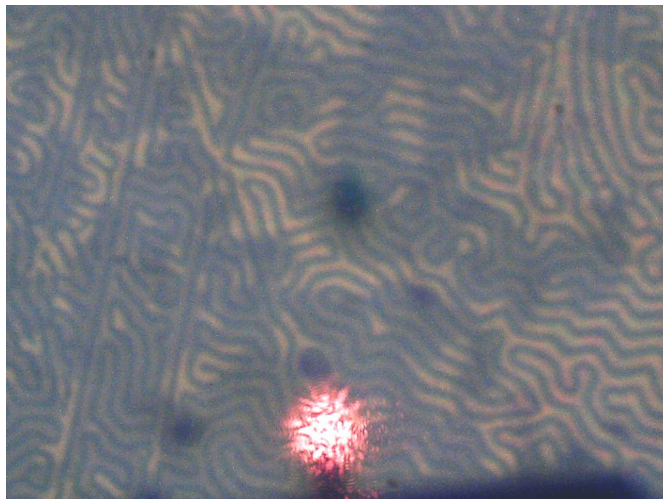


Рис. 3. Регистрация магнитных доменов.

Заключение. В рамках данной работы была продемонстрирована необходимость в развитии приборной базы современного диагностического оборудования в связи с текущими наноматериаловедческими задачами. Представленные модули опираются на исследование магнитных материалов и необходимы для повышения надежности используемых расходных материалов, которыми являются зондовые датчики, а также для удобства анализа поведения магнитных материалов в условиях нахождения в постоянных внешних магнитных полях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федотов А. Ю., Северюхина О. Ю., Саломатина А. Ю. Исследование магнитных свойств нанопленок кобальта в условиях внешнего поля методом математического моделирования // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2025. №. 17. С. 497-505.
2. Telegin A., Sukhorukov Y. Magnetic semiconductors as materials for spintronics // Magnetochemistry. – 2022. V. 8. №. 12. P. 173.
3. Сканирующая зондовая микроскопия для диагностики и исследования свойств наноструктурированных материалов / А. Ю. Гагарина, Д. А. Козодаев, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников // V Байкальский материаловедческий форум : Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Улан-Удэ - оз. Байкал (с. Горячинск), 04–10 июля 2025 года. – Улан-Удэ: Институт монголоведения, буддологии и тибетологии Сибирского отделения Российской академии наук, 2025. – С. 174-176.
4. Патент № 2818681 С1 Российская Федерация, МПК G01Q 60/08, G01Q 70/08. Зонд для магнитно-силовой микроскопии : № 2023129275 : заявл. 13.11.2023 : опубл. 03.05.2024 / Д. А. Козодаев, А. А. Яковлева, И. А. Новиков [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "НОВА СПб".
5. Абилкосимова Г. М., Аронбаев Д. М., Аронбаев С. Д. Магнитные наночастицы: получение, стабилизация, применение // Universum: химия и биология. 2024. №4 (118).
6. Wang S. et al. Magnetic nanostructures: Rational design and fabrication strategies toward diverse applications // Chemical reviews. 2022. V. 122. №. 6. P. 5411-5475.

7. H. Wei, Y. Hu, J. Wang [et al.]. Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles: Cytotoxicity, Metabolism, and Cellular Behavior in Biomedicine Applications // International Journal of Nanomedicine. 2021. V. 16. P. 6097–6113.
8. V. T. Tung, S. A. Chizhik, T. X. Hoai [et al.]. Tuning Fork Scanning Probe Microscopes – Applications for the Nano-Analysis of the Material Surface and Local Physico-Mechanical Properties // Scanning Probe Microscopy Physical - Property Characterization at Nanoscale. – 2012. – P. 33–56.
9. D. A. Kozodaev, I. A. Novikov, S. V. Kostromin. External magnetic field source for nanoscale research // The 22nd International Conference on Magnetism : Book of Abstracts (ICM 2024), Bologna, Italy, 30 июня – 05 2024 года. – Bologna, 2024.
10. Патент № 2833421 С1 Российская Федерация, МПК G01R 33/12. Источник внешнего магнитного поля для магнитно-силовой микроскопии : заявл. 25.04.2024 : опубл. 21.01.2025 / Д. А. Козодаев, И. А. Новиков, С. В. Костромин ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "АКТИВНАЯ ФОТОНИКА".
11. D. A. Kozodaev, V. A. Moshnikov, I. A. Novikov. ADDITIONAL MODULE FOR CREATING AN EXTERNAL MAGNETIC FIELD FOR MAGNETIC FORCE MICROSCOPY // IX Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism». 2025. V. 1. P. 124-125.
12. R. Proksch, E. Runge, P.K. Hansma [et al.]. High field magnetic force microscopy // Journal of Applied Physics. 1995. V. 78. P. 3303-3307.
13. R.D. Gomez, E. R. Burke, I. D. Mayergoyz. Magnetic imaging in the presence of external fields: Technique and applications // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. P. 6441–6446.
14. H. Shinigava, T. Takamasu, G. Kido. Development of variable-temperature scanning probe microscope for high magnetic fields // Physica B. 2001. V. 298. P. 580-584.
15. Патент № 2849975 С1 Российская Федерация МПК G01Q 60/02, B82Y 35/00. Сканирующий зондовый микроскоп, совмещенный с магнитооптическим микроскопом, для исследования магнитных материалов с перпендикулярной магнитной анизотропией : заявл. 05.08.2024 : опубл. 01.11.2025 / Д. А. Козодаев, И. А. Новиков, А. В. Кимель, Д. И. Хусяинов, А. Ступакевич ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "АКТИВНАЯ ФОТОНИКА".
16. A. Hubert, R. Schafer. Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures / New York: Springer-Verlag, 1998. 720 p.

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОГО ПАРАМЕТРА В ОБОБЩЁННОМ МЕТОДЕ ТРАПЕЦИЙ

П.А. Павленко✉, Д.С. Иванов, Д.А. Тархов, А.Е. Яковлева
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ polyna06mayl@gmail.com

Введение. Развитие методов решения параметризованных дифференциальных уравнений (ДУ) — ключевой вызов для создания адаптивных моделей в инженерии и науке о данных, например, при построении кибер-физических систем и цифровых двойников [1, 2]. Классические сеточные методы фиксированы по структуре [3], тогда как парадигма физически информированных нейронных сетей (ФИНС) открывает путь к построению гибких, обучаемых математических моделей [4,5]. Одним из перспективных направлений является модификация классических численных схем, таких как метод Эйлера, путём замены их параметров на нейросетевые функции [6, 7].

В данной работе мы расширяем этот подход, применяя его к обобщённому методу трапеций, и переводим его параметр u из ранга скалярной константы в статус полноценной функции состояния: $u = u(x, \alpha)$. Такая параметризация, реализуемая через нейросетевую модель, позволяет решению адаптироваться не только к изменению параметра задачи α , но и к локальным особенностям по пространственной переменной x .

Цель исследования — не просто продемонстрировать работоспособность подхода, а количественно определить оптимальную архитектуру нейросети-регулятора $u(x, \alpha)$. Мы систематически исследуем, как глубина (1–5 слоёв) и ширина (1, 3, 5, 15 нейронов) сети влияют на точность аппроксимации решения параметризованного ДУ второго порядка. Ключевой вопрос: существует ли порог сложности, за которым рост числа параметров модели перестает окупаться приростом точности? Ответ на него позволяет найти конфигурацию, обеспечивающую максимальную эффективность, а не максимальную вычислительную нагрузку.

Модель. В качестве модельной задачи для тестирования предложенного подхода рассмотрено параметризованное линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$y''(x) + A(\alpha) \cdot y'(x) + B(\alpha) \cdot y(x) = 0, \quad A(\alpha) = \alpha + \frac{1}{\alpha}, \quad B(\alpha) = -\alpha + \frac{1}{\alpha},$$

с начальными условиями: $y(0) = 0, y(1) = 1$. Решение ищется в области: $x \in [0,1] \quad \alpha \in [0.01, 0.1]$.

В основе метода лежит обобщённая схема трапеций, вводится параметр метода u . Решение строится итерационно для различного числа слоёв n (от 1 до 5), что позволяет получить семейство параметризованных аналитических выражений $y_n(x, \alpha, u)$.

Например, для $n=1$:

$$y1(x, \alpha, u) = - \frac{x\alpha}{-\alpha + x^2(-1+u)^2(-1+\alpha^2) + x(-1+u)(1+\alpha^2)}$$

Для $n=2$

$$y2(x, \alpha, u) = - \frac{4x\alpha(-4\alpha + x^2(-1+u)u(-1+\alpha^2) + x(-1+2u)(1+\alpha^2))}{(-4\alpha + x^2(-1+u)^2(-1+\alpha^2) + 2x(-1+u)(1+\alpha^2))^2}$$

Аналогичные более сложные выражения получены для $n = 3, 4, 5$.

Для каждого аналитического решения $y_n(x, \alpha, u)$ проведена оптимизация с использованием нейронной сети с архитектурой:

$$u(x, \alpha) = \sum_{i=1}^N c_i \cdot \tanh[a_i(x - d_i)] \cdot \tanh[a_{1i}(\alpha - d_{1i})] + L_0,$$

где $N = 1, 3, 5, 15$ — количество нейронов в скрытом слое.

Веса сети подбирались с помощью минимизации функционала невязки: $\sum_{i=1}^M R(x_i, \alpha_i, \theta)^2$, где невязка R определяется как: $R(x, \alpha, \theta) = y_{xx}(x, \alpha) + A(\alpha) \cdot y_x(x, \alpha) + B(\alpha) \cdot y(x, \alpha)$.

Минимизация проводилась с помощью метода RProp, пробные точки x_i, α_i регенерировались каждые 5 шагов процесса оптимизации.

Результаты. Ниже представлены некоторые результаты вычислительных экспериментов в том случае, когда u является функцией параметра α и переменной x .

Таблица 1. Влияние глубины и ширины сети на точность аппроксимации.

Кол-во слоёв	Кол-во нейронов	Ошибка нейросети	Ошибка константной модели	Улучшение, %
1 слой	1	0.223129	0.494311	54.86%
	3	0.0393119	0.497069	92.09%
	5	0.0943487	0.482873	80.46%
	15	0.035386	0.493195	92.82%
2 слоя	1	0.100291	0.334466	70.02%
	3	0.0463755	0.342384	86.45%
	5	0.0189031	0.335796	94.37%
	15	0.020291	0.332456	93.90%
3 слоя	1	0.116778	0.257863	54.72%
	3	0.0971421	0.258323	62.39%
	5	0.0925255	0.254970	63.71%
	15	0.0945254	0.244760	61.38%
4 слоя	1	0.0171167	0.202110	91.53%
	3	0.0161651	0.209629	92.29%
	5	0.0107096	0.204214	94.76%
	15	0.0130872	0.200413	93.47%
5 слоёв	1	0.0359692	0.174120	79.34%

Кол-во слоёв	Кол-во нейронов	Ошибка нейросети	Ошибка константной модели	Улучшение, %
	3	0.0340384	0.169019	79.86%
	5	0.0291331	0.169776	82.84%
	15	0.0307185	0.169579	81.88%

Примечание: В таблице приведён показатель «Улучшение», который рассчитывается как процентное снижение ошибки нейросетевой модели относительно ошибки константной модели.

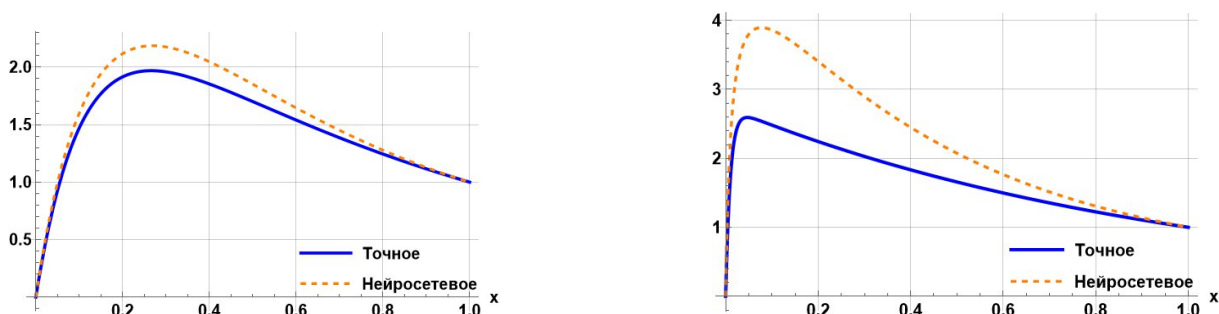


Рис. 1. Распределение точного и нейросетевого решений для $\alpha=0.1$ и $\alpha=0.01$, 3 нейрона и 1 слоя.



Рис. 2. Распределение точного и нейросетевого решений для $\alpha=0.1$ и $\alpha=0.01$, 5 нейронов и 4 слоя.



Рис. 3. Распределение точного и нейросетевого решений для $\alpha=0.1$ и $\alpha=0.01$, 15 нейронов и 4 слоя.

Визуальный анализ подтверждает, что увеличение числа нейронов способствует снижению ошибки в областях с высокой нелинейностью, однако этот эффект заметно выражен лишь при переходе от 1 к 3-5 нейронам. Распределения ошибок для сетей с 5 и 15 нейронами визуально близки, что количественно подтверждается значениями в таблицах.

Для каждого количества слоёв проанализирована зависимость точности от числа нейронов (1, 3, 5, 15). Результаты показывают, что для всех архитектур существует оптимальный диапазон (3–5 нейронов), обеспечивающий баланс между точностью и

вычислительной сложностью. Ключевым результатом является то, что увеличение числа нейронов до 15 не даёт существенного выигрыша в точности по сравнению с конфигурацией из 5 нейронов, а в некоторых случаях (например, для трёхслойной сети) приводит даже к её снижению. Это экспериментально подтверждает гипотезу о существовании пороговой конфигурации, после которой дальнейшее наращивание ширины сети становится неэффективным.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Lee J., Bagheri B., Kao H.A.* A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23.
2. *Rasheed A., San O., Kvamsdal T.* Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 21980–22012.
3. *Самарский А.А., Гулин А.В.* Численные методы. М.: Наука, 1989.
4. *Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E.* Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations // *Journal of Computational Physics*. 2019. Vol. 378. P. 686–707.
5. *Lagaris I.E., Likas A., Fotiadis D.I.* Artificial neural networks for solving ordinary and partial differential equations // *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1998. Vol. 9. P. 987–1000.
6. *Lazovskaya T., Malykhina G., Tarkhov D.* Physics-Based Neural Network Methods for Solving Parameterized Singular Perturbation Problem // *Computation*. 2021. Vol. 9. P. 97.
7. *Tarkhov D., Vasilyev A.* Semi-Empirical Neural Network Modeling and Digital Twins Development. Academic Press, 2020.

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ФОНОВЫМ ШУМОМ В ОПЕРАЦИОННОЙ: ГОЛОСОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЕ ВОСПРИЯТИЕ

Е.В. Пимахина¹✉, С.О. Поддубский¹, Т.А. Яричук¹, Н.В. Вишняков²

¹Рязанский государственный медицинский университет им. Павлова, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Рязань

²Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань

✉ ElenaPim@yandex.ru

Введение. Современная операционная представляет собой сложную междисциплинарную среду, где эргономика, психологическая атмосфера и когнитивная нагрузка медицинских работников приобретают все большее значение в дополнение к техническим аспектам хирургического вмешательства [1 - 7]. Цифровизация, информационная перегрузка и строгие требования к инфекционному контролю привели к хроническому стрессу, усталости и выгоранию среди хирургов, анестезиологов и медсестер [8]. В этом контексте организация сенсорной среды, особенно фонового шума, стала важным фактором поддержания командной работы. Идея использования музыки в операционной не нова, американский хирург Эванс впервые отметил успокаивающий эффект музыки. Последующие исследования подтвердили, что музыка может снижать уровень кортизола, замедлять частоту сердечных сокращений и улучшать настроение [8]. Однако все больше данных свидетельствует о том, что музыка также представляет потенциальные риски: маскирует сигналы мониторинга, мешает вербальному общению и отвлекает, особенно анестезиологов, которые полагаются на слуховое восприятие [9].

Различия в восприятии музыки среди членов операционной бригады остаются ключевой проблемой. Хирурги, использующие визуальное восприятие, обычно воспринимают музыку как фактор, способствующий концентрации внимания, в то время как анестезиологи могут находить ее отвлекающей. Медсестры, выполняющие рутинные задачи, часто видят в музыке способ борьбы с монотонностью [8]. Однако в российской научной литературе нет систематического исследования, охватывающего все профессиональные категории и учитывающего возрастные различия. Существующие технологические решения, такие как управление музыкой с помощью сенсорных панелей или мобильных устройств, нарушают принципы асептики [10]. Между тем, разработка технологии распознавания речи на локальном уровне, не требующей подключения к интернету, позволила внедрить бесконтактное голосовое управление, обеспечивающее удобство, мгновенную реакцию и асептические свойства.

Целью данного исследования является внедрение и оценка инновационной модели контроля уровня шума в операционной, использующей локальную акустическую систему с голосовым интерфейсом и учитывающей профессиональные и возрастные характеристики медицинского персонала.

Материалы и методы. Данное исследование проводилось в многопрофильной больнице с сентября по ноябрь 2025 года. В исследовании приняли участие 52 медицинских работника: 18 хирургов (34,6%), 8 анестезиологов/реаниматологи (15,4%) и 26 медсестер (50,0%). Средний возраст участников составил $42,3 \pm 8,7$ года. Для анализа влияния возраста выборка была разделена на две группы: до 50 лет ($n = 40$) и старше 50 лет ($n = 12$).

Музыкальное сопровождение обеспечивалось с помощью локальной системы «умных колонок», поддерживающей голосовое управление. Участники могли отдавать различные команды в любое время: «Включить музыку», «Выключить музыку» или «Увеличить/уменьшить громкость». Инструментальная музыка, использованная в

эксперименте (классическая, джазовая, эмбиентная), имела темп 60-80 ударов в минуту и громкость 45-50 дБ (измерено с помощью измерителя громкости Testo 815), что не заглушало аудиосигнал устройства.

Субъективное восприятие оценивалось с помощью разработанного авторами опросника, состоящего из 19 пунктов и включающего категориальные оценки (положительные/нейтральные/отрицательные), оценки легкости управления речью и открытые вопросы. Статистический анализ проводился с использованием программного обеспечения для комплексного анализа данных Statistica (разработанного компанией StatSoft). Для сравнения пропорций использовался точный тест Фишера (двусторонний тест); уровень значимости был установлен на $p < 0,05$.

Результаты. Анализ показал значительные различия в восприятии музыки, которые были связаны с родом занятий и возрастом. Среди хирургов моложе 50 лет 92,3% (12 из 13) имели положительное отношение к музыке, в то время как среди хирургов в возрасте 50 лет и старше положительное отношение имели только 28,6% (2 из 7). Разница была статистически значимой ($p = 0,023$). Среди анестезиологов моложе 50 лет все 7 участников (100%) поддерживали использование музыки; в то время как среди анестезиологов старше 50 лет только половина (50%) поддержала это. Хотя разница не была статистически значимой ($p = 0,222$), положительное отношение значительно снижалось с возрастом. Примечательно, что все медсестры известного возраста ($n = 7$, включая 1 старше 50 лет) положительно относились к музыке (100%). Значимой разницы в возрасте среди медсестер в этой группе не было ($p = 1,000$).

Результаты подтверждают, что отношение к музыке в операционной не является универсально однородным, и зависит от профессиональной роли и возраста. Впервые в российской выборке зафиксирована значительная поляризация мнений среди хирургов ($p = 0,023$), что может отражать культурные различия: врачи старшего возраста традиционно придерживаются принципа «поддержания тишины в операционной». Для анестезиологов снижение принятия музыки с возрастом может быть связано с их повышенной чувствительностью к слуховым помехам и увеличенной физиологической нагрузкой на слуховую систему от мониторов. Медицинский персонал оказывал достаточную поддержку независимо от возраста, что согласуется с ролью музыки в предотвращении ежедневного выгорания.

Новаторство данного исследования заключается не только в использовании системы голосового управления для обеспечения асептических условий, но и в демонстрации необходимости персонализированного, а не централизованного подхода к управлению звуковой средой. Предложенная система голосового управления звуковой средой является практичным, безопасным и междисциплинарным решением. Стоит отметить, что аналогичный подход применим не только к операционным в медицинских учреждениях, но может использоваться и инженерным персоналом в лабораториях при проведении сложных научных экспериментов [11-13]. Результаты подтверждают, что воспроизведение музыки в операционной должно происходить в соответствии с пожеланиями конкретных членов команды, а не по единому сценарию. Это соответствует концепции «умной операционной», где технологии адаптируются к пользователям, а не пользователи адаптируются к технологиям. Данное исследование закладывает основу для разработки профессиональных рекомендаций по эргономике операционной и цифровой трансформации хирургических и медицинских услуг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пимахина Е.В., Пимахин А.А., Жигунов В.В., Толкач Н.М. Патент на изобретение «Учебный оптический видеоларингоскоп» // № патента 2850372, выдан 11 ноября 2025г.

2. Пимахин А.А., Пимахина Е.В., Толкач Н.М., Матюхин Е.П. Оценка точности портативных и стационарных пульсоксиметров на фоне модели ишемии // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Биомедсистемы-2023: Сборник трудов XXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 2023. – С. 164-167.
3. Давыдова О.Г., Пимахина Е.В., Аксентьев С.Б. Оценка работы портативного пульсоксиметра в условиях ишемии // Наука молодых (Eruditio Juvenium). – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 24-30. – DOI 10.23888/HMJ20208124-30.
4. Пимахин А.А., Толкач Н.М., Пимахина Е.В. Сравнение эффективности портативного и профессионального пульсоксиметров в стационарных условиях // Научно-образовательная конференция Актуальные вопросы и инновационные технологии в анестезиологии и реаниматологии: сборник тезисов. Санкт-Петербург, 2020. – С. 40.
5. Пимахина Е.В., Пимахин А.А., Вишняков Н.В., Толкач Н.М. Комплексное исследование эффективности трансфузии и реинфузии на основании морфофункционального анализа эритроцитов // Форум анестезиологов и реаниматологов России ФАРР-2021: Сборник тезисов XIX съезда федерации анестезиологов и реаниматологов. Санкт-Петербург, 2021. – С. 130-131.
6. Pimakhina E.V., Pimakhin A.A., Vishnykov N.V., Tolkach N.M., Arsentiev S.B. Comparison of the effectiveness of blood transfusion and reinfusion // Journal of Physics: Conference Series: 8th International School and Conference "Saint Petersburg OPEN 2021": Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, SPbOPEN 2021, Saint Petersburg. – IOP Publishing Ltd: 2021. – P. 012119. – DOI 10.1088/1742-6596/2086/1/012119.
7. Пимахина Е.В., Толкач Н.М., Окрут О.В., Близиякова Р.Э. Способ уменьшения возможности микроэмболии материальными частицами кристаллоидов при внутрисосудистом введении растворов // Естественнонаучные основы медико-биологических знаний: Материалы всероссийской конференции студентов и молодых ученых с международным участием. – Рязань: Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, 2017. – С. 342-344.
8. Козлов А.Ю., Петров С.В. Профессиональное выгорание у хирургов: факторы риска и профилактика. Вестник хирургии имени Грекова, 2021;140(4):92–97. DOI: 10.17116/hirurgia202114004192
9. Пимахина Е.В., Пимахин А.А., Марков А.И., Васин И.В. Медицинский мониторинг вводного наркоза в обучении ординаторов по специальности Анестезиология-реаниматология. Опубликовано в: «Российский форум анестезиологов и реаниматоров (ФАРР-2024)». Труды Конгресса Федерации анестезиологов и реаниматоров. Санкт-Петербург, 2024. – С. 210-211.
10. Пимахина Е.В., Пимахин А.А., Васин И.В., Супряга А.А. Специализированное программное обеспечение в обучении ординаторов по специальности Анестезиология-реаниматология. // Современные научные и образовательные вопросы. Том. 4, 2024; URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=33558> (дата обращения: 10 января 2026); DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.33558>.
11. Толкач Н.М., Казанков А.И., Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Трусов М.А. Современное зондово-оптическое промышленное и научное оборудование для исследований аморфных и микрокристаллических полупроводниковых материалов // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сборник трудов Международной конференции, Санкт-Петербург, 2025. – С. 65-66.
12. Толкач Н.М., Вишняков Н.В., Козодаев Д.А., Литвинов В.Г., Якубов А.О. Рамановская спектроскопия пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ с разной степенью кристалличности после лазерного воздействия // Российская конференция по комбинационному рассеянию света – 8-й Сибирский семинар по спектроскопии комбинационного рассеяния света – Школа молодых ученых по актуальным проблемам комбинационного рассеяния света – КР-2025: тезисы докладов, Красноярск, 2025. – С. 49.
13. Steparuk A.S., Irgashev R.A., Zhilina E.F., Emets V.V.3, Grinberg V.A., Tekshina E.V., Belova E.V., Tolkach N.M., Lazarenko P.I., Rusinov G.L., Kozyukhin S.A. Thieno[3,2-b]indole / 2,2'-bithiophene-based D- π -A dyes for dye sensitized solar cells // Dyes and Pigments. – 2024. – Vol. 222. – P. 111917. – DOI 10.1016/j.dyepig.2023.111917.

ФОРМИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ КОМПЕТЕНЦИЙ У СТАРШЕКЛАССНИКОВ И СТУДЕНТОВ ЧЕРЕЗ ПРОЕКТНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ С ЭЛЕМЕНТАМИ СВОБОДНОГО ТВОРЧЕСТВА И ВЗАИМНОГО РЕЦЕНЗИРОВАНИЯ

Д.А. Приказчиков^{1,2}✉

¹АНОО "Физтех-лицей" им. П. Л. Капицы, Долгопрудный

²(НИУ) МФТИ, Москва

✉ d.prikazchikov@phl.ru

Введение. В работе представлен опыт организации проектной деятельности для учащихся 11-х классов и студентов младших курсов, ориентированных на инженерно-физические специальности. Описанная методика направлена на преодоление формального подхода к выполнению лабораторных работ и формирование навыков, необходимых для будущей научной деятельности, через цикл взаимосвязанных этапов: самостоятельное планирование эксперимента, практическое выполнение, оформление отчёта, кросс-рецензирование и публичную защиту.

Основное содержание. В условиях, когда традиционные лабораторные работы зачастую сводятся к репродуктивному выполнению готовых инструкций, была поставлена задача создать педагогическую модель, превращающую обучающегося в активного исследователя.

Методика работы строилась на пяти последовательных этапах, составляющих единый цикл развития компетенции:

1. Освоение инструментария. На начальном этапе учащиеся приобретали ключевые навыки современного исследователя: построение и анализ графиков в Python и оформление научных текстов в LaTeX. Это создавало техническую основу для самостоятельной работы.
2. Самостоятельное планирование и выполнение эксперимента. Вместо готовых «методичек» учащимся предлагалась лишь тема и базовое оборудование (напр., «Исследование движения маятника Максвелла», «Определение модуля упругости желе», «Измерение термоЭДС»). Им предстояло самостоятельно сформулировать цель, разработать методику, провести измерения и обработать данные. Этот этап поощрял свободное творчество в рамках научного подхода.
3. Оформление формального отчёта. Полученные результаты учащиеся оформляли в виде структурированного отчёта, включающего постановку задачи, описание методики, данные, графики, анализ и выводы. Это приучало к строгости и аккуратности в представлении научных результатов.
4. Кросс-рецензирование. Сформированные отчёты подвергались анонимному взаимному рецензированию. Учащиеся анализировали работы коллег, давая оценку обоснованности методики, корректности обработки данных и логичности выводов. Этот этап был ключевым для развития критического мышления и умения работать с научным текстом, что является прямой подготовкой к будущей публикационной и экспертной деятельности.
5. Публичный доклад и защита. Завершающим этапом стала презентация своего проекта перед группой, ответы на вопросы и защита принятых методических решений. Это развивало коммуникативные навыки и способность аргументированно отстаивать свою точку зрения.

Трудности и ограничения. В ходе реализации настоящей методики стоит отметить ряд сложностей, которые требуют закладывание большего времени в методическую подготовку. Основной из них, стоит отметить сопротивление учащихся новым для них инструментам (Python и Latex), а также необходимости готовить отчёт не в привычном им виде лабораторной работы. Указанная сложность была нивелирована соревновательным моментом (как например в кросс-рецензировании), нестандартностью самих задач и реализацией стимулирующей функции оценки на каждом этапе. Важно упомянуть высокие квалификационные требования к педагогу, поскольку на начальном этапе от него требуется подготовить описание темы и возможные пути развития так, чтобы учащиеся смогли сами поставить себе задачу.

Результаты и выводы. Реализация данной методики показала значительный рост мотивации и глубины понимания физических принципов у участников. В первую очередь, это подтверждается ростом уверенности в своих силах и навыках части из них, что переориентировало их на более престижные вузы. Создание положительного эмоционального фона, основанного на осознании уникальности и ценности собственного исследования, стало важным педагогическим результатом. Учащиеся смогли освоить конкретные физические явления, получили целостный опыт научной работы с выполнением всех шагов от гипотезы до публичного обсуждения. Таким образом, предложенная методика эффективно формирует основы исследовательской культуры и критического мышления, что является необходимым для подготовки будущих инженеров и ученых.

Благодарности. Автор выражает благодарность учащимся 11-х классов инженерного профиля АНОО "Физтех-лицей" им. П. Л. Капицы за активное участие в проекте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследовательская и проектная деятельность учащихся в области естественных наук: сборник статей/ Ред.-сост. А. В. Леонтович. – М.: Журнал «Исследователь/Researcher», 2024. – 128 с.
2. Савенков, А.И. Психологические основы исследовательского подхода к обучению / А.И. Савенков. – М., 2006.
3. Бухаркина М.Ю., Полат Е.С. Современные педагогические и информационные технологии в системе образования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 368 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗРАБОТКИ ФОТОКАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА

Д.Г. Радайкин✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.

И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

✉ dima19980219@gmail.com

Введение. Загрязнение окружающей среды является одним из масштабных и тревожных экологических проблем современности и будущего, достигшая уровня глобального кризиса. Микропластик на данный момент был обнаружен уже во всех экосистемах, в частности в водной среде, почве, воздухе и в живых организмах. Эта проблема не знает границ и затрагивает даже нетронутые удалённые районы планеты.

По своей природе естественного разрушения, микропластик в ходе жизненного цикла не разлагается на безопасные составляющие, а распадается на более мелкие фрагменты, не менее опасные, чем крупные предшественники. В конечном итоге достигает наноразмерного диапазона.

В качестве перспективного метода борьбы с данным видом загрязнения необходимы разработки специальных методов фотокатализа. Итоговым результатом воздействия фотокатализатора на микро- и нанопластик должно быть его полное разложение до безопасных составляющих.

Согласно основным принципам современной наноархитектоники [1-2] катализатор проектируется не как однородный наноматериал, а как система с контролируемой иерархической структурой на разных масштабах: атомном (точечные дефекты, допанты), нано- (размер и форма кристаллов, гетеропереходы), микро- (пористость, агрегация) и макро- (форма частиц, 3D-архитектура). У проектирования каждого уровня своя задача:

- Атомный уровень – регулировка электронной структуры материала;
- Наноуровень – управление переносом заряда; создание энергетического рельефа;
- Микро- и макроуровень – максимизация доступа активных центров и обеспечения эффективного контакта с крупными частицами микропластика.

Применение подходов наноархитектоники позволяет перейти от случайных находок к систематическому созданию функционально-оптимизированных каталитических систем, где каждый структурный элемент имеет четкое функциональное значение для эффективного решения сложной задачи – фотокаталитического разложения устойчивых полимерных загрязнений.

Цель данной работы – описать алгоритм экспериментального исследования и оптимизации фотокатализаторов, включая оценку их активности, определение механизма деградации и выявление «узких мест» для дальнейшего улучшения структуры.

Эксперименты и исследования вопроса подбора оптимального катализатора для деградации полимерных соединения нужно разделить на две группы: 1) – характеристики самого катализатора; 2) – анализ деградации полимера.

Методы характеристики катализаторов. Для выбора эффективной стратегии разработки каталитических систем необходима детальная характеристика катализатора на основе учебно-педагогических навыков по структурно-морфологическому анализу каталитических материалов [3-4]. Растровая электронная микроскопия (РЭМ) позволяет определить морфологию материала (нанолисты, наностержни, наноцветы и так далее), размер частиц и пористость. Рамановская спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия обеспечивает анализ состава и состояния поверхности. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) дает

возможность получать карту распределения механических (модуль Юнга, адгезия) и электронных свойств (локальная проводимость) с наноразрешением. Данный анализ является особо актуальным при проектировании материалов с гетеропереходами и композитов, так как дает информацию процессах на интерфейсах.

Получение информации по оптоэлектронным свойствам дает важную информацию о времени жизни электрон-дырочных пар. Спектроскопия диффузного отражения (DRS) позволяет определить ширину запрещенной зоны и оценить поглощение в УФ и видимой области спектра. В случае с плазмонными катализаторами идентифицирует пик плазмонного резонанса (ЛПР). Фотоэлектронная спектроскопия (XPS) дает информацию о модификации поверхности, включая атомный дизайн и наноархитектонику собственных дефектов-вакансий, формирующих активные адсорбционные центры.

Также важным является анализ удельной поверхности и пористости материала. Площадь поверхности, объем и размер пор прямо коррелирует с количеством активных центров и способностью сорбировать полимерные фрагменты.

Анализ деградации полимеров. Следующим шагом для понимания выбора стратегии является анализ процесса деградации микропластика и интерпретация результата. Необходимо выделять два этапа данного анализа: 1) In-situ с помощью ИК-Фурье спектроскопии с пропусканием или отражением, который позволяет прямое наблюдение в реальном времени за исчезновением полос полимера (например, C=H, C=O, легкие углеводороды); 2) Анализ образцов микропластика после воздействия катализатора с помощью АСМ, СЭМ и Рамановской спектроскопии. АСМ позволяет получить количественное измерение изменений физических параметров полимера, таких как

- Средняя высота и размер частиц;
- Шероховатость поверхности;
- Модуль Юнга;
- Адгезия.

Анализ вышеперечисленных величин позволяет сделать заключение о природе протекающей деградации и активности каталитической системы в целом. РЭМ в дополнении к АСМ позволяет получить визуализацию поверхностных дефектов, трещин и измельчения, а рамановская спектроскопия дает химический анализ поверхности и детектирует образование новые функциональные группы.

Стратегии наноинженерии и оптимизация. Основным экспериментом в вопросе нейтрализации микропластика с помощью катализатора является исследование его воздействия на полимер. Полученные результаты в совокупности с определёнными физико-химическими характеристиками материала катализатора позволяют не просто подтвердить активности, а определить «слабое звено» в цепочке данного процесса: поглощение света – генерация носителей зарядов – разделение их и транспорт – поверхностная реакция. На основе этой диагностики выбирается точечная стратегия наноархитектоники.

Рассмотрим несколько примеров устранения слабых мест каталитических систем:

1) – Малая степень поглощения видимого света, что означает широкую ширину запрещенной зоны. В данном случае можно выделить несколько стратегий наноархитектоники: допирование металлами/неметаллами (N, C, S) для создания внутризонных уровней; создание гетеропереходов (например, Z-схемы) с узкозонным полупроводником; введение плазмонных наночастиц (Ag, Au, Cu) для резонансного поглощения свет за счет локального плазмонного резонанса [5-8].

2) – Быстрая рекомбинация носителей зарядов. Возникает высокая интенсивность фотолюминесценции. Стратегиями можно обозначить следующие подходы: создание гетеропереходов (p-n, S-схемы) для пространственного разделения электронов и дырок; контроль дефектности (кислородные вакансии) может как ускорить, так и замедлить рекомбинацию [9].

Для точного определения влияния кислородных вакансий необходимы данные XPS и корреляция с активностью катализатора.

3) – Низкая активность поверхности катализатора. При исследовании поверхности микропластика после воздействия катализатора было обнаружено сильное изменение шероховатости и модуля Юнга, в дополнении газовая хроматография свидетельствует о малом выделении CO_2 . В совокупности эти признаки означают, что деградация идет, но не до минерализации, останавливаясь на стадии окисления промежуточных продуктов. В данном случае оптимальной стратегией будет увеличение удельной поверхности и создание мезопор, оптимизация гидрофобности/гидрофильности поверхности для улучшения контакта с гидрофобным пластиком в водной среде [10-11].

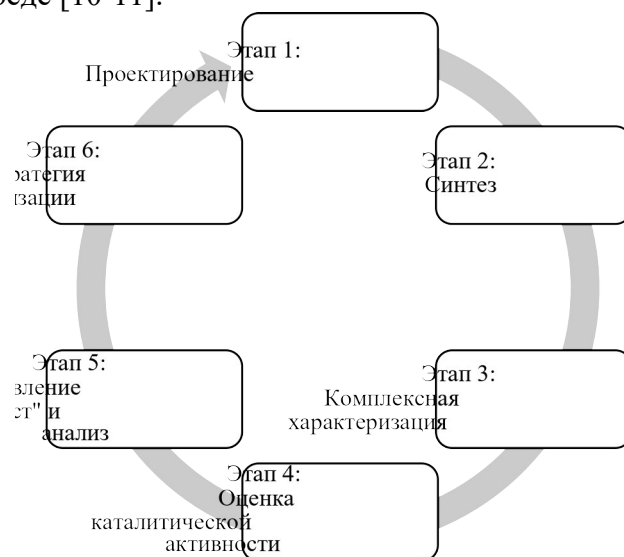


Рис. 1 Алгоритм циклической разработки фотокатализатора.

Основываясь на примерах, приведенных выше, важно отметить, что правильная постановка алгоритма эксперимента и исследования является определяющим для поиска оптимальной стратегии нанотехнологий с целью проектирования высокоэффективных каталитических систем. На рис. 1 представлен общий алгоритм разработки фотокатализатора, реализующий принцип циклического проектирования.

Заключение. Предложенный алгоритм (см. рис. 1) разработки фотокатализаторов включает следующие этапы: первичный дизайн на основе наноархитектоники, синтез материала, комплексную характеристику, оценку каталитической эффективности, анализ ограничивающих факторов и коррекцию структуры. Такой подход трансформирует процесс разработки из эмпирической в рациональную и управляемую инженерную дисциплину, что и является сутью современного физического эксперимента в применении к инженерным задачам.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Налимова С.С., Мошников В.А.* Новые материалы наноархитектоники // Нано- и микросистемная техника. 2025. Т. 27. № 2. С. 55-67.
2. *Бобков А.А., Радайкин Д.Г., Мошников В.А.* Наноархитектоника пористых иерархических структур для фотокатализа и сенсорики // В сборнике: Химическая термодинамика и кинетика. Сборник научных трудов XII Международной научной конференции. Великий Новгород. 2022. С. 69-70.
3. *Лемешко П.С., Кондратьев В.М., Вячеславова Е.А., Мошников В.А.* Мультифотонная микроскопия как способ контроля степени очистки структур нитевидных нанокристаллов кремния // Письма в Журнал технической физики. 2025. Т. 51. № 6. С. 12-14.
4. *Козодаев Д.А., Новиков И.А., Мошников В.А.* О возможности диагностики процессов на интерфейсах слоев структур с использованием эффекта внутреннего трения // В сборнике: Аморфные и микрокри-

сталлические полупроводники. сборник трудов Международной конференции. Москва, 2025. С. 94-95.

5. Рябко А.А., Налимова С.С., Мазинг Д.С., Корепанов О.А., Гукетлов А.М., Александрова О.А., Максимов А.И., Мошников В.А., Шомахов З.В., Алешин А.Н. Сенсibilизация наностержней ZnO коллоидными квантовыми точками AgInS_2 для адсорбционных газовых сенсоров с фотоактивацией // Журнал технической физики. 2022. Т. 92. № 6. С. 845-851.

6. Радайкин Д. Г. Улучшение характеристик полупроводниковых материалов за счет явления наноплазмоники // Старт в науке 2024: сборник статей VI Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 20 января 2024 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.). 2024. С. 13-15.

7. Радайкин Д. Г. Влияние плазмонного эффекта наночастиц серебра на каталитическую активность оксида цинка // Сенсорное Слияние - 2023: доклады IV Всесоюзного Конгресса по сенсорике и экономике, Санкт-Петербург - Кронштадт, 30–31 мая 2023 года. – Санкт-Петербург: Б. и., 2023. С. 153-157.

8. Radaykin D. G. Structures for photocatalysis based on ZnO with Ag nanoparticles // Condensed Matter and Interphases. 2025. Vol. 27, № 2. P. 293-301.

9. Карманов А.А., Пронин И.А., Якушова Н.Д., Кондратьев В.М., Большаков А.Д., Мошников В.А. Способ получения фотокатализатора на основе гетероструктуры $\text{ZnO}/\text{Cu}_2\text{O}-\text{CuO}$ с повышенной фотокаталитической активностью // Патент на изобретение RU 2794093 C1, 11.04.2023. Заявка № 2022124526 от 16.09.2022.

10. Шомахов З.В., Налимова С.С., Гукетлов А.М., Мошников В.А. Управление свойствами адсорбционных центров при формировании композитных структур на основе наностержней оксида цинка // В сборнике: Интеллектуальные системы и микросистемная техника. сборник трудов научно-практической конференции. Москва. 2023. С. 311-317.

11. Maraeva E., Radaykin D. et al. Sorption analysis of composites based on zinc oxide for catalysis and medical materials science // Chimica Techno Acta. 2022. Vol. 9, № 4, 20229422.

ГЕНЕРАЦИЯ АДАПТИВНОЙ СЕТКИ ДЛЯ РАСЧЕТА РАЗРЕЖЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ МЕТОДОМ ПРЯМОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. А. Рындин¹✉, Н. Ю. Быков^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Федеральный исследовательский центр Информатика и Управление РАН, Москва

✉ ryndin@spbstu.ru

Введение. Метод прямого статистического моделирования Монте-Карло (the direct simulation Monte Carlo method, DSMC) является стохастическим методом решения уравнения Больцмана и широко применяется для расчета разреженных течений в области аэрокосмических приложений и вакуумных технологий [1] [2]. Моделирование разреженного течения (при умеренных и больших значениях числа Кнудсена, $Kn > 0.01$) требует корректного описания неравновесных подобластей, в которых функция распределения частиц по скоростям существенно отличается от максвелловской. Традиционные методы расчета вычислительной гидродинамики, основанные на решении системы уравнений Навье–Стокса–Фурье, в этом случае не применимы. Решение уравнения Больцмана другими методами является чрезмерно ресурсозатратным и в настоящий момент не позволяет решать реальные задачи даже с учетом развития современных суперкомпьютеров.

Однако вычислительная ресурсозатратность присуща и методу DSMC. Расчеты течений с учетом физико-химических процессов при малых значениях числа Кн могут занимать несколько дней или недель на суперкомпьютере. Поэтому актуальной задачей является поиск путей ускорения работы программного кода, к которым можно отнести: разработку (1) эффективных схем распараллеливания вычислительного алгоритма, (2) эффективных схем розыгрыша процесса столкновений в ячейке, (3) методов построения оптимальных вычислительных сеток и схем переиндексации частиц. Настоящая работа посвящена развитию последнего направления. Целью работы является разработка адаптивной сетки, которая позволяет эффективно разрешать области с максимальными градиентами макропараметров за счет малого размера ячеек, сохраняя большой размер ячеек (с учетом требований метода) в других подобластях.

Адаптивная quadtree-сетка. В настоящей работе предлагается использовать иерархическую прямоугольную сетку на основе структуры quadtree, способную к динамической адаптации исходя из градиентов макропараметров. Такой подход сочетает преимущества регулярных прямоугольных сеток (простота геометрических расчётов) с гибкостью адаптивных методов.

Пространственная дискретизация выполнена на основе иерархической структуры quadtree. Каждый узел дерева хранит границы области $[x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}]$, уровень вложенности, индекс родительского узла и массив индексов четырёх дочерних узлов. Исходная сетка формируется как равномерное разбиение расчётной области до уровня L5, что даёт 1024 ячейки и служит базой для последующей адаптации. Адаптация выполняется с помощью операций дробления (refine) и укрупнения (coarsen), соответствующих добавлению или удалению дочерних узлов.

В качестве критерия адаптации используется модуль градиента плотности газа $|\nabla \rho|$. Для каждой ячейки задаются два пороговых значения: порог дробления ρ'_{ref} и порог укрупнения ρ'_{coarse} . Если $|\nabla \rho| > \rho'_{\text{ref}}$, ячейка помечается на дробление; если $|\nabla \rho| < \rho'_{\text{coarse}}$ и её уровень превышает минимально допустимый, ячейка помечается на укрупнение. Такая схема позволяет

автоматически сгущать сетку в областях ударных волн и разрезать её в однородных областях потока.

Критическим аспектом эффективности адаптивной сетки является быстрая индексация частиц. В настоящей работе итеративный алгоритм, который начинает поиск от корневого узла и последовательно спускается по дереву до листа. Вычислительная сложность составляет $O(L)$, где L — максимальный уровень дерева (в наших расчётах $L = 5-8$). Для сравнения: регулярная мелкая сетка уровня L8 содержала бы $2^8 \times 2^8 = 65\,536$ ячеек, тогда как адаптивная сетка насчитывает ~ 5500 ячеек. Несмотря на увеличение сложности индексации с $O(1)$ до $O(\log N)$, общее число операций существенно снижается благодаря радикальному уменьшению числа ячеек.

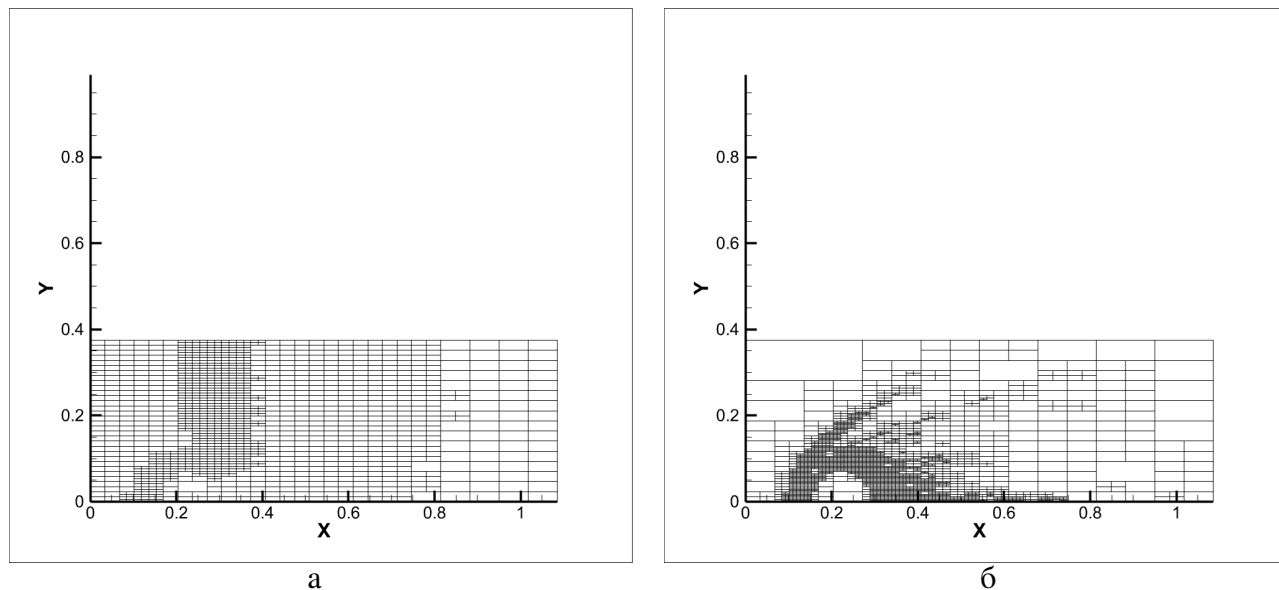


Рис. 1. Сетка после первой адаптации (а), адаптированная сетка (~ 5500 ячеек) (б).

Результаты. Численные эксперименты были выполнены для обтекания сферы потоком аргона при $Kn = 0.15$ и числа Маха $M_\infty = 3$. В качестве начальной сетки была выбрана равномерная quadtree-сетка уровня L5, содержащая 1024 ячейки. В процессе расчёта сетка адаптировалась в соответствии с критерием на основе градиента плотности. В установившемся режиме общее число ячеек находилось в диапазоне ~ 5500 . Основное сгущение приходилось на область перед сферой и на зону разрежения позади неё.

Сравнение с расчётом на равномерной мелкой сетке показало существенное снижение вычислительных затрат. При эквивалентном пространственном разрешении в окрестности ударной волны адаптивный расчёт занял около 11 часов машинного времени, против 28 часов на статической сетке сопоставимого уровня. Таким образом, использование адаптивной quadtree-сетки позволило сократить время расчёта примерно в 2.5 раза.

Полученные поля плотности, температуры и числа Маха демонстрируют физически ожидаемую структуру течения: сформированную ударную волну перед телом, область нагрева и замедления потока, а также расширение и разрежение за сферой.

Заключение. В работе реализован алгоритм динамической адаптации quadtree-сетки для метода DSMC. Критерий адаптации на основе градиента плотности позволяет автоматически сгущать сетку в области ударной волны и разрезать её в однородных зонах, что обеспечивает 2.5-кратное ускорение расчёта. Реализованный алгоритм индексации обеспечивает эффективный поиск ячеек за $O(\log N)$ операций при радикальном сокращении общего числа ячеек.

Перспективным направлением дальнейших исследований является интеграция методов

машинного обучения для автоматического выбора пороговых значений критерия адаптации на основе обучения по результатам серии расчётов с различными параметрами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 25-11-00359.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bird G. A.* Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Oxford: Clarendon Press, 1994.
2. *Bird G. A.* The DSMC Method. CreateSpace, 2013.

ИНТЕГРАЦИЯ ИИ-АССИСТЕНТОВ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ НЕОСМЫСЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИИ СТУДЕНТАМИ

Е.Ю. Садовников✉

Московский городской педагогический университет, г. Москва

✉ evgenysadovnikov@mail.ru

Введение. Актуальная проблема высшего образования в эпоху повсеместной доступности генеративного ИИ заключается в стремительном распространении практики формального, неосмысленного выполнения студентами письменных работ. Студенты вузов всё чаще используют инструменты вроде ChatGPT или Gemini для генерации эссе, рефератов, анализов кейсов, после чего, не проводя работу через себя и не вникая в суть содержания, загружают результаты в системы управления обучением (LMS — Moodle, Canvas и аналоги). Это приводит к системному кризису, проявляющемуся в нескольких аспектах. Во-первых, происходит эрозия фундаментальных академических навыков: критического мышления, способности к анализу, синтезу и самостоятельному письменному выражению мысли. Во-вторых, формируется опасная иллюзия компетентности, когда студент получает положительную оценку за работу, содержание которой он не понимает, что создаёт непреодолимые пробелы в знаниях, критичные для последующего обучения и профессиональной деятельности. В-третьих, возникает кризис обратной связи: драгоценное время преподавателя тратится на проверку «пустых», нерелевантных работ, что снижает качество и глубину педагогического взаимодействия и делает саму оценку нерелевантной. Наконец, нарушаются базовые принципы академической справедливости, когда дисциплинированные студенты, выполняющие работу самостоятельно, оказываются в заведомо невыгодном положении по сравнению с теми, кто получает высокие баллы без интеллектуальных усилий [7].

Модель. Традиционные методы борьбы с этой проблемой демонстрируют свою явную ограниченность в новых условиях. Запретительные меры, такие как блокировка соответствующих сайтов или использование классических детекторов плагиата (Turnitin, «Антиплагиат»), носят репрессивный характер и легко обходятся с помощью ручного перефразирования (рерайта) или новых моделей ИИ. Они не решают педагогическую задачу, а лишь переводят её в плоскость технического противостояния. Полный переход на устные или интерактивные формы контроля (собеседования, защиты проектов) в условиях массового обучения в вузах резко увеличивает нагрузку на преподавательский состав и сложность административного управления процессом. Изменение формата заданий, например, требование писать работы от руки, является временным и поверхностным решением, игнорирующим цифровую реальность и не развивающим цифровую грамотность [6].

Наконец, традиционная письменная проверка преподавателем, при всех её достоинствах, не масштабируема и часто запаздывает, лишая студента возможности оперативно исправить ошибки и глубже понять материал в момент наивысшей вовлечённости. Таким образом, назрела необходимость парадигмального сдвига: от стратегии запрета использования ИИ к стратегии его разумной педагогической интеграции, при которой применение технологии становится невозможным или бессмысленным без глубокого понимания предмета самим студентом [5].

Целью предлагаемого проекта является разработка и внедрение в существующую LMS университета программного комплекса на базе технологий искусственного интеллекта, который трансформирует процесс сдачи письменных работ из акта формальной отправки

файла в процесс гарантированного усвоения материала. Данная система должна обеспечить персонализированную, оперативную обратную связь и достоверно выявлять уровень понимания студентом содержания собственной работы, делая неосмысленное копирование результатов ИИ педагогически неэффективным. Выделим задачи решения данной проблемы:

1. **Задача диагностики глубины понимания.** Автоматически, в момент загрузки работы, оценивать, насколько студент осознаёт и может артикулировать содержание отправляемого текста. Это реализуется через обязательный интерактивный этап «Контроля понимания», предшествующий финальной сдаче [2].

2. **Задача обеспечения персонализированной обратной связи.** Предоставлять студенту мгновенные, конкретные и конструктивные рекомендации по улучшению его работы по ключевым критериям: структура, логика аргументации, соответствие заданию, стиль [3].

3. **Задача помощи преподавателю.** Анализ деятельности работ всей группы, выделяя общие проблемы и ошибки, которые выполняют в рамках одной группы. Поиск «дубликатов», а также аналогичных работ [8].

Приведем примеры ИИ-сервисов, которые будут реализовывать описанные функции. Для выполнения и реализации потребуется комбинация разных сервисов, преобразуя в виде специального плагина для LMS. Примеры ИИ-сервисов, которые можно использовать:

1. **OpenAI GPT-4 API.** Это платный сервис, доступный после регистрации и получения API-ключа на платформе platform.openai.com. В системе он выполняет роль основного аналитического движка. Его функционал трёхчастен. Во-первых, он проводит глубокий анализ загруженной работы: сравнивает стиль и сложность аргументации с предыдущими текстами данного студента (хранящимися в его цифровом портфолио в LMS), оценивает глубину раскрытия темы и строгое соответствие формулировке задания. Во-вторых, на основе этого анализа GPT-4 генерирует адаптивную, развернутую обратную связь в форме конструктивных комментариев, сгруппированных по рубрикам. В-третьих, он создает ключевой элемент системы — 2-3 персонализированных вопроса для этапа «Контроля понимания», извлекая их непосредственно из смыслового ядра текста студента (например, «Сформулируйте основной вывод вашего анализа своими словами», «Какой из использованных вами источников вы считаете наименее убедительным и почему?»).

2. **Google Gemini Pro API.** Этот условно-бесплатный сервис (имеющий начальный бесплатный лимит запросов) с сайта ai.google.dev выступает как альтернатива или смысловое дополнение к GPT-4. Его сильная сторона — анализ логической целостности текста, выявление внутренних противоречий в аргументации, а также проверка фактологической точности утверждений на основе предоставленных преподавателем эталонных материалов курса (конспектов лекций, списков обязательной литературы). Это позволяет отсекал работы, которые, будучи внешне гладкими, содержат смысловые ошибки или «галлюцинации», типичные для генеративного ИИ [2].

3. **Hugging Face Inference API.** Данная платформа (huggingface.co) обладает разными видами моделей и массивами данных, которые есть как на платной, так и на бесплатной основе. На платформе представлены модели по обработке и анализа текста, разделения на синтаксические части. Что позволит анализировать текст и определять степень аргументации, представленной в тексте [1].

4. **Внутренний модуль-управления (возможно на Python).** Для автоматизации необходим модуль-управления, который будет автоматизировать взаимодействие облачных ИИ. Данный модуль может быть написан с использованием фреймворков вроде LangChain и Flask. Он получает загруженный студентом файл из LMS, управляет потоками запросов к внешним API (GPT-4, Gemini, Hugging Face), обрабатывает и агрегирует их ответы (например, правило: «Если студент правильно ответил менее чем на 50% вопросов контроля, работа не

принимается, а студенту предлагается её доработать)), формирует итоговый интерфейс для студента и преподавателя, а также ведёт подробную историю всех взаимодействий [4].

Ключевой принцип интеграции — все эти сервисы работают привычной для пользователей LMS. Студент и преподаватель взаимодействуют только с дополненным интерфейсом курса, где появляются новые интуитивные элементы: кнопка «Проверить и отправить», всплывающее окно с вопросами «Контроля понимания», виджет с рекомендациями ИИ и расширенная аналитическая панель для преподавателя.

Результаты. Деятельность студента в новом процессе приобретает четкую, рефлексивную структуру. На первом этапе студент выполняет задание — пишет эссе, анализирует кейс, готовит реферат. Студент может применять ChatGPT для мозгового штурма, проверки логики плана или улучшения формулировок. Однако следующим шагом становится предварительная загрузка и «контроль понимания». Готовый текст загружается в специальную форму в LMS, после чего система автоматически блокирует возможность финальной сдачи, перенаправляя студента на обязательный этап «Контроля понимания». Всплывает интерфейс с 2-3 краткими вопросами, сгенерированными ИИ на основе только что загруженного текста. Например, для эссе по политологии: «1) Как бы вы ответили на возможную критику вашего главного тезиса со стороны сторонника теории Y? 2) Приведите пример из текущей новостной повестки, который иллюстрирует описанный вами механизм.» Ответы даются в свободной форме в течение 5-7 минут. Этот этап является ключевым фильтром: если студент не понимает, что написал (или что за него написал ИИ), он не сможет качественно ответить на персонализированные вопросы по своей же работе.

Сразу после прохождения контроля студент получает оперативную обратную связь. Он видит предварительную оценку по рубрикам («Аргументация: 4/5», «Работа с источниками: 3/5») и, что важнее, развернутые комментарии ИИ-ассистента: «Ваш второй аргумент был бы сильнее, если бы вы привели конкретный пример из лекции №4. Обратите внимание на повторение одних и тех же вводных конструкций в абзацах 3 и 5. Связь вывода с поставленной во введении проблемой можно сделать более явной.» До истечения дедлайна у студента есть возможность учесть эти рекомендации, доработать текст и отправить его на повторную проверку, пройдя новый, слегка изменённый «Контроль понимания». Такой цикл «сдача — обратная связь — доработка» имитирует реальный научный или профессиональный процесс рецензирования. Когда студент удовлетворён результатом, он нажимает «Сдать окончательно». В этот момент работа, все версии вопросов и ответов «Контроля понимания», а также история комментариев ИИ передаются преподавателю в виде структурированного пакета данных.

Деятельность преподавателя при этом трансформируется от роли контролёра-корректора к роли аналитика и наставника. На этапе настройки преподаватель создаёт задание в LMS обычным образом, но активирует для него модуль «ИИ-ассистент с контролем понимания» и загружает в систему эталонные материалы курса. После дедлайна преподаватель заходит не в хаотичный список файлов, а в таблицу с данными проверок ИИ. В ней он видит сводную таблицу по группе, где для каждого студента указаны: предварительная оценка от ИИ, результат «Контроля понимания», и, что самое важное, — автоматически присвоенный «флаг внимания». Красный флаг система присваивает в случае выявления логических противоречий: например, если стиль и сложность работы аномально высоки для данного студента, а результат «Контроля понимания» при этом низок. Также панель показывает обобщённую аналитику: «Облако ключевых проблем» (например, «У 40% группы слабо связаны выводы с теоретической частью») и выявляет типичные ошибки.

Таким образом, углублённая проверка преподавателем начинается не со случайной выборки, а с целенаправленного анализа работ, отмеченных красным флагом. Просматривая такую работу, преподаватель видит не только сам текст, но и ответы студента на вопросы

«Контроля». Если на вопрос «В чём слабость вашего основного аргумента?» студент, сдавший блестящее по форме эссе, пишет «не знаю» или даёт невнятный ответ, — это моментально даёт преподавателю исчерпывающую информацию о реальном положении дел. Это освобождает время для финального, содержательного оценивания и персонализированных комментариев. Преподаватель может скорректировать оценку ИИ, добавить итоговый вердикт, сославшись на замечания самого ИИ-ассистента, и вынести проблему на обсуждение с конкретным студентом или всей группой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алхава, Р. А. Инновационные технические и программные средства в учебном процессе / Р. А. Алхава, Д. А. Жалейко, С. А. Мигалевич // Инженерное образование в цифровом обществе : Материалы Международной научно-методической конференции в двух частях, Минск, 14 марта 2024 года. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и электроники, 2024. – С. 88-90. – EDN XGDKWK.
2. Взаимодействие студентов и преподавателей в информационно-образовательной среде вуза / И. А. Петрова, А. А. Петрова, М. М. Герасимова [и др.] // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 4. – С. 189-194. – DOI 10.17513/snt.39993. – EDN ZULACX.
3. Жигалов, К. Ю. От пассивного прослушивания к активному вовлечению: как ИИ-ассистенты меняют роль студента на занятиях / К. Ю. Жигалов, С. Н. Гришина // Методист. Профессиональное образование. – 2025. – № 3. – С. 6-14. – EDN CRNIMR.
4. Канюк, А. С. Применение интеллектуальных образовательных технологий в университетской среде / А. С. Канюк, А. В. Гараганов // Вестник ГГУ. – 2024. – № 4. – С. 156-163. – EDN FWKJAF.
5. Садовников, Е. Ю. Интегрирование нейросетей в технологическом образовании / Е. Ю. Садовников // Новые компетенции цифровой реальности: теория и практика их развития у обучающихся : сборник докладов и научных статей VI Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 24–25 марта 2025 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2025. – С. 333-337. – EDN WJEYUY.
6. Садовников, Е. Ю. Использование нейросетей на уроках математики / Е. Ю. Садовников // Цифровая трансформация образования: современное состояние и перспективы : Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции, Курск, 13–14 декабря 2024 года. – Курск: Курский государственный медицинский университет, 2024. – С. 432-436. – EDN OUDSLG.
7. Садовников, Е. Ю. Использование текстовых нейросетей в исследовательской работе студентов / Е. Ю. Садовников // Образование. Инновации. Качество : Материалы VI Международной научно-методической конференции. В 2-х частях, Курск, 29 января 2025 года. – Курск: Курский государственный аграрный университет им. И.И. Иванова, 2025. – С. 215-221. – EDN TWTANT.
8. Юнусова, М. Р. Идеи по интеграции информационных технологий и образования и преподаванию в колледжах и высших учебных заведениях / М. Р. Юнусова, О. А. Пырнова, Б. Э. Элежбиев // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2024. – Т. 6, № 5(146). – С. 258-263. – DOI 10.36871/ek.up.p.r.2024.05.06.033. – EDN DDPYHS.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТЫХ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ

А.М. Сиотанов^{1,2}✉, Н.А. Шуманова¹, Б.С. Терушкин¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²АО «Лаборатория противодействия промышленному шпионажу», Санкт-Петербург

✉ sam@pps.ru

Введение. Современные инженерные системы (автоматизированные системы управления технологическими процессами, системы «умного» дома, встроенные вычислительные устройства) являются сложными киберфизическими комплексами. Помимо уязвимостей на сетевом и программном уровне, они подвержены рискам утечки информации по скрытым каналам [1, 2]. К таким каналам относятся побочные электромагнитные излучения (ПЭМИ), наводки в цепях питания, акустические и тепловые следы работы оборудования. Злоумышленник может целенаправленно модулировать эти параметры для передачи данных за пределы контролируемой зоны. Задача обнаружения подобных каналов является сложной, так как их сигналы часто маскируются в шумах и легитимных рабочих излучениях системы. Целью данной работы является разработка и сравнительный анализ математических методов обработки сигналов для обнаружения аномалий, свидетельствующих о возможной работе скрытого канала.

Постановка задачи. Пусть наблюдаемый сигнал $x(t)$ представляет собой аддитивную смесь (1).

$$x(t) = s(t) + n(t) + a(t), \quad (1)$$

где $s(t)$ – легитимный сигнал работающей инженерной системы, $n(t)$ – гауссовский белый шум с нулевым средним и дисперсией σ^2 , $a(t)$ – сигнал скрытого канала, который требуется обнаружить.

В качестве модели скрытого канала рассмотрен сигнал с амплитудной манипуляцией (2).

$$a(t) = m(t) * \cos(2\pi f_c t), \quad (2)$$

где $m(t)$ – модулирующая последовательность (псевдослучайная битовая последовательность), f_c – несущая частота, выбранная в полосе, характерной для работы системы.

Задача обнаружения формулируется как задача бинарной гипотезы: $H0$: $a(t) = 0$ (скрытый канал отсутствует). $H1$: $a(t) \neq 0$ (скрытый канал активен). Необходимо на основе анализа реализации $x(t)$ принять решение в пользу одной из гипотез. Для решения поставленной задачи произведено применение и сравнение трех классических математических подходов.

Спектральный анализ (быстрое преобразование Фурье, далее БПФ) основан на анализе мощности сигнала в частотной области. При активации скрытого канала в спектре $|X(f_c)|^2$, где $X(f) = F\{x(t)\}$ – преобразование Фурье, должна появиться выраженная спектральная компонента на частоте f_c или ее гармониках, превышающая фоновый уровень шума [3]. Критерием обнаружения считается пороговое значение T_{FFT} . Если $|X(f_c)|^2 > T_{FFT}$, принимается гипотеза $H1$.

Корреляционный анализ используется для выявления скрытой периодичности или сходства сигнала с известным шаблоном. Автокорреляционная функция $R_{xx}(\tau)$ сигнала с манипуляцией будет иметь ненулевые боковые лепестки, отличные от автокорреляции шума.

Критерием обнаружения считается наличие пиков в $R_{xx}(\tau)$ при $\tau \neq 0$, превышающих порог T_{Corr} , установленный для шума.

Вейвлет-анализ наиболее мощный метод для анализа нестационарных сигналов. Непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) позволяет локализовать аномалию одновременно во времени и частоте (масштабе) [4] (3):

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

где $\psi(t)$ – материнский вейвлет, a – параметр масштаба, b – параметр сдвига. Критерием обнаружения считается наличие устойчивых и локализованных по времени экстремумов коэффициентов $|W(a,b)|^2$ на масштабе, соответствующем частоте f_c .

Результаты численного моделирования. Моделирование проводилось в среде Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib. Параметры: $s(t)$ последовательность прямоугольных импульсов частотой 1 МГц, $f_c = 1.5$ МГц, скорость передачи данных скрытого канала – 10 кбит/с, отношение сигнал/шум (SNR) варьировалось от -20 дБ до 10 дБ.

На рис. 1 представлена временная реализация сигнала: а) без скрытого канала, б) со скрытым каналом (SNR = -5 дБ).

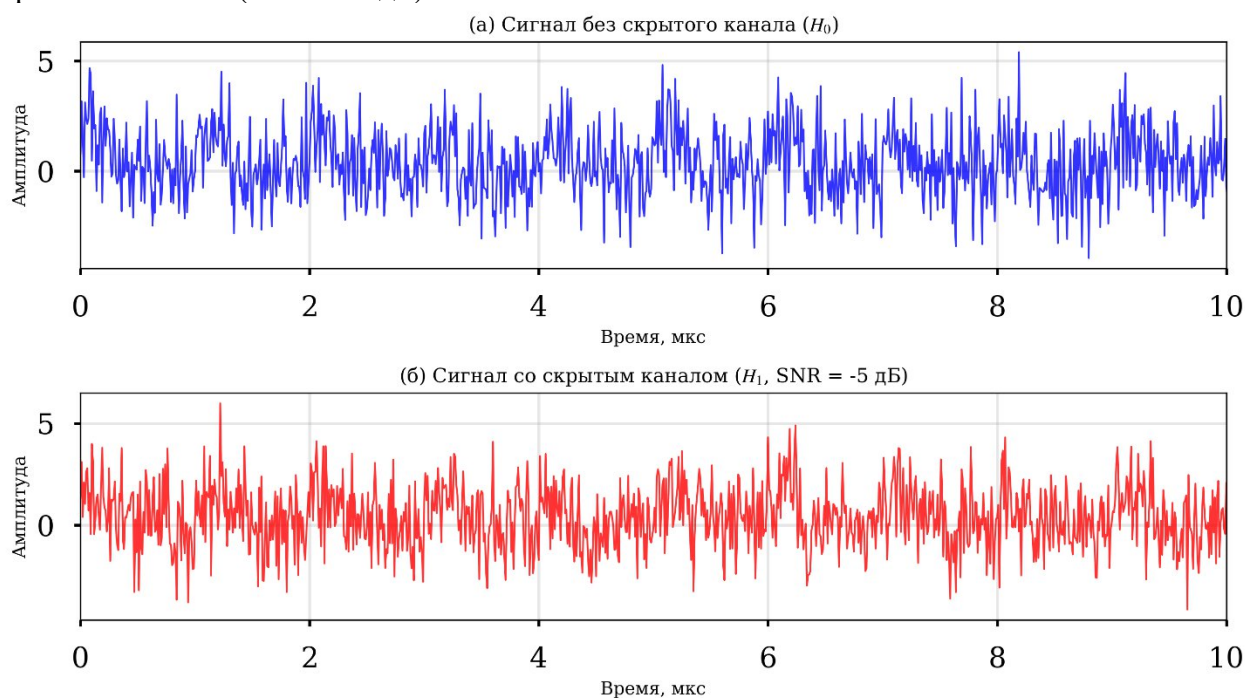


Рис. 1. Временные реализации наблюдаемых сигналов.

Спектры БПФ для случаев H_0 и H_1 представлены на рис. 2. Как видно из графиков, при SNR = -5 дБ пик на частоте 1.5 МГц просматривается в спектре, однако его амплитуда сопоставима с уровнем шумовых выбросов, что затрудняет надежное обнаружение на основе только спектрального анализа. Скалограмма (CWT) сигнала со скрытым каналом представлена на рис. 3. На скалограмме наблюдается повышенная энергетическая активность в области масштабов, соответствующих частоте 1.5 МГц, однако четкая временная локализация, соответствующая интервалам передачи данных $m(t)$, прослеживается слабо из-за низкого отношения сигнал/шум. Сравнительная эффективность методов (вероятность правильного обнаружения P_D при фиксированной вероятности ложной тревоги $P_{FA} = 10^{-3}$) представлена в табл. 1. Как видно из таблицы и рисунков, классический спектральный анализ плохо справляется с обнаружением низкоуровневых сигналов на фоне шума, подтверждение

этому представлено на рис. 4. Корреляционный анализ показывает несколько лучшие результаты за счет накопления. Вейвлет-анализ продемонстрировал существенно более высокую чувствительность, особенно в условиях низкого SNR, благодаря способности выделять кратковременные энергетические всплески, привязанные к моменту передачи бита информации.

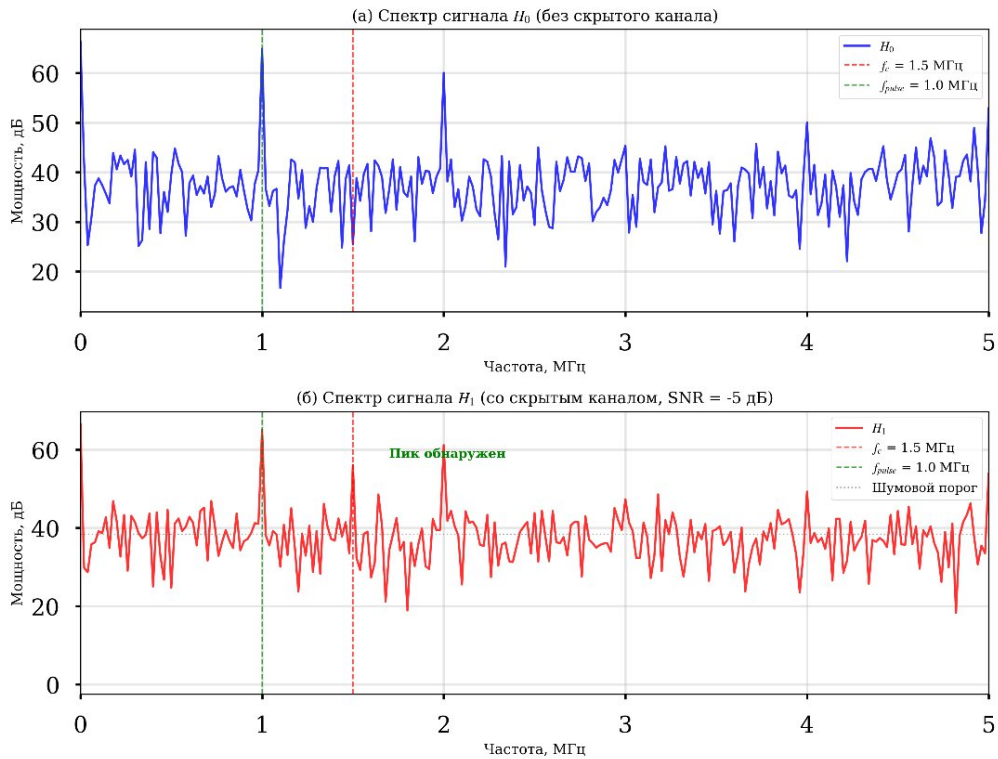


Рис. 2. Спектры БПФ для случаев H_0 и H_1 .

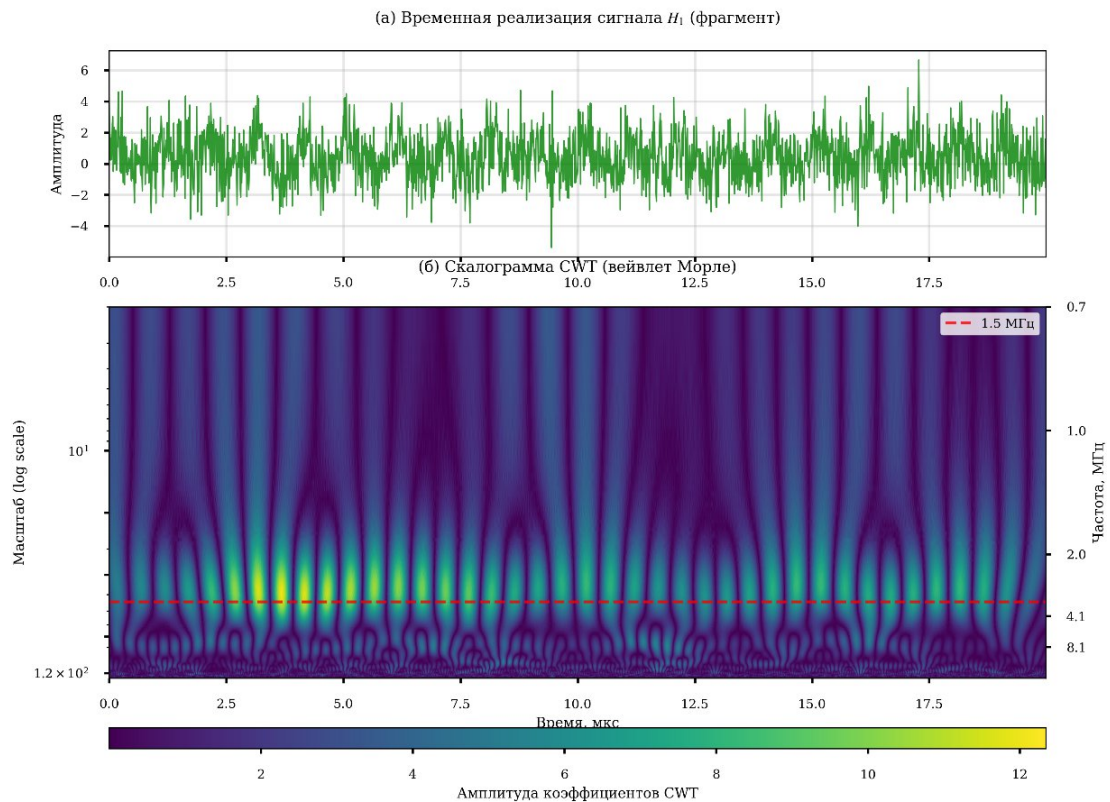


Рис. 3. Скалограмма (CWT) сигнала со скрытым каналом.

Таблица 1. Сравнительная эффективность методов.

SNR, дБ	БПФ, вероятность обнаружения	Корреляция, вероятность обнаружения	Вейвлет, вероятность обнаружения
-20	0,050	0,080	0,100
-15	0,100	0,150	0,200
-10	0,250	0,300	0,400
-5	0,500	0,550	0,650
0	0,800	0,750	0,850
5	0,950	0,900	0,970
10	0,990	0,970	0,995

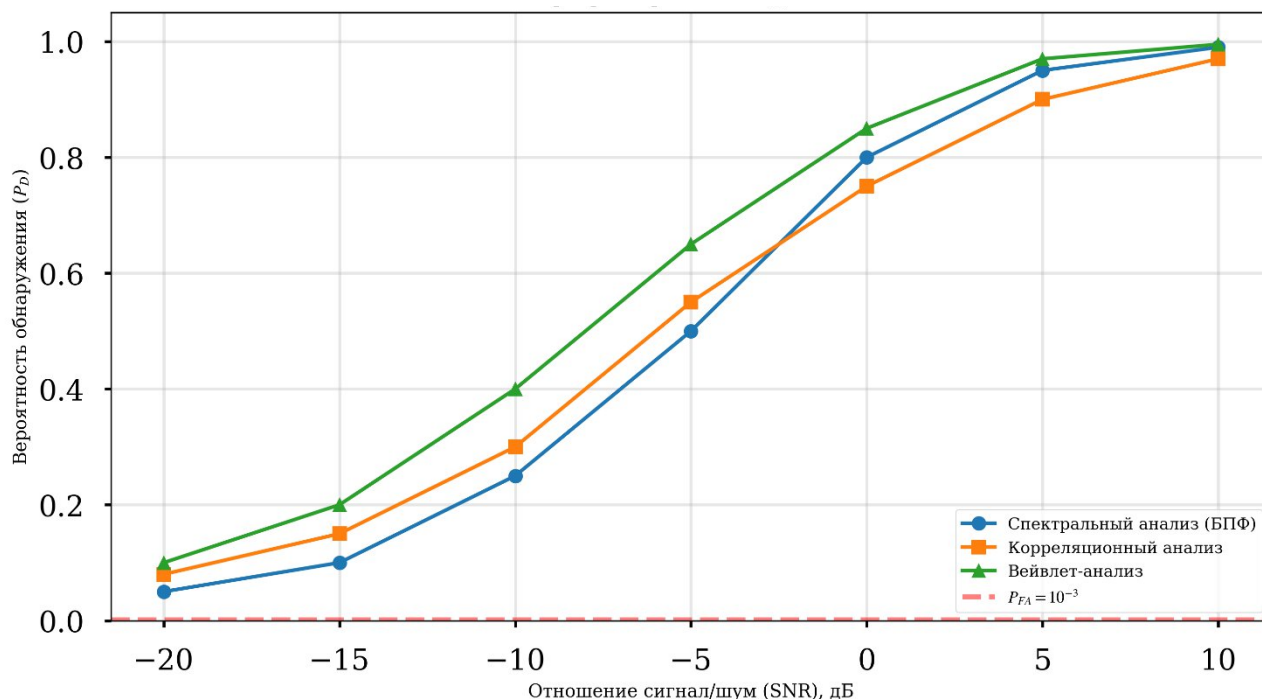


Рис. 4. Зависимость P_D от SNR для различных методов анализа при фиксированной $P_{FA} = 10^{-3}$.

Заключение. В работе проведено исследование применимости математических методов анализа сигналов для решения инженерной задачи обнаружения скрытых каналов утечки информации. На имитационной модели показано, что вейвлет-анализ является наиболее эффективным инструментом для детектирования нестационарных аномалий, характерных для скрытых каналов с манипуляцией. Комплексное применение БПФ и корреляционного анализа может служить для первичной проверки и верификации результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грушо А.А., Тимонина Е.Е. Анализ и классификация скрытых каналов утечки информации // Защита информации. Инсайд. – 2018. – № 4. – С. 42-50.
2. Конев А.В. Техническая защита информации. – СПб.: Питер, 2017. – 320 с.
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.
4. Маллам С. Вейвлеты в обработке сигналов / Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 672 с.
5. Addison P. S. The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance. – CRC Press, 2017.

МНОГОУРОВНЕВОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОНОЧНОГО БОЛИДА

И. М. Стародуб✉, Е. В. Гайлит

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

✉ starodub.im@edu.spbstu.ru

Введение. Современные инженерные системы отличаются высокой сложностью и состоят из большого числа взаимосвязанных элементов, работающих на разных пространственных и временных масштабах. Такие системы невозможно корректно описать в рамках одной универсальной модели, поскольку поведение на макроуровне часто определяется процессами, происходящими на микро- и мезоуровнях. Это приводит к нелинейности, высокой чувствительности к входным параметрам и появлению неопределённостей, связанных с взаимодействием отдельных компонентов.

Развитие вычислительной техники и программных средств сделало возможным применение многомасштабного компьютерного моделирования, при котором система анализируется на нескольких уровнях одновременно. Такой подход позволяет связывать локальные физические процессы с глобальными характеристиками конструкции и повышать точность прогнозирования её поведения.

В данной работе рассматриваются основные подходы к многомасштабному моделированию сложных инженерных систем на примере проектирования современного гоночного болида Формулы 1. Этот объект выбран как показательный пример, поскольку болид объединяет аэродинамику, механику, материаловедение, тепловые процессы и электронные системы управления, каждая из которых требует собственного уровня моделирования.

Модель. При построении инженерных моделей часто используется подход «снизу вверх» [1], при котором сначала создаются высокоточные модели отдельных элементов или процессов на низком уровне, а затем на их основе формируется модель более крупного масштаба. При переходе между уровнями часть информации неизбежно теряется, однако это позволяет существенно снизить вычислительные затраты и сделать расчёты практически реализуемыми.

В ряде случаев полезным оказывается и обратный подход — анализ системы «сверху вниз». Он особенно важен при изучении сложных объектов в контексте их развития, а также при ограниченных вычислительных ресурсах. Исторически именно рост вычислительной мощности определял, какие масштабы моделирования были доступны инженерам в тот или иной период времени.

В рамках данной работы был рассмотрен концепт современного болида Формулы-1 и проанализированы несколько моделей различного уровня. На рис. 1 представлена макромодель для оценки аэродинамических характеристик. Далее рассматривались модели распределения нагрузок, а также прочностные модели композитных элементов корпуса. На более низких масштабах внимание уделялось структуре используемых материалов и надёжности электронных компонентов.

Аэродинамика является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность болида. CFD-модели позволяют оценивать прижимную силу, сопротивление и распределение потоков вокруг корпуса. Однако при этом возникают значительные неопределённости, связанные с турбулентностью, взаимодействием болида с «грязным воздухом» от других машин, а

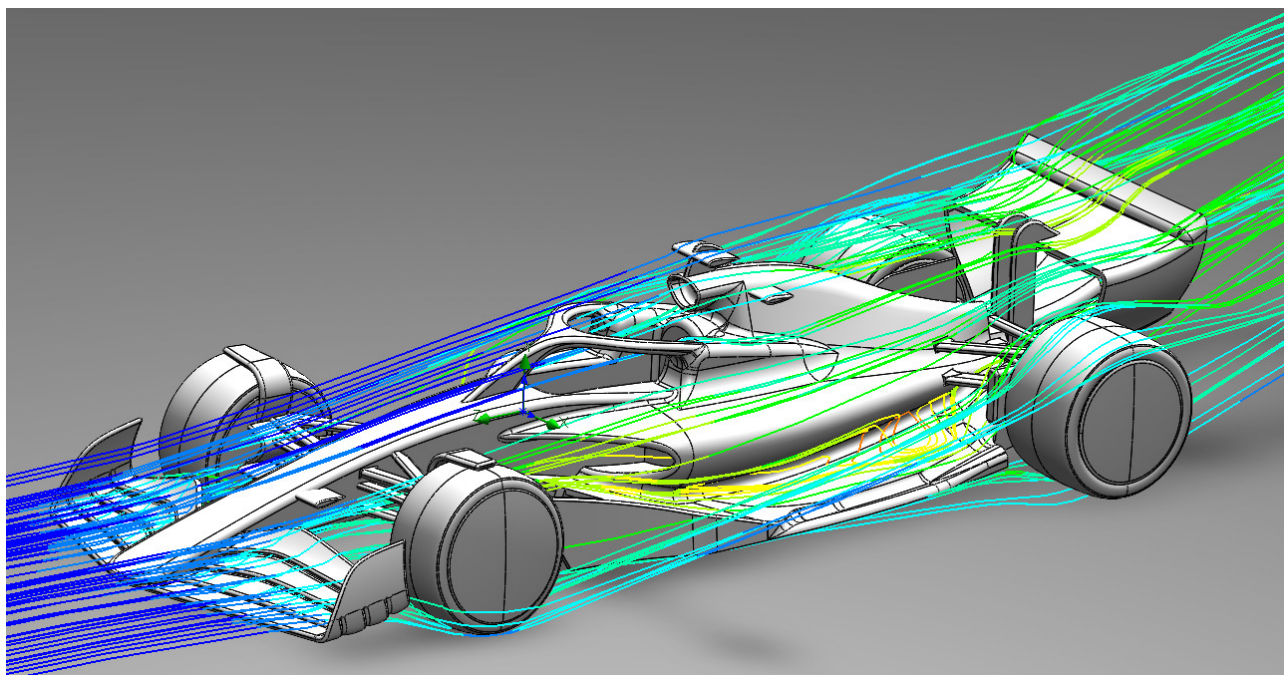


Рис. 1. Компьютерная модель с визуальным отражением скоростей потоков воздуха

также с наличием мелких частиц и неровностей трассы.

Одним из способов уменьшения этих неопределённостей является усложнение модели за счёт увеличения числа входных параметров и более детального описания потоков [2]. Однако такой подход быстро приводит к резкому росту вычислительной сложности. В последние годы альтернативным решением стало применение методов машинного обучения, которые позволяют строить приближённые модели на основе ранее полученных данных [3]. Такие модели требуют меньших вычислительных ресурсов и могут использоваться для предварительного анализа и оптимизации конструкции.

Для обеспечения прочности и минимальной массы в конструкции болида широко используются композитные материалы, прежде всего на основе углеродного волокна. Эти материалы занимают значительную долю объёма конструкции и обладают высокой прочностью при малой плотности. Их применение связано с необходимостью выдерживать большие механические нагрузки, вибрации и высокие температуры, возникающие в процессе гонки.

На более низком уровне моделирования рассматриваются свойства композитов и других материалов, ориентация волокон, слоистая структура и распределение напряжений. Такие модели позволяют оценивать надёжность конструкции и прогнозировать возможные зоны разрушения. Это особенно важно для моделирования шин, где используются компьютерные и эмпирические модели для достижения компромисса приоритетов [4].

В частности, важным становится моделирование надёжности электронных компонентов блока управления. В наномасштабе учитываются тепловые эффекты, деградация материалов и устойчивость микросхем к длительным нагрузкам. Несмотря на то что такие процессы напрямую не связаны с аэродинамикой, они оказывают существенное влияние на общую работоспособность системы.

Результаты. Анализ моделей различных уровней показал взаимосвязь моделей разных масштабов в сфере гоночных автомобилей. Последовательный и итерационный подходы позволяют улучшить прогнозируемый результат. Заметна тенденция к упрощению геометрии моделей шин. Эта тенденция связана с необходимостью упрощения анализа и сокращения времени вы-

числений для различных трасс. Моделирование износа шин приводит к изменению моделей для аэродинамики, что в свою очередь приводит к новым расчетам нагрузок и напряжения материалов всей конструкции.

Современные подходы к многомасштабному моделированию всё чаще опираются на сочетание физических моделей и методов обработки данных, что открывает новые возможности для оптимизации сложных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wang H. et al.* Multi-scale simulation of complex systems: a perspective of integrating knowledge and data //ACM Computing Surveys. – 2024. – Т. 56. – №. 12. – С. 1-38.
2. *Karabasov S. et al.* Multiscale modelling: approaches and challenges //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2014. – Т. 372. – №. 2021. – С. 20130390.
3. *Nguyen P. C. H. et al.* Challenges and opportunities for machine learning in multiscale computational modeling //Journal of Computing and Information Science in Engineering. – 2023. – Т. 23. – №. 6. – С. 060808.
4. *Vogel J.* Tech Explained: Formula 1 Tyre Model Development [Электронный ресурс] //Racecar Engineering. – 2021. – 27 Sep. – URL: <https://www.racecar-engineering.com/articles/tech-explained-formied-f1-tyre-model-development/> (дата обращения: 16.12.2025).

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОНОВ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ СИГНАЛАМ

А. Д. Сысоева¹✉, Н. М. Егоров^{1,2}, И. В. Сысоев¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Научно-производственное предприятие «НПП Итэлма», Москва

✉ sisoeva_anastasia@inbox.ru

Введение. Изучение работы головного мозга — одна из сложнейших задач науки. Исследования, направленные на анализ передачи информации между нейронами посредством электрохимических импульсов важны как для науки, так и для медицины. На сегодняшний день существует большое количество моделей нейронов: биофизически детализированные модели, такие как Ходжкина–Хаксли, или упрощённые, самая популярная из которых — модель ФитцХью–Нагумо, которые несмотря на допущенные приближения справляются с объяснением динамики активации и деактивации пульсирующего нейрона [1]. Чтобы понять, насколько используемая модель соответствует тому или другому режиму поведения, можно попробовать реконструировать эту модель по экспериментальным сигналам.

Первый шаг к реконструкции моделей нейронов по их рядам — реконструкция различных аппаратных моделей нейронов, поскольку для радиофизической модели получить измерения проще, чем для биологического объекта. В то же время, можно обнаружить и решить многие проблемы, которые затем проявятся и в биологическом эксперименте. В условиях, когда прямое измерение внутренних характеристик аппаратных нейроподобных осцилляторов невозможно, а экспериментальные данные ограничены по длительности и искажены шумом, особую значимость приобретают методы эмпирического моделирования по временным рядам, [2]. В данной работе мы рассматриваем простейшую постановку вопроса — «белый ящик», то есть задачу восстановления параметров заранее заданной структуры модели по измеренным сигналам.

Модель. В настоящей работе рассматривается изолированный аппаратный нейрон ФитцХью–Нагумо, реализованный на базе аналоговой электронной схемы, описанной в [3]. Поскольку в рамках данной работы рассматривается одиночный аппаратный нейрон без внешних связей, сумма по взаимодействиям в правой части уравнений отсутствует. Это позволяет сфокусироваться исключительно на внутренней динамике осциллятора.

Математическая модель описывается системой дифференциальных уравнений ФитцХью–Нагумо:

$$\begin{cases} \varepsilon \dot{u}_i(t) = u_i(t) - c_i u_i^3(t) - v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) + a_i - b_i v_i \end{cases} \quad (1)$$

где u — безразмерная переменная, характеризующая трансмембранный ток; v — безразмерная переменная, характеризующая ток восстановления; t — безразмерное время; ε — параметр инерционности; a — безразмерный параметр, управляющий собственной динамикой нейрона; c — коэффициент кубической нелинейности; b — безразмерный коэффициент, также управляющий собственной динамикой нейрона.

Аппаратная реализация модели описывается теми же уравнениями, но с размерными величинами:

$$\begin{cases} E \frac{dU}{dt} = U - cU^3 - V \\ T \frac{dV}{dt} = U + A - BV, \end{cases} \quad (2)$$

где U и V — измеряемые напряжения (в вольтах), соответствующие переменным u и v в математической модели; E — постоянная, определяющая скорость изменения мембранного потенциала; T — постоянная, определяющая скорость восстановления; c — коэффициент кубической нелинейности (безразмерный); B — безразмерный коэффициент обратной связи; A — напряжение смещения (в вольтах).

В ходе эксперимента были получены ряды $U(t_k)$ и $V(t_k)$, зарегистрированные с частотой дискретизации $f_s = 100$ кГц. Производные $\dot{U}(t_k)$, $\dot{V}(t_k)$ вычисляются численно с помощью центральных разностей второго порядка:

$$\dot{U}(t_k) \approx \frac{U(t_{k+1}) - U(t_{k-1}))}{2 \Delta t}, \quad \dot{V}(t_k) \approx \frac{V(t_{k+1}) - V(t_{k-1}))}{2 \Delta t}, \quad (3)$$

где $\Delta t = 1/f_s = 10^{-5}$ с.

Подставляя экспериментальные значения $U_k = U(t_k)$, $V_k = V(t_k)$ и их производные $\dot{U}_k$, $\dot{V}_k$ в уравнения (2), получаем невязки (остатки):

$$\begin{aligned} r_1^{(k)}(\boldsymbol{\theta}) &= E\dot{U}_k - (U_k - cU_k^3 - V_k), \\ r_2^{(k)}(\boldsymbol{\theta}) &= T\dot{V}_k - (U_k + A - BV_k), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\theta} = (E, T, c, A, B)^\top$ — вектор искомых параметров.

Задача реконструкции сводится к минимизации суммы квадратов всех невязок по всему анализируемому сегменту данных ($k = 1, \dots, N$):

$$\min_{\boldsymbol{\theta} \in \mathcal{D}} S(\boldsymbol{\theta}), \quad S(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^N \left[(r_1^{(k)}(\boldsymbol{\theta}))^2 + (r_2^{(k)}(\boldsymbol{\theta}))^2 \right], \quad (5)$$

где $\mathcal{D}$ — физически обоснованная область допустимых значений:

$$\begin{aligned} E &\in [10^{-9}, 10^{-2}] \text{ с}, \quad T \in [10^{-9}, 10^{-1}] \text{ с}, \\ c &\in [0.01, 2.0], \quad A \in [-5, 5] \text{ В}, \quad B \in [0, 5]. \end{aligned} \quad (6)$$

Оптимизация (5) решается численно с использованием алгоритма метода наименьших квадратов (`scipy.optimize.least_squares`), который минимизирует евклидову норму вектора остатков:

$$\|\mathbf{r}(\boldsymbol{\theta})\|_2^2 = \|\mathbf{r}_1(\boldsymbol{\theta})\|_2^2 + \|\mathbf{r}_2(\boldsymbol{\theta})\|_2^2. \quad (7)$$

Для количественной оценки качества аппроксимации использовалась нормированная среднеквадратичная ошибка (8), рассчитываемая по формуле:

$$\text{NRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\max(y) - \min(y)}, \quad (8)$$

где y_i — экспериментальные значения, $\hat{y}_i$ — значения, предсказанные моделью, N — число точек. Значения (8), приведённые в таблице 1, выражены в процентах от размаха сигнала.

Таблица 1. Восстановленные параметры и метрики качества подгонки.

Параметр	Эксперимент 1	Эксперимент 2	Эксперимент 3
E , мкс	99.55	99.57	99.12
T , мс	0.950	0.950	0.946
$\varepsilon = E/T$	0.1048	0.1048	0.1048
c	0.3504	0.3512	0.3510
A , В	0.5006	-0.1976	-0.4023
B	0.0119	0.1085	0.2100
$MSE(\dot{U})$	9.627e+03	1.077e+04	9.910e+03
$R^2(\dot{U})$	0.999530	0.999515	0.999509
$NRMSE(\dot{U})$	0.31%	0.33%	0.32%
$MSE(\dot{V})$	2.870e+03	3.170e+03	2.673e+03
$R^2(\dot{V})$	0.998660	0.998630	0.998743
$NRMSE(\dot{V})$	1.20%	1.23%	1.12%

Результаты. В рамках проведённой работы была произведена реконструкция параметров на трёх различных реализациях аппаратного нейрона ФитцХью–Нагумо. Во всех случаях был проанализирован временной ряд 50 мс (сегмент [1000;6000] при частоте дискретизации 100 кГц), соответствующий установившемуся режиму колебаний изолированного нейрона.

Восстановление параметров системы осуществлялось путём минимизации суммы квадратов невязок. Оптимизация проводилась с использованием интеллектуальной инициализации, основанной на обнаружении спайков и оценке характерного периода колебаний, что обеспечило устойчивую сходимость даже в условиях наличия шума.

Полученные результаты приведены в табл. 1. Во всех случаях достигнуто высокое качество подгонки: коэффициент детерминации R^2 превышает 0,9986 для $U(t)$ и $V(t)$. Нормированная среднеквадратичная ошибка не превышает 0,33% для $\dot{U}$ и 1,23% для $\dot{V}$, что свидетельствует о высокой точности реконструкции производных и, следовательно, адекватности восстановленной модели.

Заключение. В настоящей работе рассмотрен изолированный нейрон. В дальнейшем планируется обобщить метод на системы связанных нейронов с сигмоидной передачей, что потребует совместной реконструкции внутренних параметров и коэффициентов связи. Это позволит перейти от калибровки отдельных элементов к идентификации динамики целых нейроподобных ансамблей.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 25-12-00176.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитричев А.С., Касаткин Д.В., Клиньшов В.В., Кириллов С.Ю., Масленников О.В., Щапин Д.С., Некоркин В.И. Нелинейные динамические модели нейронов: обзор // Известия вузов. ПНД. 2018. Т. 26, вып. 4. С. 5–58. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-4-5-58.
2. Безручко Б.П., Смирнов Д.А. Математическое моделирование и хаотические временные ряды. Саратов: Изд-во «Колледж», 2005. 320 с.
3. Egorov N.M., Sysoev I.V., Ponomarenko V.I., Sysoeva M.V. Complex regimes in electronic neuron-like oscillators with sigmoid coupling // Chaos, Solitons & Fractals. 2022. Т. 160. С. 112171. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112171.

РАЗБРОС ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАЦИИ В АНСАМБЛЕ ЭЛЕКТРОННЫХ НЕЙРОНОВ

Л. В. Такаишвили^{1,2}✉, М. В. Сысоева², В. И. Пономаренко^{1,3}, И. В. Сысоев^{1,2}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

✉ nar7187@yandex.ru

Введение. Электронные генераторы нейроподобной активности (электронные нейроны) в настоящее время рассматриваются как основной элемент сетей спайковых нейронов, отличающихся от сетей формальных нейронов (нелинейных сумматоров, на которых и построены современные модели генеративного искусственного интеллекта) наличием собственной динамики во времени. Помимо создания ИИ нового поколения, электронные нейроны могут быть полезны в первую очередь для решения задач нейропротезирования, поскольку в отличие от формальных нейронов они именно способны воспроизводить электрическую активность биологических прототипов в той или иной степени приближения.

Аппаратные модели нейронных сетей и систем необходимы не только для практических применений, но и для фундаментальных исследований, направленных на изучение функционирования мозга. С момента создания первых аппаратных нейронов было предложено множество различных электронных схем. Часть из них представляла собой модификации оригинальной схемы, разработанной Маховальд и Дугласом [1]. Позднее были реализованы схемы, основанные на различных биофизических моделях нейрона, включая более простые: модель ФитцХью–Нагумо и модель Морриса–Лекара, а также упрощённые варианты модели Ходжкина–Хаксли с применением различных радиотехнических компонентов, в том числе частично цифровые [4]. На практике чаще всего используют модель ФитцХью–Нагумо [2–4] благодаря её относительной простоте схемотехнической реализации. В аппаратных реализациях нейроноподобных осцилляторов существенную роль играет технологический разброс параметров элементов, который приводит к вариации режимов генерации даже при идентичной схеме.

Целью работы является исследование разброса порогов генерации и амплитуд колебаний в ансамбле физических реализаций электронного нейрона, предложенного в работе [2] (см. рис. 1), а также анализ факторов, определяющих этот разброс.

Установка и сигналы. На рис. 2 приведена зависимость амплитуды напряжения сигнала от сопротивления потенциометра R_2 , отвечающего за коэффициент усиления операционного усилителя. Основные различия между кривыми заключаются в сопротивлении, при котором возникают колебания. В математической модели и симуляторе Ngspice колебания возникают при $R_2 \approx 50$ Ом — такое же поведение показывает схема на макетной плате. А вот три другие физические реализации показали разные результаты. У первого нейрона колебания возникают в районе 900 Ом, в то время как у второго и третьего — в районе при $R_2 \approx 700$ Ом. Сами формы сигналов и общие тенденции у всех реализаций похожи, возможно, немного отличаются по амплитуде, как видно из рис. 2. Ответственными за порог возникновения колебаний являются сопротивление катушки индуктивности и ёмкость конденсатора. Сопротивление реальных катушек находится близко к двум Омам, ёмкость конденсаторов тоже имеет определённые до-

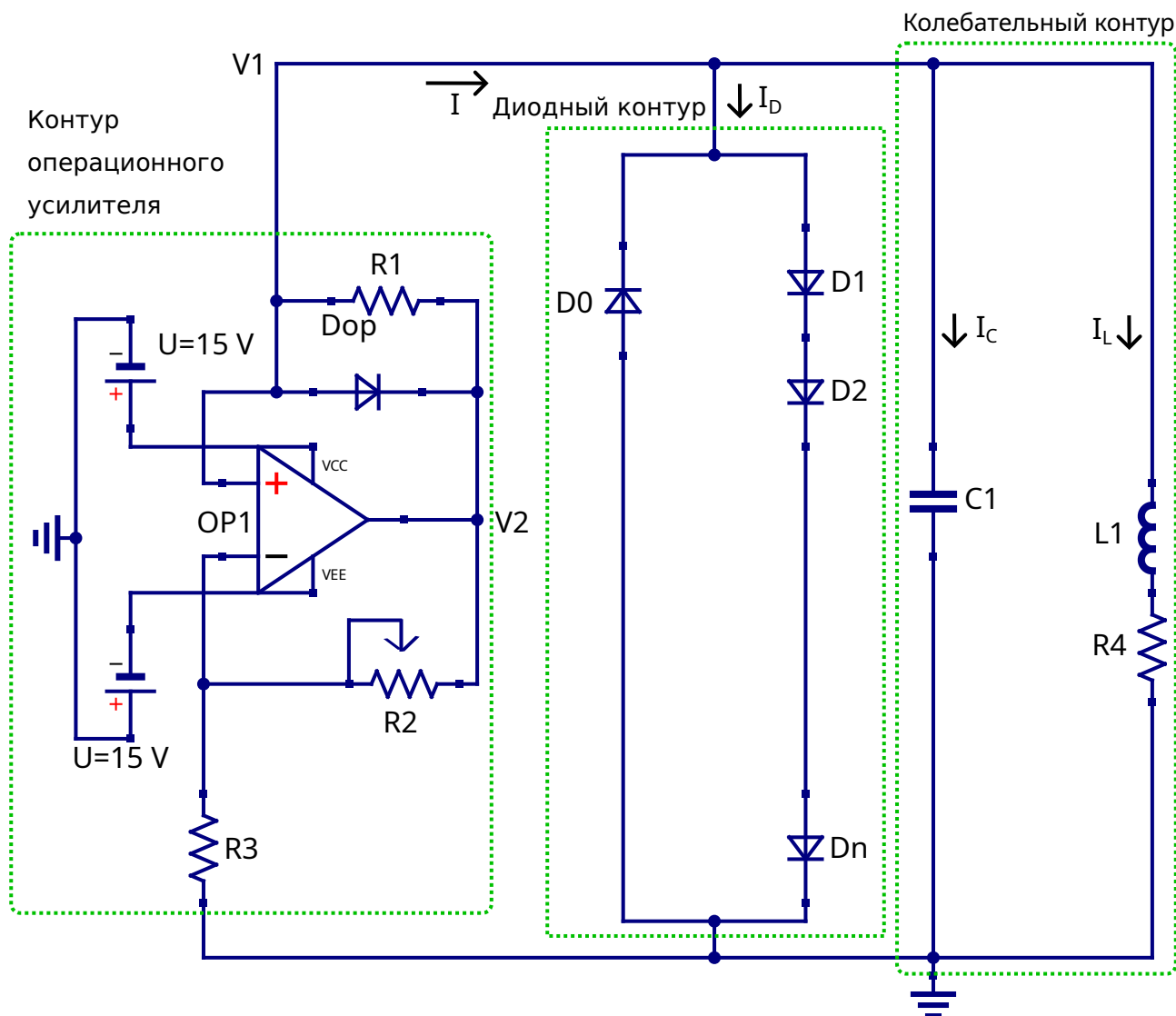


Рис. 1. Принципиальная схема простого перестраиваемого генератора нейроподобной активности, разработанного в [2]. Контур операционного усилителя состоит из операционного усилителя $OP1$ типа LM358, резисторов $R_1 = 1\text{ кОм}$ и $R_3 = 1\text{ кОм}$, потенциометра R_2 , диода Dop типа 1N4148. Диодный контур состоит из $n + 1$ диодов типа 1N4148. Колебательный контур состоит из конденсатора $C_1 = 300\text{ нФ}$, катушки индуктивности $L_1 = 1\text{ мГн}$, резистора $R_4 = 2\text{ Ом}$ (резистор может отсутствовать при условии достаточного собственного сопротивления катушки).

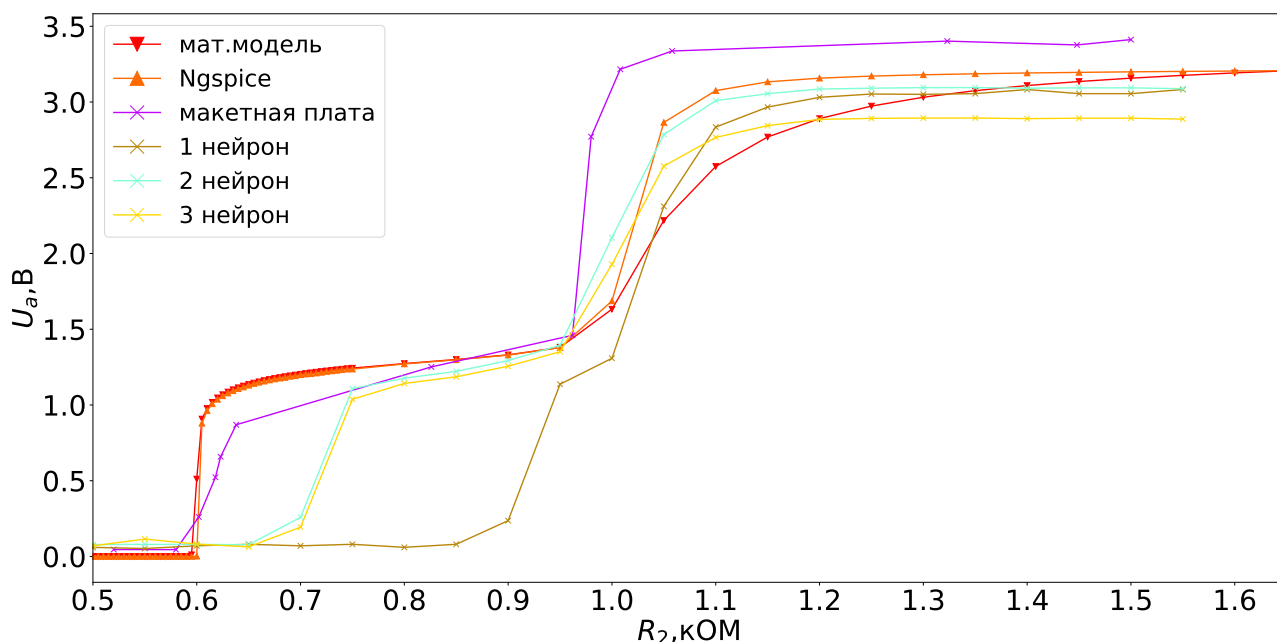


Рис. 2. Зависимость полной амплитуды колебаний в контуре 1 от сопротивления потенциометра резистора R_2 , где кривые обозначены цветом в соответствии с тем, от какого варианта исполнения они получены: математическая модель обозначена красным, симуляция в Ngspice — оранжевым, макетная плата — фиолетовым, 1-й нейрон — коричневым, 2-й нейрон — бирюзовым, 3-й нейрон — жёлтым.

пуски и, следовательно, сопротивление R_2 , при котором начинаются колебания, должно быть близкими к 650 Ом. Однако этого не наблюдается, в связи вероятно, что разницу в соотношении сопротивлений и ёмкости вносят диоды своим паразитным сопротивлением.

Результаты. Было проведено сопоставление кривых зависимости амплитуды колебаний U_a от управляющего параметра в ансамбле генераторов нейроподобной активности, чтобы выявить возможные различия в режимах генерации и определить, являются ли эти различия результатом несовершенства модели, либо они — следствие неидентичности построенных электронных нейронов. Для этого рассматривались математическая модель (красным цветом на рис. 2), имитационная модель, построенная в симуляторе схем ngSPICE (оранжевым), экспериментальная макетная плата, сигналы которой анализировались в работе [2], а также 3 собранных уже для данной работы экземпляров нейронов: коричневого, бирюзового и жёлтого цвета. Анализа различий в зависимости $U_a(R_2)$ выявил, что наиболее существенная разница наблюдается в том, при каком значении сопротивления управляющего резистора R_2 начинаются колебания в схеме, то есть по сути в бифуркационном значении данного параметра (в системе имеет место мягкое рождение колебаний через суперкритическую бифуркацию Андронова–Хопфа). Данное различие вызвано неоднородностью физических параметров элементов схемы, отклонениями реальных значений от номиналов, однако однозначно указать на конкретный элемент не представляется возможным. Одним из возможных вариантов является паразитная ёмкость диодов, что приводит к необходимости корректировки всей модели, разработанной в работе [2] и повышению её порядка. Другим вероятным кандидатом является различное внутреннее сопротивление катушки и сопротивление припоя.

Следует также отметить, что сама форма кривой зависимости $U_a(R_2)$ для макетной платы и трёх электронных нейронов в режиме высокоамплитудных колебаний, когда существенным является ток через операционный усилитель $OP1$, ни качественно, ни количественно не отличается от кривой, построенной для симулятора. Кривые для разных экземпляров генератора лежат как выше, так и ниже кривой, построенной с использованием ngSPICE. То есть можно

считать, что симулятор достаточно точно воспроизводит зависимость амплитуды колебаний от сопротивления потенциометра (и, таким образом, фактически, от коэффициента усиления) в данном, самом практически важном, режиме. А существующие различия скорее могут быть обусловлены несовпадениями номиналов и реальных значений сопротивлений, индуктивности ёмкости элементов схемы, чем несовершенством симулятора.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-12-00176.

ЛИТЕРАТУРА

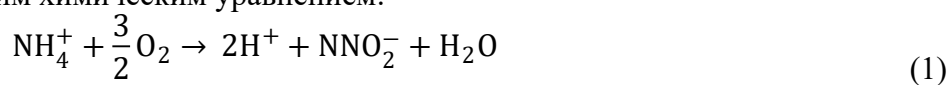
1. *Mahowald, M. and Douglas, R.* A silicon neuron // *Nature*. 1991. Vol. 354(6354). P. 515–518.
2. *Takaishvili L. V., Ponomarenko V. I., Sysoev I. V.* Simple tunable generator of neuron-like activity // *Chaos, Solitons & Fractals*. 2025. Vol. 196. P. 116316.
3. *Li F., Liu Q., Guo H., Zhao Y., Tang J., Ma J.* Simulating the electric activity of FitzHugh–Nagumo neuron by using Josephson junction model // *Nonlinear Dynamics*. 2012. Vol. 69. P. 2169–2179.
4. *Kulminskiy D. D., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D., Hramov A. E.* Synchronization in ensembles of delay-coupled nonidentical neuronlike oscillators // *Nonlinear Dynamics*. 2019. Vol. 98. P. 735–748.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКИ ИНФОРМИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ НИТРИФИКАЦИИ: ФИНС С ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ И ФИНС ДЛЯ ЧИСТОГО РЕШЕНИЯ

В.Д. Тарасов✉, А.О. Гречнева, Д.А. Тархов, А.В. Шатров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉ tarasovvd853@gmail.com

Введение. Вода является жизненно важным ресурсом, особенно в контексте обеспечения питьевой водой. В процессе производственной деятельности, например, в металлургии, вода используется для охлаждения и мойки оборудования, что приводит к образованию сточных вод. Аналогично, атмосферные осадки, стекая с городских и промышленных территорий, также становятся источником загрязнённых вод. Это обуславливает необходимость разработки эффективных методов их очистки. Современные системы очистки сточных вод основаны на многоступенчатом подходе, включающем механическую, физико-химическую и биологическую стадии [1]. Особое значение имеет биологический этап, в ходе которого специальные микроорганизмы разлагают органические и неорганические загрязнения [2]. Одним из ключевых этапов очистки является биологическое удаление азота, которое включает процессы нитрификации и денитрификации. В данной работе исследуется математическая модель первой стадии - окисления ионов аммония.

Модель. Биологическое удаление азота из сточных вод осуществляется в две стадии: нитрификация и денитрификация. В данной работе изучается первая стадия, а именно окисление аммония бактериями *Nitrosomonas*. Превращение иона аммония в нитрит-ион описывается следующим химическим уравнением:



Для математического описания динамики процесса использована система обыкновенных дифференциальных уравнений, основанная на модели роста микроорганизмов и потребления субстрата. Она описывает изменение во времени концентрации аммония и биомассы бактерий.

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -\mu_1 \frac{N}{K_N + N} B \\ \frac{dB}{dt} = \mu_2 \frac{N}{K_N + N} - k_d B, \end{cases} \quad (2)$$

где: N - концентрации аммония; B - концентрация бактерий вида *Nitrosomonas*; $\mu_{1,2}$ - максимальная удельная скорость реакции; k_d - константа отмирания микроорганизмов *Nitrosomonas*; K_N - константа полунасыщения; t - время.

Методы. Для поиска приближённого решения используется нейронная сеть фиксированной архитектуры $\sum_{i=1}^N c_i \cdot \tanh[a_i(t - d_i)] + c_0$, в процесс обучения которой напрямую включаются физические законы, описываемые системой дифференциальных уравнений [3]. Обучение направлено на минимизацию функции потерь, учитывающей как соответствие экспериментальным данным, так и выполнение уравнений модели в коллокационных точках. В результате формируется аналитически гладкое решение, удовлетворяющее физическим ограничениям.

Метод ФИНС для прямого решения используется в случае известных параметров модели. Нейросеть фиксированной структуры обучается находить функции, одновременно приближающие экспериментальные точки и удовлетворяющие системе дифференциальных уравнений. Для этого минимизируется общая ошибка, которая складывается из отклонения от

данных и невязки уравнений (функция потерь). В результате получается гладкая аналитическая функция, описывающая процесс.

Функция потерь для обоих методов имеет следующий вид:

$$E(N, B) = \sum_{i=1}^m P_i + Ag \sum_{i=1}^{m1} Z_i, \quad (3)$$

где:

$$P_i = \left(\frac{dN}{dt} + \mu_1 \frac{N}{K_N + N} B \right)^2 (t_i) + \left(\frac{dB}{dt} - \mu_2 \frac{NB}{K_N + N} + k_d B \right)^2 (t_i) \quad (4)$$

$$Z_i = (N(tg_i) - N_i)^2 + (B(tg_i) - B_i)^2 \quad (5)$$

Здесь t_i пробные точки, которые регенерируются каждые 3-5 шагов обучения как случайные равномерно распределённые во всей области изменения переменных, tg_i - точки измерений, N_i - данные измерений, n - число нейронов. В связи с случайной регенерацией тестовых точек новая их выборка, сгенерированная на очередном шаге, может рассматриваться как тестовая для дифференциальных уравнений задачи.

Результаты. Основные характеристики, влияющие на точность методов, - количество нейронов в скрытом слое n и значение весового коэффициента Ag . В предыдущих исследованиях были определены оптимальные значения основных характеристик для метода идентификации параметров: $n = 51$ и $Ag = 2$, обеспечивающие баланс между точностью аппроксимации данных и выполнением системы уравнений [4]. При данной оптимальной конфигурации метод идентификации параметров демонстрирует следующие показатели точности. Среднеквадратичная ошибка выполнения уравнений: 0.006364.

Метод ФИНС для прямого решения используется, когда параметры модели известны. Для него мы найдём оптимальные число нейронов в скрытых слоях n и весовой коэффициент Ag . Для определения оптимального числа нейронов был построен график зависимости среднеквадратичной ошибки от количества нейронов.

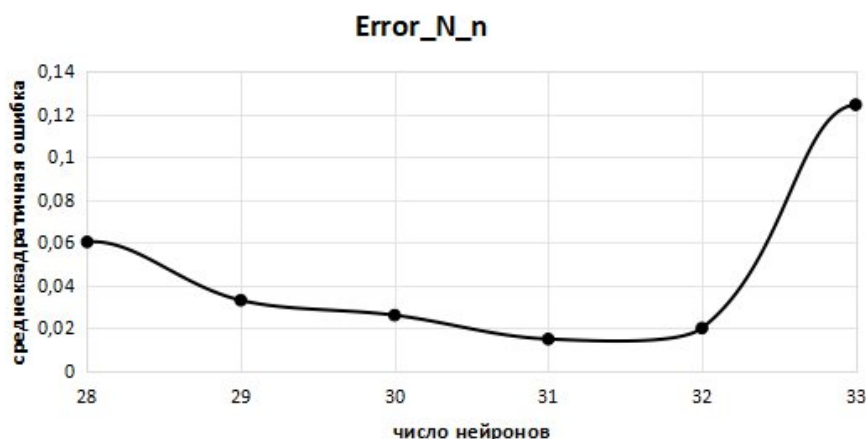


Рис. 1. График зависимости среднеквадратичной ошибки от количества нейронов.

Для определения оптимального числа нейронов была исследована зависимость среднеквадратичной ошибки (СКО) от n (Рис. 1). Кривая $Error_N_n$ демонстрирует наличие минимума вблизи значения 31 нейрон. Точные значения СКО для различного n приведены в таблице 1. Как видно из таблицы, минимальная ошибка 0,0147082 действительно достигается при $n = 31$, что подтверждает оптимальность этой конфигурации.

Таблица 1. Значения среднеквадратичных ошибок для различного числа нейронов.

n	Error n	n	Error n	n	Error n	n	Error n
21	0,0340726	26	0,0293762	31	0,0147082	36	0,0235422
22	0,0801028	27	0,020995	32	0,0198429	37	0,0408234
23	0,0173821	28	0,0602225	33	0,124525	38	0,0136879
24	0,0279988	29	0,0328789	34	0,0329545	39	0,0264072
25	0,0214385	30	0,0258963	35	0,0141736	40	0,0273049

Для дальнейшего уменьшения ошибки был проведён поиск оптимального весового коэффициента Ag . На Рис. 2 представлен график зависимости СКО от Ag в логарифмическом масштабе с основанием 10 (ось X), так как коэффициент изменялся в широком диапазоне.

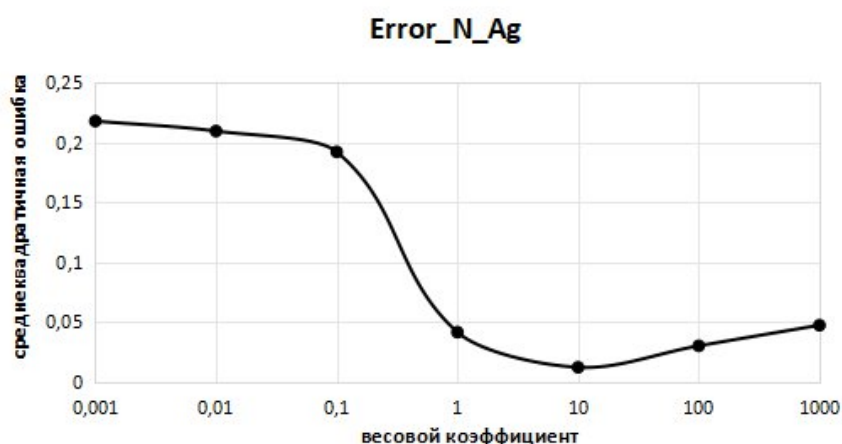


Рис. 2. График зависимости среднеквадратичной ошибки от весового коэффициента в логарифмическом масштабе по оси x.

График Error_N_Ag явно указывает на оптимальное значение $Ag = 10$. Ниже представлена таблица значений, по которым строился данный график.

Таблица 2. Значения среднеквадратичных ошибок для различных весовых коэффициентов.

Ag	Error_Ag
0,001	0,218054
0,01	0,209708
0,1	0,192351
1	0,0417932
10	0,0124393
100	0,0303599
1000	0,0475771

Таким образом, оптимальная конфигурация модели ($n = 31$, $Ag = 10$) обеспечивает среднеквадратичную ошибку, равную 0,0124393.

Вывод. Проведено сравнение двух методов ФИНС для моделирования нитрификации. Метод с идентификацией параметров ($n=51$, $Ag=2$) обеспечивает высокую точность с ошибкой 0.006364 и является более универсальным, так как одновременно определяет неизвестные константы модели. Метод прямого решения ($n=31$, $Ag=10$) показывает точность 0.0124393 и

имеет более простую вычислительную схему. Оба подхода эффективны для решения задачи, что подтверждает перспективность использования ФИНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tuse Asrav., Ece Serenat Koksai., Elif Ecem Esenboga., Ahmet Cosgun., Gizem Kusoglu., Duygu Aydin., Erdal Aydin.* Physics-informed Neural Network based Modeling of an Industrial Wastewater Treatment Unit, Editor(s): Antonios C. Kokossis., Michael C. Georgiadis., Efstratios Pistikopoulos., Computer Aided Chemical Engineering, Elsevier, Volume 52, 2023, Pages 227-234, ISSN 1570-7946, ISBN 9780443152740, DOI:10.1016/B978-0-443-15274-0.50037-8.
2. *Qidong Yin., Yuepeng Sun., Bo Li., Zhaolu Feng., Guangxue Wu.* The r/K selection theory and its application in biological wastewater treatment processes, Science of The Total Environment, Volume 824, 2022, 153836, ISSN 0048-9697, DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.153836.
3. *Tarkhov D., Vasilyev A.* Semi-Empirical Neural Network Modeling and Digital Twins Development. Academic Press, 2020
4. *Тарасов В.Д., Тархов Д.А., Шатров А.В.* Построение математической модели процесса окисления ионов аммония // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: Сб. ст. по материалам ХС междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск, 2025. — С. 14–19.

VR–ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Т.А. Тихонова✉, Т.А. Андреева, А.О. Купцов, А.Я. Лукин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
✉tihonova_ta@spbstu.ru

Интерактивный контент и использование гаджетов – привычная часть жизни современного человека. Неудивительно, что цифровая среда затронула и сферу образования [1]. Современные молодые люди сегодня едва ли представляет свою жизнь без всевозможных гаджетов, поэтому вполне логично воспользоваться этим фактом и привлечь внимание обучающихся, заинтересовать их через погружение в привычную и естественную для них цифровую среду.

Безусловно подобный подход имеет и свои недостатки – практически на каждый плюс здесь можно найти зеркальный минус. Виртуальная реальность обеспечивает безопасность эксперимента, но и не приучает к ответственности, внимательности к происходящему. Однако в ходе эксперимента мы можем акцентировать внимание студентов не на отсутствии реальных последствий, а на возможности учиться обходить опасности и тем самым избегать катастроф. Аварийные ситуации и их последствия могут быть реализованы как часть программы, что должно предупреждать о возможных последствиях в реальности. Таким образом ошибки становятся одним из этапов обучения, а не потенциальным источником.

Из безусловных плюсов VR – возможность самостоятельной сборки установки без страха что-либо сломать или просто сделать ошибку; студенты получают возможность экспериментировать с установкой [2]. Учебный процесс в таком виде предполагает получение обратной связи в реальном времени, получение текстовых и визуальных подсказок, а также возможность работать каждому в комфортном темпе, повторяя (проигрывая) какие-то сложные, вызывающие затруднения элементы работ, что способствует развитию инженерного мышления. Благодаря наглядности, безопасности использования и гибкости технологий, VR может вывести преподавание естественных наук на качественно новый уровень.

К сожалению, большинство существующих на рынке решений не реализуют перечисленные достоинства VR технологий, предлагая только возможность выполнить измерения на готовом макете с использованием схематических моделей приборов. Часто такие решения отличаются малой вариативностью (одинаковые результаты измерений стимулируют списывание) и слабой методической проработкой.

Целью настоящего проекта является создание VR лабораторного практикума нового поколения, отличающегося

- использованием 3D-моделей реальных приборов (цифровых копий), что позволяет подготовить студентов к встрече с ними в реальной лаборатории, освоить работу с достаточно сложными современными цифровыми приборами, тренируясь на моделях;
- возможностью самостоятельно собирать электрическую схему, получая показания приборов, соответствующие собранной схеме, и реакцию на ошибочные соединения;
- масштабируемостью, то есть наличием средств для расширения списка работ, исследуемых материалов, изучаемых процессов.

Для реализации проекта необходима профессиональная работа во всех его составляющих, поэтому создание 3D-моделей, алгоритмов их поведения и физических моделей осуществлялось командами программистов и физиков. При этом структура реализуемого проекта обеспечивает максимально независимую работу команд.

Фронтенд работы формируется 3D-моделями реальных приборов и лабораторных макетов, разработанных с использованием Unity командой программистов (Рис. 1). Реакция 3D-моделей на действия студента (изменение режимов, параметров, нажатие кнопок), отображаемая на дисплее прибора информация прописываются физиками на основе описаний и экспериментального исследования. Разработанная таким образом «поведенческая модель» реализуется программистами на C#.

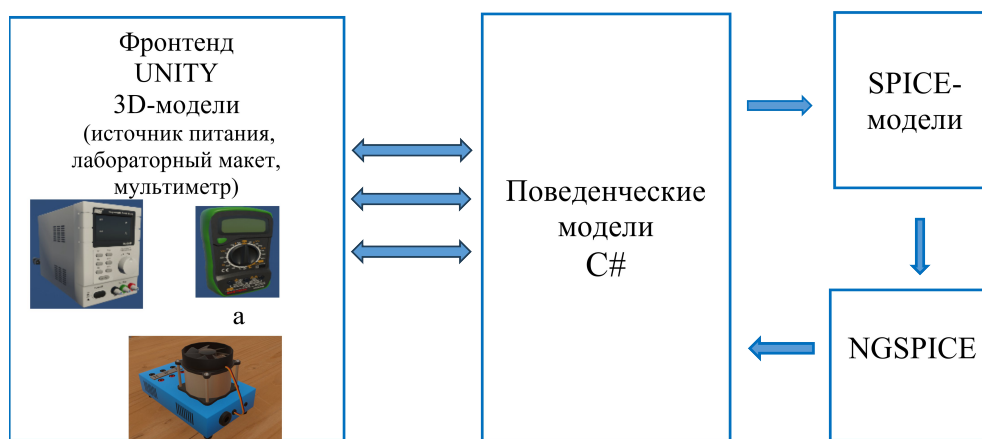


Рис. 1 – Структура виртуальной лабораторной работы.

Возможность самостоятельно собирать схему и получать при этом адекватный результат невозможно реализовать, «закладывая» в программу все возможные варианты. Поэтому для расчета собранной схемы использован универсальный пакет моделирования электрических схем NGSPICE. Язык SPICE, на котором осуществляется описание схемы и поведения ее элементов, позволяет не только использовать стандартные библиотеки, но и реализовать достаточно сложные математические модели. Текстовые файлы SPICE не требуют предварительной компиляции, легко объединяются при сборке схемы. Предварительно прописанные универсальные интерфейсы между поведенческой и SPICE моделью, обеспечивают необходимую свободу при создании физиками SPICE модели, обеспечивая масштабируемость проекта.

Рассмотрим подробнее устройство виртуальной лабораторной работы на примере работы по исследованию зависимости сопротивления металлов и полупроводников от температуры. В состав работы входит цифровой источник питания нагревателя QJ3005P, два мультиметра MS830B для измерения сопротивления образцов, измеритель температуры MS6500 и лабораторный макет. На рисунке 2 показаны 3D-модели перечисленных приборов.

Цифровая копия каждого прибора, например источника питания QJ3005P включает его 3D-модель, поведенческую (для краткости В-модель) и SPICE-модель. Источник имеет много разных состояний (настройка тока и напряжения, защиты внешней цепи, запоминания настроек) и режимов, поэтому его В-модель, описывающая переход из одного состояния в другое при нажатии кнопок или по времени, оказывается достаточно громоздкой. К сожалению, руководство пользователя не всегда достаточно подробно описывает поведение прибора (а в случае с QJ3005P и вообще неверно). Поэтому создание В-модели часто требует детального экспериментального исследования поведения моделируемого прибора.

С точки зрения внешней цепи, поведение источника достаточно простое – он может быть выключен или работать в режиме стабилизации напряжения или тока. Поэтому его SPICE-модель реализует простой источник напряжения с ограничением тока (Рис. 3).



Рис. 2. 3D-модели используемых приборов.

*QJ3005P	(Продолжение)
	*Установочные значения
.SUBCKT QJ3005P POS NEG Vset = 30 Iset = 5	V Vset Vset 0 Vset
*Установка параметров. * - имя экземпляра	V Iset Iset 0 Iset
.param Set Vset = "alter V.*.V Vset = "	*Источники с ограничением тока и напряжения
.param Set Iset = "alter V.*.V Iset = "	BSrc IntV IntI V = V(Vset)
*Считывание реальных тока и напряжения	GSrc Neg IntI cur = V(Iset)
.param Get Vreal = "print V(*. Vreal)"	DS IntI Neg ID
.param Get Ireal = "print I(V.*.V Ireal)"	DB IntR IntV ID
*Идеальный диод	RB IntR NEG 6
.model ID D (Is=100pA n=0.001 temp = 27)	*Выходное напряжение, округленное до 0.01
*Измерение тока	B Vreal Vreal 0 V = nint((V(Pos)-V(Neg))*100)/100
V Ireal IntV Pos 0	.ENDS QJ3005P

Рис. 3. SPICE модель источника QJ3005P.

С мультиметром MS830B ситуация обратная. Его В-модель чрезвычайно проста – набор типов измеряемых величин и диапазонов измерения плюс перегорание предохранителя при токе 250 мА и режим HOLD. В то же время SPICE-модель должна для каждого типа измеряемой величины вычислять и передавать измеренное значение, при этом входное сопротивление (при измерении тока) и измерительный ток (при измерении сопротивления) на разных диапазонах различны. Для построения SPICE-модели также требуется экспериментальное исследование прибора, так как многие интересующие нас параметры в руководстве не приводятся.

Рассмотрим теперь лабораторный макет. В отличие от реальных приборов уникальность макета позволяет создание модели, не привязанной к реально к еще не существующему объекту. За основу при создании такой модели был взят корпус используемой в лаборатории паяльной станции, дополненный радиатором с вентилятором (Рис. 4). Такая конструкция с одной стороны стабилизирует температуру внутри нагреваемой капсулы, с другой позволяет существенно расширить диапазон температур в ней, позволяя использовать высокотемпературный нагреватель или элементы Пельтье для расширения диапазона в отрицательную область. При этом все модификации можно сделать «одним росчерком пера», изменив SPICE-модель макета. Для самостоятельной сборки студентами макет имеет гнезда для подключения питания нагревателя и мультиметров.

SPICE-модель макета содержит данные большого числа металлов – удельное сопротивление, температурный коэффициент сопротивления, температуру Дебая, температуру плавления. Для моделирования доступны как простая модель (с постоянным коэффициентом), так и формула Блоха-Грюнейзена. Имеется и набор данных для различных полупроводников.



Рис. 4. Лабораторный макет.

При запуске модель требует многозначный цифровой код (уникальный для каждого студента), на основе которого происходит генерация параметров установки – выбор металла, полупроводника и их параметров. Это обеспечивает высокую вариативность результатов работы и препятствует списыванию. В процессе моделирования значения переменных контролируются на имеющиеся ограничение (например, превышение температуры плавления или разрушение образца при ошибочном подключении его к источнику питания), о чем студент получает визуальное (дымок) и текстовое сообщение. До «восстановления» установка имитирует работу с повреждением – разрыв цепи и т.д.

На самом деле лабораторный макет (Рис. 4) по сути является универсальным термостабилизированным четырехполюсником. После смены подписей на гнездах, что также можно сделать в файле, описывающим состав лабораторной работы, на базе этого макета можно реализовать также такие работы, как исследование температурной зависимости свойств сегнетоэлектрика и ферромагнетика, расширить работу по исследования вольтамперных характеристик р-п перехода для разных температур, поместить в термостат транзистор для измерения постоянной Больцмана и даже сделать работу по плавлению и кристаллизации образца.

Проект выполняется при финансовой поддержке гранта по программе развития СПбПУ в рамках образовательно – кадрового направления по лоту №3 ДО «Разработка виртуальных лабораторных макетов для электрорадиоизмерений».

ЛИТЕРАТУРА

1. Radianti J., Majchrzak T.A., Fromm J., Wohlgenannt I. A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda // Computers & Education. 2020. Volume 147. 103778 <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>
2. Симонова Е.С., Кубанских О.В. Преимущества виртуальных лабораторий // Современные научные исследования и инновации. 2019. № 7 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2019/07/89917> (дата обращения: 10.01.2026).

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ОРТОФЕРРИТЕ TmFeO_3 МЕТОДОМ НЕЙТРОНОГРАФИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

К.Ю. Ткаченко^{1,2}✉, А.К. Овсяников², О.В. Усманов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова «ПИЯФ», Гатчина

✉ tkachenkokirill2@mail.ru

Введение. Ферриты представляют собой распространенные соединения в области материаловедения. Они классифицируются на четыре группы, однако в данной работе основное внимание будет уделено соединениям, в которых редкоземельный элемент R связан с оксидом железа Fe_2O_3 . Эти соединения особенно интересны для исследования, поскольку демонстрируют электрическую поляризацию, что открывает возможности для применения ортоферритов в устройствах хранения информации с ультравысокой плотностью записи, а также в других современных технических устройствах.

TmFeO_3 является одним из представителей группы редкоземельных ортоферритов, в которой наблюдаются различные магнитные фазовые переходы, включая переход через смешанную фазу [1,2]. Образец был исследован с использованием методов рентгеновской и нейтронной дифракции в присутствии внешнего магнитного поля.

Эксперимент. В качестве экспериментального образца использовался высококачественный монокристалл TmFeO_3 , полученный методом зонной плавки. Для нейтронных исследований был применён монокристалл в форме параллелепипеда с объёмом $4 \times 4 \times 8$ мм³. Эксперимент по дифракции нейтронов осуществлялся на базе приборного парка Institute Laue-Langevin (ILL). Изучение магнитной структуры проводилось с использованием дифрактометра D23. Ориентация кристалла была получена с помощью OrientExpress. Данный автоматизированный нейтронный дифрактометр Лауэ использует две высокопроизводительные CCD-камеры, соединённые с большим нейтронным сцинтиллятором, что обеспечивает быструю ориентацию кристаллов.

Эксперимент проводился в две серии измерений, сначала магнитное поле было направлено вдоль оси b кристалла, а затем вдоль оси c при температурах от 2 К до 100 К с шагом в 20 К. Использовались восемь постоянных полей (0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 5, 5,8 Тл).

Рентгеновская часть эксперимента проводилась на дифрактометре SmartLab Rigaku в Петербургском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова (ПИЯФ). В качестве образца использовался порошок, полученный путём измельчения кристалла. Измерения проводились на медном катоде в диапазоне углов от 20° до 135°.

Результаты. В результате анализа данных рентгеновского эксперимента были уточнены параметры решётки (Таблица 1) и положение атомов. На основании этих данных было установлено направление электрического дипольного момента и созданы карты электронной плотности Fe-O-Fe и Tm-O-Fe, что косвенно продемонстрировало пути суперобменного взаимодействия.

Таблица 1. Параметры решётки.

TmFeO_3	300 K, ($\chi^2 = 1.05$)	300 K, ($\chi^2 = 1.05$)	300 K, ($\chi^2 = 1.05$)	300 K, ($\chi^2 = 1.05$)
a	5.5721(2)	5.5679(2)	5.5655(2)	5.5650(2)
b	7.5823(2)	7.5761(3)	7.5740(3)	7.5732(3)
c	5.2468(2)	5.2429(2)	5.2415(2)	5.2407(2)

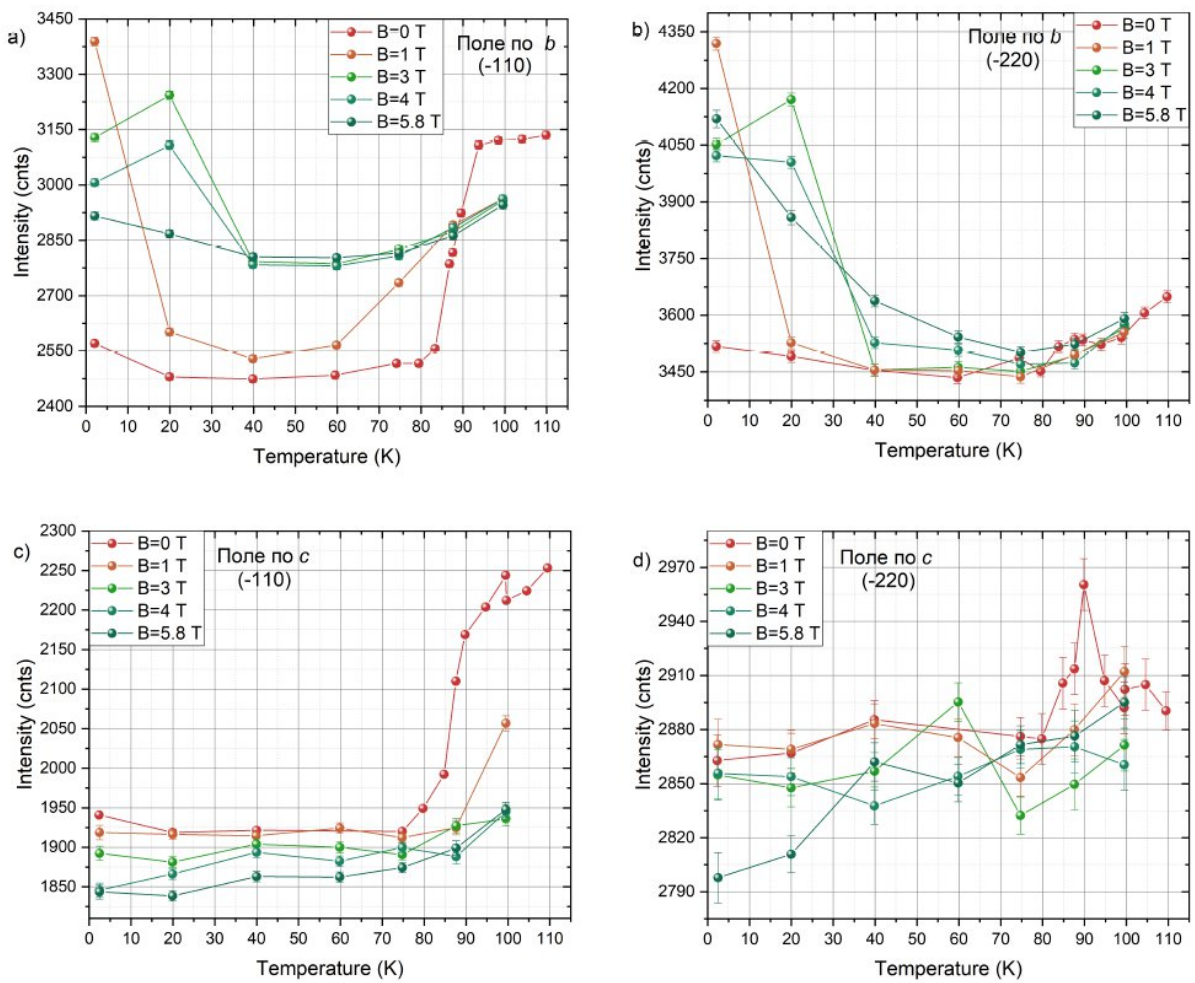


Рис. 1. Температурные зависимости интенсивности отражений (-110) , (-220) для внешнего магнитного поля, направленного а) б) вдоль оси b и с) д) вдоль оси c .

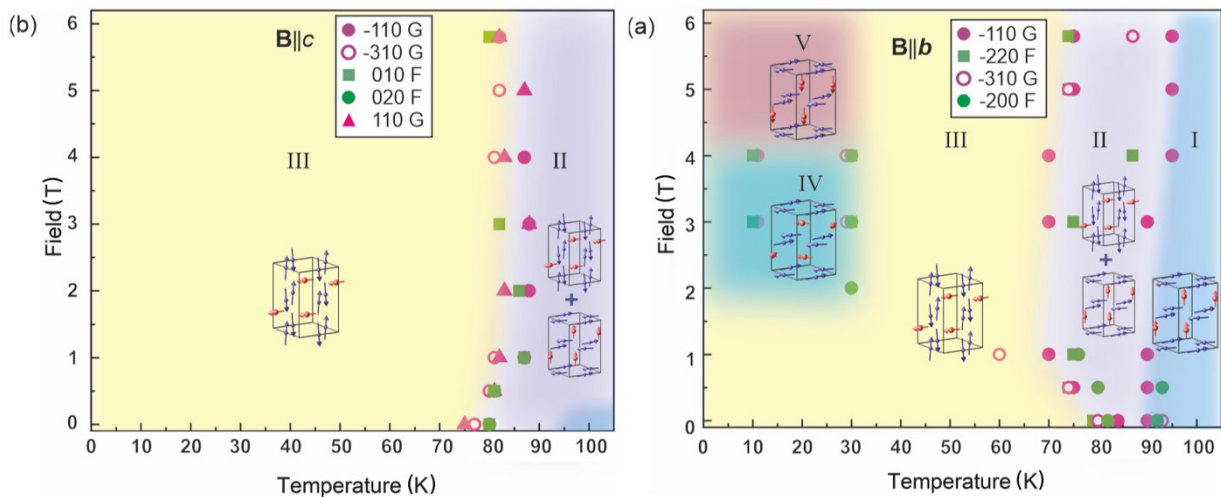


Рис. 2. Схема магнитной фазовой диаграммы для TmFeO_3 а) внешнее магнитное поле вдоль оси b б) вдоль оси c . Квадраты, круги и треугольники обозначают точки перегиба функции температурной зависимости интенсивности для различных отражений.

Анализ нейтронного эксперимента позволил для каждой из плоскостей рассеяния построить графики зависимости интенсивности рассеяния нейтронов от температуры, величины поля и его направления (Рис. 1).

Наконец для нахождения температур перехода из одного состояния в другое, необходимо искать точки перегиба полученных графиков зависимостей. После по полученным данным строятся магнитные фазовые диаграммы TmFeO_3 для поля, направленного вдоль оси b и c .

ЛИТЕРАТУРА

1. Bombik A., Leśniewska B., Pacyna A. W. Magnetic susceptibility of powder and single-crystal TmFeO_3 orthoferrite //Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2000. – Т. 214. – №. 3. – С. 243-250.
2. Tsybal L. T. et al. Natural behavior of the magnetization under spontaneous reorientation: TmFeO_3 , ErFeO_3 //Low temperature physics. – 2005. – Т. 31. – №. 3. – С. 277-282.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Ge-Sb-Te

Н.М. Толкач^{1,2}✉

¹Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва

²ООО «Активная Фотоника» (входит в группу компаний НТ-МДТ), Зеленоград, Москва

✉ n.tolkach@ntmdt-russia.ru

Введение. Процессы фазового переключения в материалах системы Ge-Sb-Te имеют неисследованные области. Кроме основных фазовых состояний (аморфного и кристаллического) существуют дополнительные промежуточные состояния, обусловленные наличием частично кристаллических и аморфных наноразмерных фракций материала [1-4]. Контроль соотношений фракционного состава материала открывает широкие возможности в тонкой настройке его оптических параметров, но при этом требует исследования процессов и закономерностей, происходящих при оптическом воздействии управляющего и информационного излучения и зондирования на халькогенидный стеклообразный полупроводниковый материал системы Ge-Sb-Te.

В данной работе предлагается реализовать идею оптически управляемого модулятора, которая состоит в следующем. Тонкопленочная многослойная структура из материала $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST) с фазовым переходом выполняет роль затвора, отражающего либо поглощающего модулируемое излучение лазера с длиной волны в диапазоне от 1549 до 1551 нм в зависимости от фазового состояния GST пленки, которое изменяется модулирующим лазером с длиной волны в диапазоне от 600 до 800 нм.

Изменение отражающих и поглощающих свойств многослойной структуры достигается за счет многократной интерференции между слоями и перераспределения энергии модулируемого излучения. В аморфном состоянии пленка GST обладает минимальным поглощением и показателем преломления слоя GST, обеспечивающим высокий коэффициент отражения многослойной структуры в целом. В кристаллическом состоянии пленка GST обладает максимальным поглощением и показателем преломления слоя GST, обеспечивающим условия, при которых наблюдается многократное переотражение от соседних слоев с многократным входением в слой GST, что в итоге приводит к высокому коэффициенту поглощения многослойной структуры в целом.

Изменение фазового состояния осуществляется с помощью вариации длительностью и амплитудой лазерного модулирующего импульса. Подавая короткий импульс с высокой энергией, пленка GST приобретает аморфное фазовое состояние. Подавая долгий импульс с малой энергией, пленка GST приобретает кристаллическое фазовое состояние. Варьируя значениями времени и амплитуды между аморфным и кристаллическим состояниями, можно постепенно наращивать пропускание, уменьшать поглощение либо наоборот.

Таким образом, объектами исследования являются образцы с пленками GST.

Цель работы – разработать устройство оптически управляемого модулятора на основе материала системы Ge-Sb-Te.

Материалы и методы. В качестве образцов использовались тонкопленочные многослойные структуры, расположенные на кварцевой подложке из SiO_2 и состоящие из тонкопленочных слоев Si, SiO_2 , GST.

Для исследования и испытания образцов было использовано следующее оборудование: многофункциональная исследовательская система Ntegra Spectra™, совмещенная со спектрометром LS RamBo 620™ (приборами производства ООО «Активная фотоника» (входит в группу компаний НТ-МДТ), Россия, Зеленоград), в конфигурации с верхней

засветкой [5]. Были выполнены испытания оптического модулятора, а также исследования используемых при его разработке образцов с GST пленками. Использовались методы атомно-силовой микроскопии, оптической микроскопии, лазерного сканирования, регистрации сигналов пропускания и отражения с помощью ФЭУ и рамановской спектроскопии [6-10]. Воздействие на образцы с помощью лазеров выполнялось для следующих длин волн: 405, 532, 633, 785 и 1550 нм. Подробные исследования материалов системы Ge-Sb-Te приведены в работах [1, 11-16].

Для исследования распространения света в многослойных тонкопленочных структурах, используемых в модуляторе, выполнялось моделирование в программной среде MathLAB [15] – с помощью рекуррентных соотношений Френеля и Эйри рассчитывалась отражательная R и пропускательная T способности в слоях и в многослойной структуре в целом.

Результаты. В результате проведенных модельных расчетов было разработано устройство фотонного модулятора [17], в котором подложка состояла из кварцевого стекла SiO_2 , многослойная структура состояла из, как минимум, пяти слоев: 110 нм Si, 30 нм SiO_2 , 30 нм GST слой, 215 нм SiO_2 , 110 нм Si. Поверх 110 нм слоя Si также был использован защитный 20 нм слой SiO_2 , предотвращающий самопроизвольное окисление 110 нм слоя Si.

Для длин волн в диапазоне от 1549 до 1551 нм используемый слой GST в аморфном фазовом состоянии имел показатель преломления равный 3.79, коэффициент экстинкции 0.05, в кристаллическом фазовом состоянии показатель преломления был равен 6.31, коэффициент экстинкции 1.22, подложка и слой SiO_2 имели показатель преломления равный 1.441, слой Si имел показатель преломления равный 3.468.

Для длин волн в диапазоне от 600 до 800 нм слой GST в аморфном фазовом состоянии имел показатель преломления равный 3.8, коэффициент экстинкции 1.35, в кристаллическом фазовом состоянии показатель преломления был равен 3.9, коэффициент экстинкции 3.75, подложка и слой SiO_2 имели показатель преломления равный 1.457, слой Si имел показатель преломления равный 3.796, коэффициент экстинкции 0.013.

С помощью комплексного исследования методами атомно-силовой микроскопии, рамановской спектроскопии и лазерного сканирования с регистрацией сигналов пропускания и отражения с помощью ФЭУ были установлены значения энергетической экспозиции модулирующего излучения для перехода фазового состояния GST пленки из аморфного в кристаллическое состояние и наоборот, а также в промежуточные состояния с недокристаллизованной пленкой.

Данные переходы состояний пленки наблюдались в диапазоне значений энергетической экспозиции от 2.92 до 3.26 нДж/мкм². Вариации параметров модулирующего импульса были установлены в диапазонах амплитуды от 116.8 мВт/мкм² до 271.7 мВт/мкм² и длительности импульса от 12 до 25 нс.

Было установлено, что при значении энергетической экспозиции модулирующего излучения 2.92 нДж/мкм² пленка GST приобретает кристаллическое состояние, а при значении 3.26 нДж/мкм² аморфное. Также установлено, что при значениях энергетической экспозиции модулирующего излучения в диапазоне от 2.92 до 3.26 нДж/мкм² пленка GST приобретает промежуточные недокристаллические состояния.

Фазовое состояние GST пленки устанавливалось с помощью рамановской спектроскопии. Отражение и пропускание многослойной структуры для модулируемого излучения оценивалось с помощью амплитуды сигнала на ФЭУ и его нормировки. В итоге было установлено, что многослойная структура обладает отражательной способностью в относительных единицах в аморфном состоянии пленки на уровне 0.8, в кристаллическом на уровне 0.03, поглотительной способностью в аморфном состоянии на уровне 0.03, в кристаллическом состоянии на уровне 0.8, пропускательной способностью в аморфном и кристаллическом состояниях на уровне 0.17. Также было установлено, что при значениях

энергетической экспозиции модулирующего излучения в диапазоне от 2.92 до 3.26 нДж/мкм² многослойная структура приобретает отражательную способность в относительных единицах в диапазоне от 0.03 до 0.8, поглощательную способность от 0.8 до 0.03, пропускательную способность 0.17.

Таким образом, используя модельные расчеты в программной среде MathLAB, выполняя испытания и исследования на оборудовании зондовой нанолaborатории Ntegra Spectra™ совмещенной со спектрометром LS RamBo 620™, было разработано устройство для оптической модуляции на основе материала Ge₂Sb₂Te₅.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Tolkach N.M., Lazarenko P.I., Sherchenkov A.A., Vishnyakov N.V., Sudakova A.U., Nazimov D.R.* Optical switching in multilayer structures based on Ge₂Sb₂Te₅ // *Journal of Physics: Conference Series*. – Saint Petersburg, 2020. – P. 012075. – DOI 10.1088/1742-6596/1695/1/012075.
2. *Козодаев Д.А., Муратова Е.Н., Мошников В.А.* От нанотехнологии к наноархитектонике // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. – 2024. – № 1(79). – С. 350-352.
3. От нанотехнологии к наноархитектонике: сборник научных трудов. Выпуск 1 / редактор Д.А. Козодаев. – Уфа: ООО "Аэтерна", 2024. – 168 с.
4. От нанотехнологии к наноархитектонике / редактор Д.А. Козодаев. – Уфа: Аэтерна, 2025. – 126 с.
5. *Толкач Н.М., Казанков А.И., Козодаев Д.А., Кузнецов Е.В., Трусев М.А.* Современное зондово-оптическое промышленное и научное оборудование для исследований аморфных и микрокристаллических полупроводниковых материалов // *Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сборник трудов Международной конференции*, Санкт-Петербург, 2025. – С. 65-66.
6. *Steparuk A.S., Irgashev R.A., Zhilina E.F., Emets V.V., Grinberg V.A., Tekshina E.V., Belova E.V., Tolkach N.M., Lazarenko P.I., Rusinov G.L., Kozyukhin S.A.* Thieno[3,2-b]indole / 2,2'-bithiophene-based D-π-A dyes for dye sensitized solar cells // *Dyes and Pigments*. – 2024. – Vol. 222. – P. 111917. – DOI 10.1016/j.dyepig.2023.111917.
7. *Пимахина Е.В., Пимахин А.А., Вишняков Н.В., Толкач Н.М., Округ О.В., Пимахин А.А.* Методика мембранной фильтрации для поиска и определения размеров микрочастиц в медицинских растворах // *Биомедсистемы-2021: Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы - Сборник трудов XXXIV Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов*, Рязань, 2021. – С. 204-206.
8. *Pimakhina E.V., Pimakhin A.A., Vishnykov N.V., Tolkach N.M., Arsentiev S.B.* Raman spectroscopy and optical microscopy of medical infusion solutions for parenteral nutrition // *Journal of Physics: Conference Series: 8th International School and Conference "Saint Petersburg OPEN 2021": Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures*, SPbOPEN 2021, Saint Petersburg. – IOP Publishing Ltd: 2021. – P. 012161. – DOI 10.1088/1742-6596/2086/1/012161.
9. *Pimakhina E.V., Pimakhin A.A., Vishnykov N.V., Tolkach N.M., Arsentiev S.B.* Comparison of the effectiveness of blood transfusion and reinfusion // *Journal of Physics: Conference Series: 8th International School and Conference "Saint Petersburg OPEN 2021": Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures*, SPbOPEN 2021, Saint Petersburg. – IOP Publishing Ltd: 2021. – P. 012119. – DOI 10.1088/1742-6596/2086/1/012119.
10. *Пимахина Е.В., Толкач Н.М., Округ О.В., Близякова Р.Э.* Способ уменьшения возможности микроэмболии материальными частицами кристаллоидов при внутрисосудистом введении растворов // *Естественнонаучные основы медико-биологических знаний: Материалы всероссийской конференции студентов и молодых ученых с международным участием*. – Рязань: Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, 2017. – С. 342-344.
11. *Вишняков Н.В., Толкач Н.М., Провоторов П.С.* Оптимизация параметров тонкопленочной структуры на основе Ge₂Sb₂Te₅ для оптических переключателей // *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. – 2018. – № 66-2. – С.2-8. – DOI 10.21667/1995-4565-2018-66-4-2-2-8

12. Tolkach N., Vishnyakov N., Vorobyov Y., Avachev A., Rybina N. Optical computing device architecture based on $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ // 2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 - Including ECYPS 2017, Proceedings. – Bar, 2017. – P. 7977161. – DOI 10.1109/MECO.2017.7977161.
13. Глухенькая В.Б., Толкач Н.М., Лазаренко П.И., Шерченков А.А., Козюхин С.А. Формирование перестраиваемых энергонезависимых оптически контрастных изображений на поверхности тонких пленок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ для отражающих дисплейных технологий и создания голографических изображений // HOLOEXPO 2022: Тезисы докладов. XIX международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям, Барнаул. – 2022. – С. 181-185.
14. Вишняков Н.В., Вихров С.П., Толкач Н.М. Комплексная локальная диагностика тонкопленочной GST-структуры с фазовыми переходами // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, № 11(18). – С. 80-87. – DOI 10.18127/j00338486-201911(18)-11.
15. Tolkach N.M., Vishnyakov N.V., Litvinov V.G., Sherchenkov A.A., Trusov E.P., Glukhenkaya V.B., Pepelyaev D.V. Modeling of Multilayer Structures with Tunable Optical Characteristics // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2023. – Vol. 17, No. 6. – P. 1217-1224. – DOI 10.1134/s1027451023060204.
16. Толкач Н.М., Вишняков Н.В., Козодаев Д.А., Литвинов В.Г., Якубов А.О. Оптимизация спектральных зависимостей коэффициентов отражения и пропускания от степени кристалличности для многослойных структур на основе материалов системы Ge-Sb-Te // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сборник трудов Международной конференции, Санкт-Петербург, 2025. – С. 67-68.
17. Толкач Н.М. Патент на полезную модель № 201507 U1 РФ. Фотонный модулятор: № 2020126747: заявл. 11.08.2020: опубл. 18.12.2020.

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СИЛЫ КАРДИОРЕСПИРАТОРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТОДОМ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

И.С. Ферафонтова✉, А.Н. Храмков, В.И. Гриднев, А.С. Караваев, Ю.М. Ишбулатов
Саратовский национальный исследовательский государственный
университет им. Н.Г. Чернышевского
✉ ferafontovairina@mail.ru

Введение. Кардиореспираторное взаимодействие является фундаментальным механизмом в регуляции сердечно-сосудистой системы человека. Согласованность ритмов сердца и дыхания обеспечивает эффективную адаптацию организма к изменяющимся условиям, а их рассинхронизация может служить ранним маркером развития патологических процессов в сердечно-сосудистой системе [1,2]. В связи с этим количественные характеристики силы кардиореспираторного взаимодействия представляют значительный научный и практический интерес, однако, на современном уровне развития технологий, прямая оценка ряда показателей требует инвазивных процедур, поэтому перспективным направлением является развитие непрямых подходов.

Одним из таких подходов является реконструкция по реальным данным параметров математической модели, предложенной для рассматриваемой системы из физиологических соображений. В данном случае, параметры модели так же несут физиологический смысл и их оценки, сделанные в ходе реконструкции, отразят параметры реальной системы. В работе представлен подход к реконструкции параметров математической модели системы автономной регуляции кровообращения, учитывающей воздействие дыхательной системы, по экспериментальным сигналам фотоплетизмограммы и дыхания. В том числе реконструировался коэффициент связи между сигналом дыхания и моделью, имеющий физический смысл количественной характеристики силы кардиореспираторного взаимодействия.

Модель. Согласно [3] и [4] кардиореспираторное взаимодействие можно описать нелинейной моделью с запаздыванием:

$$\varepsilon \dot{x}(t) = -x(t) + \alpha \tan h(\beta x(t - \tau)) + kR(t), \quad (1)$$

где $R(t)$ — экспериментальный сигнал дыхания, ε — инерционность, τ — время запаздывания, α — размах функции, β — кривизна функции, k — коэффициент силы воздействия со стороны дыхания.

Экспериментальные данные. Реконструкция параметров модели (1) производилась независимо по 10 парам сигналов фотоплетизмограммы (ФПГ) и дыхания, зарегистрированным в ходе активного эксперимента, в котором добровольцы дышали с линейно-нарастающей частотой. Частота дыхания нарастала от 0.05 до 0.25 Гц за 25 минут, вейвлет-спектр сигнала дыхания демонстрируется на рис. 1. До и после активной фазы эксперимента доброволец дышал свободно. В эксперименте наблюдалась синхронизация между дыханием и низкочастотными колебаниями (LF, 0.04–0.15 Гц) в сигнале ФПГ, отражающими автоколебательную динамику системы автономной регуляции среднего артериального давления.

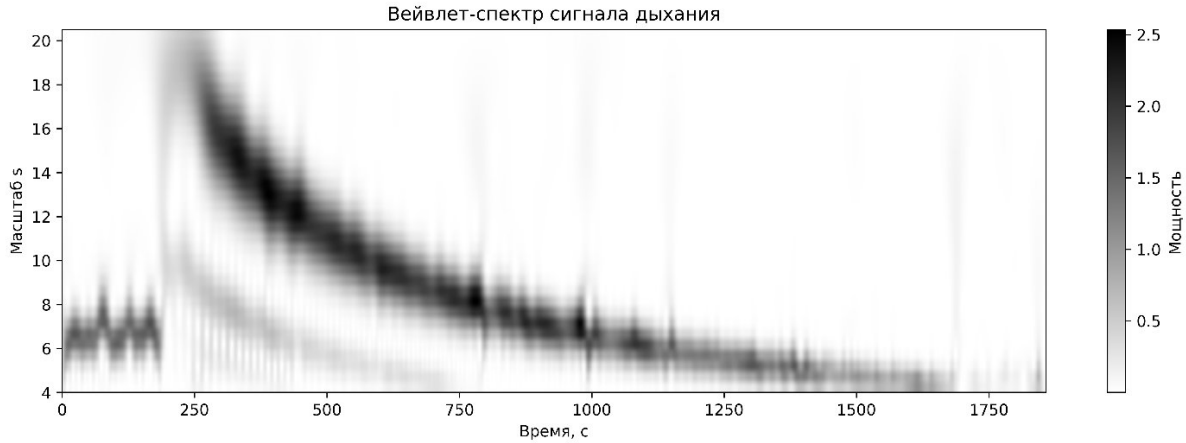


Рис. 1. Вейвлет-спектр характерного сигнала дыхания, записанного в ходе активного эксперимента.

Метод реконструкции коэффициентов модели по экспериментальным данным. Алгоритм реконструкции заключался в прямом переборе параметров τ , ε и k модели (1) с целью минимизировать расхождение двух областей фазовой синхронизации: области фазовой синхронизации между автоколебаниями модели (1) и дыханием $R(t)$, области синхронизации между LF ритмами ФПП и дыханием. Параметры τ и ε , определяющие частоту автоколебаний модели (1), выбирались в диапазонах, обеспечивающих устойчивые автоколебания в LF-диапазоне: $\tau \in [2.8, 10.8]$ с, $\varepsilon \in [0.5, 2.1]$.

Введение мгновенных фаз и диагностика синхронизации. Для оценки схожестей областей синхронизации между модельным сигналом $x(t)$ и дыхательным сигналом $R(t)$ использовался метод, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании (НВП) [5]. НВП позволяет определить мгновенные фазы сигналов на различных временных масштабах (аналогах частот). Для сигнала $f(t)$ коэффициенты НВП вычисляются как:

$$W_f(s, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{s, t_0}^*(t) dt, \quad (2)$$

где $\psi_{s, t_0}(t)$ – вейвлет-функция, полученная из материнского вейвлета Морле, s – временной масштаб, t_0 – временной сдвиг. Мгновенная фаза сигнала на масштабе s в момент t_0 извлекается как аргумент комплексного коэффициента

$$\varphi_f(s, t_0) = \arg [W_f(s, t_0)]. \quad (3)$$

Разность фаз между модельным и дыхательным сигналами определялась для масштабов, соответствующих LF-диапазону:

$$\Delta\varphi(s, t_0) = \varphi_x(s, t_0) - \varphi_R(s, t_0). \quad (4)$$

Для анализа динамики при изменяющейся частоте дыхания разность фаз отслеживалась вдоль кривой, соответствующей мгновенной частоте дыхательного сигнала

$$s_R(t) = \frac{1}{f_R(t)}, \quad (5)$$

что давало одномерную временную зависимость $\Delta\varphi(t)$.

Ключевым критерием фазовой синхронизации является линейное изменение разности фаз во времени, что соответствует захвату фазы автогенератора внешним воздействием и описывается уравнением Адлера [5]. Поэтому, для автоматического детектирования интервалов фазовой синхронизации временной ряд $\Delta\varphi(t)$ аппроксимировался линейной функцией вида

$$\varphi(t) = At + B. \quad (6)$$

Интервалом синхронизации признавался наиболее длительный участок разности фаз, для которого среднеквадратическая ошибка (MSE) линейной аппроксимации не превышала 0.6 рад^2 . Таким образом, бинарная маска синхронизации $M(t)$ для сигнала формировалась как:

$$M(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \in [t_i, t_j] \text{ и } MSE < 0.6 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

Количественная оценка степени соответствия областей синхронизации. Для оценки степени соответствия между областями синхронизации, полученными для экспериментальных и модельных данных, использовался коэффициент Жаккара (JI), вычисляемый как отношение мощности пересечения областей к мощности их объединения:

$$JI = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, \quad (8)$$

где $A = \{t: M_{\text{экс}}(t) = 1\}$, $B = \{t: M_{\text{мод}}(t) = 1\}$.

Значение $JI = 1$ соответствует полному совпадению областей синхронизации, $JI = 0$ — отсутствию пересечения областей, промежуточное значение говорило о частичном перекрытии.

Результаты реконструкции. В результате перебора были определены коэффициенты, приведенные в табл. 1, при использовании которых модель имеет самый высокий индекс синхронизации с экспериментальными данными.

Таблица 1. Коэффициенты, полученные в результате реконструкции модели (1) по экспериментальным данным.

Номер записи	τ , с	ε	k	JI
1	6.8	1.3	1.7	1.0
2	3.6	1.7	2.1	1.0
3	4.4	2.1	1.1	0.98
4	8.8	1.3	1.3	0.98
5	6.0	1.9	0.9	0.98
6	2.8	1.3	2.1	1.0
7	10.0	1.9	1.7	1.0
8	2.8	0.5	1.7	1.0
9	8.4	2.1	1.5	1.0
10	3.6	1.7	1.7	1.0
Среднее	5.72	1.58	1.58	0.99
Стандартное отклонение	2.67	0.49	0.39	0.01

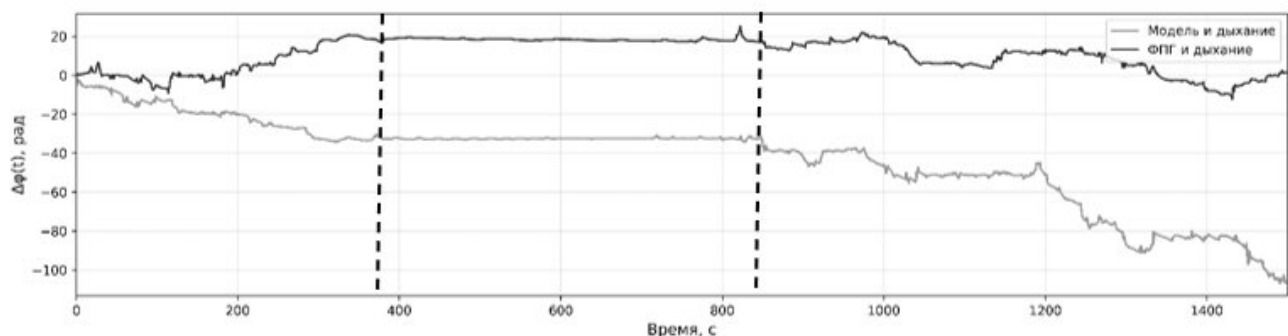


Рис. 2. На графике представлены две разности мгновенных фаз относительно экспериментального дыхания: типичная — для низкочастотных ритмов ФПГ (темная линия) и для автоколебаний модели контура регуляции давления (светлая линия). Область синхронизации ограничена вертикальным пунктиром.

Модели, построенные с использованием реконструированных параметров, показывают количественное совпадение областей фазовой синхронизации с экспериментальными данными, что наглядно демонстрируется на рис. 2.

Таким образом, в ходе исследования был разработан и апробирован метод количественной оценки силы кардиореспираторного взаимодействия на основе реконструкции параметров нелинейной модели с запаздыванием. Полученные результаты демонстрируют высокую степень соответствия между модельными и экспериментально выявленными областями фазовой синхронизации, что подтверждается значениями коэффициента Жаккара, близкими к единице (среднее значение 0.99). Реконструированный коэффициент связи k , интерпретируемый как сила воздействия дыхательного сигнала на контур автономной регуляции среднего артериального давления, показал стабильность в рамках анализа множества экспериментальных записей (среднее значение 1.58 ± 0.39). Предложенный подход позволяет перейти от качественного описания кардиореспираторной синхронизации к её количественной характеристике, что открывает новые возможности для диагностики и мониторинга функционального состояния сердечно-сосудистой системы. В перспективе данный метод может быть использован для выявления ранних признаков дезорганизации вегетативной регуляции при различных патологических состояниях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00241, <https://rscf.ru/project/23-12-00241/>).

ЛИТЕРАТУРА

1. Karavaev A.S., Prokhorov M.D., Ponomarenko V.I., Kiselev A.R., Gridnev V.I., Ruban E.I., Bezruchko B.P. Synchronization of low-frequency oscillations in the human cardiovascular system // *Chaos*. 2009. Vol. 19, No. 3. P. 033112.
2. Borovkova E.I., Ponomarenko V.I., Karavaev A.S., Dubinkina E.S., Prokhorov M.D. Method of Extracting the Instantaneous Phases and Frequencies of Respiration from the Signal of a Photoplethysmogram // *Mathematics*. 2023. Vol. 11, No. 24. P. 4903.
3. Ringwood J.V., Malpas S.C. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model // *American Journal of Physiology – Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*. 2001. Vol. 280. P. R1105–R1115.
4. Kotani K., Struzik Z.R., Takamasu K., Stanley H.E., Yamamoto Y. Model for complex heart rate dynamics in health and diseases // *Physical Review E – Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 2005. Vol. 72, No. 4, Pt. 1. P. 041904.
5. Короновский А.А., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Храмов А.Е. Диагностика синхронизации автоколебательных систем при изменении частоты внешнего воздействия с использованием вейвлетного анализа // *Радиотехника и электроника*. 2007. Т. 52, № 5. С. 1–11.

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ ПОРИСТЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ ОКСИДА НИКЕЛЯ С ВЫСОКОЙ УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЗЕЛЕНОГО СИНТЕЗА

К. Халугарова✉

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ»

им. В. И. Ульянова (Ленина)

✉ kamilya_kh@mail.ru

Введение. В настоящее время одним из ключевых направлений современного научно-технического прогресса является переход от экстенсивного к устойчивому развитию, при этом основной упор делается на максимальное сохранение природных ресурсов и здоровья человека [1-3]. В связи с этим активно развиваются экологически чистые методы производства наночастиц, соответствующие принципам «зеленой химии» и «зеленых технологий», задача которых – сделать химические продукты, а также сам производственный процесс безопасными и безотходными, с целью устранения вредных воздействий воздействовать на окружающую среду или свести ее к минимуму.

«Зеленый синтез», который относится к технологическому подходу «снизу вверх», при котором атомы металлов собираются в кластеры и, в конечном итоге, в наночастицы, аналогичен химическому восстановлению, при котором дорогостоящий химический восстановитель заменяется экстрактом природного происхождения для получения наночастиц металлов или их оксидов. Использование растительных экстрактов в зеленом синтезе для получения наночастиц металлов и их оксидов является наиболее распространенным благодаря их доступности и простоте, быстрому времени реакции в дополнение к их способности восстанавливать ионы металлов до металлических наночастиц и их способности производить наночастицы в больших масштабах [4, 5].

Пористые наночастицы оксидов металлов представляют собой класс наноматериалов, имеющих большое научное и технологическое значение [6, 7]. Таким образом, наночастицы оксида никеля могут быть использованы в катализе [8], при разработке сенсоров [9-11], аккумуляторов [12]. Увеличенная площадь поверхности позволяет добиться большей дисперсности катализатора, обеспечивая более эффективное использование каталитических материалов.

Одним из основных факторов, оказывающих первостепенное влияние, является выбор фитохимических веществ и, соответственно, тип самого растения. Также влияет выбор экстрагента при приготовлении экстракта. Выбор условий синтеза, таких как использование растительного экстракта, также влияет на величину удельной поверхности частиц оксида никеля.

В данной работе исследуются пористые наночастицы оксида никеля, полученные методом зеленого синтеза с использованием экстрактов *Fumaria officinalis* L. (*Дымянка лекарственная*) и *Origanum vulgare* L. (*Душица обыкновенная*) [13] в качестве источников биологических восстановителей, а также влияние выбора экстрагентов на основе изопропилового или этилового спирта для получения растительного экстракта.

Материалы и методы. Получение наночастиц NiO проводилось с применением растений *Fumaria officinalis* L. [14-16] и *Origanum vulgare* L., которые были отобраны для сравнительного анализа влияния выбора прекурсора на образование частиц. Экстракты из растительного сырья были получены методом ультразвуковой экстракции. В качестве экстрагента использовали раствор изопропилового или этилового спирта и воды в соотношении 1:1. При синтезе раствор, содержащий 15 ммоль NiSO₄, смешивали с растительным экстрактом с добавлением 2%-ного раствора NaOH. Полученную смесь

промывали и центрифугировали. Далее проводилась сушка при комнатной температуре. Для получения наночастиц оксида никеля проводили отжиг при температуре 300-500°C в течение 30 минут.

Определение морфологии и состава NiO было выполнено с использованием метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и метода рентгенофазового анализа (РФА). 4-точечный метод БЭТ был использован для изучения параметров полученной пористой структуры, таких как удельная площадь поверхности. Результаты исследования приведены в табл. 1.

Изображения морфологии наночастиц оксида никеля, синтезированных с экстрактами *Fumaria officinalis* L., полученных с использованием экстрагентов различного состава, показаны на рис. 1. Структура полученных образцов очень плотная. Использование раствора этилового спирта в качестве экстрагента привело к получению частиц пористой структуры с более плотной упаковкой наночастиц по сравнению с частицами, полученными с использованием раствора изопропилового спирта. Этот эффект может быть связан с различием в вязкости спиртов.

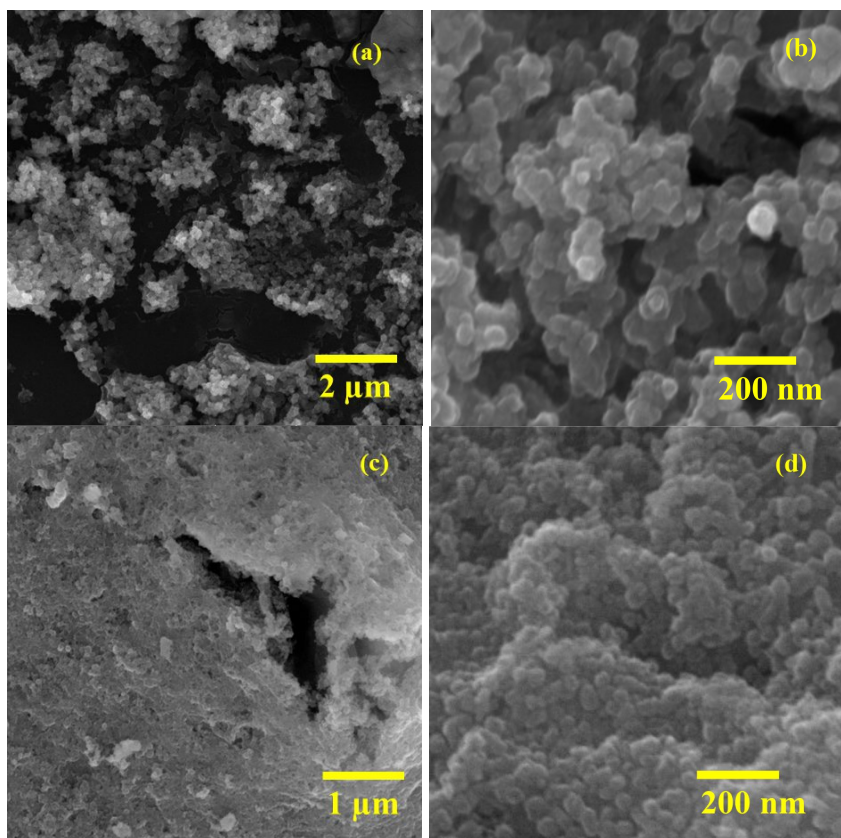


Рис. 1. СЭМ-изображения наночастиц оксида никеля, полученные с использованием экстракта *Fumaria officinalis* L. и различных экстрагентов: (a) и (b) раствора изопропилового спирта (образец 1), (c) и (d) раствора этилового спирта (образец 4).

Методом РФА получены дифракционные пики кристаллических плоскостей (111), (200), (220), (311), и (222), соответствующие гранецентрированной кубической (гцк) структуре NiO. Для образцов с использованием Дымянки лекарственной при температурах 400°C и 500°C получены фазы оксида никеля, в то время как при температуре 300°C получена аморфная фаза, которая указывает на неоформленную фазу оксида никеля и на которую, вероятно, влияют биологические компоненты, присутствующие в структуре, которые при такой температуре не отжигаются.

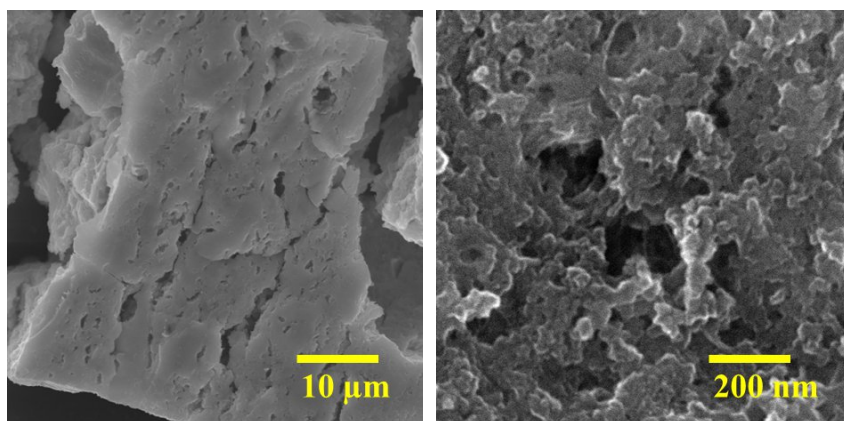


Рис. 2. СЭМ-изображения наночастиц оксида никеля, полученных из *Origanum vulgare L.* (экстрагента на основе изопропилового спирта, образец 5) в различных масштабах.

Также с применением уравнения Дебая-Шеррера были рассчитаны размеры кристаллитов полученных образцов: частицы с наибольшим размером синтезированы с использованием экстракта Дымянки лекарственной на изопропиловом спирте. Использование этилового спирта при производстве растительного экстракта позволило уменьшить размер частиц. Такому же уменьшению размера наночастиц способствует использование экстракта Душицы обыкновенной в качестве реагента. Результаты исследования также приведены в табл. 1.

Таблица 1. Номиналы радиотехнических элементов.

Образец	Условия синтеза			Удельная площадь поверхности, м ² /г	Размер кристаллитов по методу Дебая-Шеррера, нм
	Растение	Экстрагент	Температура отжига		
Образец 1	<i>Fumaria officinalis L.</i>	Изопропиловый спирт:вода	500°C	130,7±6,7	7,5 – 13,9
Образец 2	<i>Fumaria officinalis L.</i>	Изопропиловый спирт:вода	400°C	47,2±2,7	5,5 – 8,0
Образец 3	<i>Fumaria officinalis L.</i>	Изопропиловый спирт:вода	300°C	9,0±0,3	–
Образец 4	<i>Fumaria officinalis L.</i>	Этиловый спирт:вода	500°C	40,2 ± 0,8	5,6 – 8,3
Образец 5	<i>Origanum vulgare L.</i>	Изопропиловый спирт:вода	500°C	75,3 ± 1,0	5,6 – 7,6

Согласно полученным данным (табл. 1), можно видеть, что образец 1 имеет наибольшую площадь поверхности $SSA = 130,0 \text{ м}^2/\text{г}$, полученный с использованием экстракта *Fumaria officinalis L.* на изопропиловом спирте. Значение удельной площади поверхности для образца, полученного с использованием экстракта *Fumaria officinalis L.* с этиловым спиртом, значительно ниже и составило $40,2 \text{ м}^2/\text{г}$, что коррелирует с более компактной структурой и меньшим количеством видимых пор на рис. 1. Для образца NiO, полученного с использованием *Origanum vulgare L.*, удельная площадь поверхности составила площадь поверхности составила $75,3 \text{ м}^2/\text{г}$, что также согласуется с СЭМ-изображением на рис. 2.

Результаты исследований морфологии частиц в различных масштабах и с использованием различных технологических процессов, а также данные о мезо- и макропорах с использованием капиллярной конденсации и данные БЭТ об удельной площади поверхности

позволяют предположить механизм сборки «снизу вверх» с агрегацией по типу фрактала Жюльена. Такой тип сборки частиц приводит к образованию иерархической пористой структуры с развитой морфологией. Восстановители растительного происхождения играют ключевую роль в этом процессе, не только обеспечивая восстановление металлического никеля, но и выступая в качестве своеобразного каркасного элемента, который предотвращает слипание частиц во время отжига и сохраняет пористую структуру, что приводит к высокой удельной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Palit S., Hussain C. M.* Green nanomaterials: a sustainable perspective // *Green nanomaterials: processing, properties, and applications*. 2020. P. 23-41.
2. *Khan S. H.* Green nanotechnology for the environment and sustainable development // *Green materials for wastewater treatment*. – Cham : Springer International Publishing, 2019. P. 13-46.
3. *Халугарова К., Спивак Ю.М., Мошников В.А., Комолов А.С.* Зеленый синтез для получения наночастиц металлов и их оксидов // *Нано-и микросистемная техника*. 2025. Т. 27, № 1. С. 24-36.
4. *Jadoun S., Arif R., Jangid N. K., Meena R. K.* Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: A review // *Environmental Chemistry Letters*. 2021. V. 19, №. 1. P. 355-374.
5. *Pirsaheb M. et al.* Green synthesis of nanomaterials by using plant extracts as reducing and capping agents // *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. V. 31, №. 17. P. 24768-24787.
6. *Negrescu A. M. et al.* Metal oxide nanoparticles: review of synthesis, characterization and biological effects // *Journal of Functional Biomaterials*. 2022. V. 13, №. 4. P. 274.
7. *Shubhashish S. et al.* Synthesis of highly porous metal oxide nanoparticles for adsorption applications // *ACS Applied Nano Materials*. 2022. T. 5, №. 5. P. 7078-7091.
8. *Wu Z. et al.* Amorphous nickel oxides supported on carbon nanosheets as high-performance catalysts for electrochemical synthesis of hydrogen peroxide // *Acs Catalysis*. 2022. V. 12, №. 10. P. 5911-5920.
9. *Kaur N.* Nickel Oxide Nanostructures for Gas Sensing: Recent Advances, Challenges, and Future Perspectives // *ACS sensors*. 2025. V. 10, №. 3. P. 1641-1674.
10. *Bobkov A. et al.* Impedance spectroscopy of hierarchical porous nanomaterials based on por-Si, por-Si incorporated by Ni and metal oxides for gas sensors // *Sensors*. 2022. V. 22, №. 4. P. 1530.
11. *Soboleva E. et al.* Properties of porous silicon precipitated with nickel for gas sensors // *Sensor Letters*. 2018. V. 16, №. 9. P. 672-676.
12. *Song R. et al.* Self-standing three-dimensional porous NiO/Ni anode materials for high-areal capacity lithium storage // *Materials & Design*. 2022. V. 215. P. 110448.
13. *K. Khalugarova, A. A. Dombrovskaya and J. M. Spivak.* Influence of Technological Conditions on the Parameters of Porous Nickel Oxide Nanoparticles Obtained by the Green Synthesis Method // *2025 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*, Changchun, China, 2025, P. 305-309.
14. *Халугарова К., Спивак Ю. М., Мошников В. А.* Особенности формирования иерархических пористых наночастиц оксида никеля методом зеленого синтеза // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2024. Т. 27, №. 6. С. 55-67.
15. Патент № 2836558 С1 Российская Федерация СПК C01G 53/04, B01J 23/755. Способ получения оксида никеля : заявл. 21.05.2024 : опубл. 18.03.2025 / К. Халугарова, Ю. М. Спивак, В. А. Мошников; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)".
16. *K. Khalugarova, V. M. Kondratev, A. Kuznetsov and A. Y. Gagarina.* Investigation of Particles Obtained by Green Synthesis Using Plant Extract // *2023 Seminar on Microelectronics, Dielectrics and Plasmas (MDP)*, Saint Petersburg, Russian Federation. 2023. P. 60-62.

СПЕЦИФИКА ПЕДАГОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ ОБЩЕПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ДИСЦИПЛИН ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

А.А. Шарапова✉

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет

✉ sharapova_aa@bk.ru

В условиях быстрого развития технологий и требований современного рынка труда возникает необходимость организации качественного профессионального образования. Модернизация системы отечественного высшего образования предполагает перестраивание образовательного процесса, что непосредственно связано с дидактической и методической теорией – реализацией соответствующих приёмов, форм и методов обучения, педагогических технологий. Исследователями отмечается недостаточное внимание «к анализу связей целей обучения учебной дисциплины с педагогическими целями содействия самоопределению личности в целостном образовательном процессе; к использованию образовательных технологий без учёта специфики их применения» [1], в связи с чем определяется актуальность данного направления.

Обратимся подробнее к общепрофессиональным дисциплинам, являющимися базой профессиональной подготовки будущих специалистов, овладение которыми позволит успешно изучить последующие специализированные отрасли. Цикл общепрофессиональных дисциплин в вузе предполагает «установление логических связей между фундаментальными знаниями классических наук и специальными инженерными знаниями; формирование системы знаний, умений и навыков, общих как для инженеров любых специальностей, так и для инженеров той или иной группы специальностей (области инженерии)» [2, с. 16]. Дидактические принципы общепрофессиональных дисциплин должны строиться на положении фундаментальности знаний [3, с. 119]. Организовать эффективный и качественный образовательный процесс позволит совокупность разнообразных образовательных форматов. Необходимость использования современных и интерактивных форм и методов обучения общепрофессиональным дисциплинам отмечается как педагогами-исследователями, так и самими студентами [4, с. 131].

Остановимся на рассмотрении различных педагогических технологий сквозь призму инженерного образования. Под педагогической технологией, вслед за Г.К. Селевко, будем понимать «систему функционирования всех компонентов педагогического процесса, построенную на научной основе, запрограммированную во времени и в пространстве и приводящую к намеченным результатам» [5, с. 37].

Возьмём за основу компоненты инженерной деятельности [6] для анализа педагогических технологий применительно к образовательному процессу общепрофессиональных дисциплин технического вуза (таблица 1):

1. *Аксиологический компонент* связан с ценностно-целевыми ориентирами инженерной деятельности, т.е. направленность педагогической технологии на формирование и развитие компетенций постановки и достижения целей в профессиональной среде, определения и реализации ценностных основ собственной деятельности. К числу таких ориентиров можно отнести профессиональную добросовестность; этическую, социальную и экологическую ответственность; объективность в работе; техническое совершенство и другие [7; 8].

Решением указанных аспектов занимается инженерная аксиология, ключевым вопросом которой является то, «как ценностная система инженера и социальной среды формируются и влияют на инженерную деятельность?» [9, с. 19]. В контексте применения данного компонента при выборе той или иной педагогической технологии отметим, что

«использование инженерной аксиологии как составляющей образовательного процесса предполагает включение трех ключевых моментов: мотивировать, информировать, дать возможность попробовать» [10, с. 13].

Мы уделяем особое внимание аксиологическому компоненту, так как ценностные основы любой деятельности являются ведущим направлением современной образовательной политики, в том числе в условиях реализации Указа Президента Российской Федерации от 09.11.2022 № 809 «Об утверждении Основ государственной политики по сохранению и укреплению традиционных российских духовно-нравственных ценностей».

2. *Когнитивный компонент* определяет развитие инженерного мышления будущего специалиста, т.е. направленность педагогической технологии на поддержание становления «уровня работы с фактами, техники и технологии мышления, научной картины мира, а также ценностно-целевой структуры мышления» [11, с. 36].

3. *Деятельностный компонент* предполагает совершенствование инженерной деятельности, т.е. направленность педагогической технологии на развитие инновационного потенциала обучающегося и его технического творчества, получение образовательных и продуктивных результатов (участие в конкурсах, конференциях и т.п.), реализация стартапа как диплома.

Таблица 1. Характеристика педагогических технологий в образовательном процессе общепрофессиональных дисциплин.

Название технологии	Признаки реализации компонента			Основные трудности реализации технологии
	<i>Аксиологический компонент</i>	<i>Когнитивный компонент</i>	<i>Деятельностный компонент</i>	
Информационно-коммуникационные технологии (ИКТ)	признание технических средств как образовательных инструментов	демонстрация технического творчества	достижение двухсторонней связи (обмена информацией) между преподавателем и студентом	Недостаточность материально-технического обеспечения вуза
Рефлексивное обучение	целеустремленность к познанию себя в образовательном процессе	самоактуализация смысловой сферы	развитие рефлексивного потенциала личности	Недостаточность разработанных рефлексивных практик
Проблемное обучение	любопытство к поиску и постановке проблемной ситуации	самостоятельность в постановке проблемной ситуации	готовность результатов поисково-исследовательской деятельности	Сложность в формулировке учебных проблемных ситуаций
Проектное обучение	готовность паспорта проекта	проектирование результатов с элементами новизны	- стремление к получению заранее запланированного результата; - формирование «артефактов» проекта	Длительность реализации проекта
Игровая технология	следование обучающей цели	принятие оптимальных	проявление воли и	Ресурсозатратность в разработке

	игры; • формирование командного духа	решений в ходе игры	саморегуляции в игровом процессе	учебной игры; Недостаточность материально-технического обеспечения вуза
Тьюторство	• создание индивидуального образовательного маршрута изучения дисциплины; • прогнозирование деятельности и её возможных последствий	• самоорганизация и контроль индивидуальной образовательной деятельности	• личностное и профессиональное самоопределение	Организационные сложности, связанные со специалистами-тьюторами по сопровождению студентов

Указанные в таблице характеристики позволят преподавателю выбирать и адаптировать педагогические технологии, подходящие для конкретной дисциплины и темы, что решает проблему использования таких технологий с учётом специфики их применения.

Рассмотрим механизм применения педагогических технологий на примере общепрофессиональной дисциплины «Соппротивление материалов» посредством трёх этапов:

1. *Подготовительный.* Диагностика и прогнозирование проектируемой деятельности, педагогический анализ учебной группы (успеваемость, специфика учебного плана), сбор информации об образовательных потребностях студентов, целеполагание, планирование.

Исходя из описанных выше компонентов инженерной деятельности, первое – ценностно-целевые ориентиры, т.е. цели данной дисциплины, ключевыми словами которых для студентов механических направлений и специальностей являются понятия общенаучные (навыки инженерного подхода; решение комплексных задач) и частнонаучные (сведения о прочности, жесткости и устойчивости; проектирование и методы расчета машин и конструкций; выбор конструкционных материалов и расчетных схем). Результатом изучения дисциплины будет формирование общепрофессиональной компетенции «Использует основные законы дисциплин инженерно-технического модуля, правила построения технических схем и чертежей». На данном этапе важно определить личностный смысл изучения дисциплины для каждого студента и направить этот процесс в получение качественного результата. Возможно использование опросных методов и наблюдения, а также методики постановки SMART-целей, схем проектирования индивидуальных образовательных маршрутов (на всю учебную группу) и т.д.

Когда поставлены цели и обозначены ключевые ценностные ориентиры, необходимо обозначить инструментарий развития инженерного мышления будущего специалиста. Содержание любой дисциплины предполагает теоретический и практический блоки изучения учебного материала. Так, основываясь на информации, важной для полноценного освоения дисциплины, определяются те педагогические технологии, которые соответствуют поставленным целям и результатам обучения. В рамках лекций особо актуальными будут проблемное, проектное и рефлексивное обучение, для практических занятий – игровая технология, ИКТ.

2. *Организационно-деятельностный.* Разработка методических материалов и реализация запланированных мероприятий в логике выбранных педагогических технологий. Предполагается совершенствование инженерной деятельности в рамках конкретной

технологии. Например, посредством проектного обучения студенты должны стремиться к развитию собственного технического творчества, результатом которого будет формирование инновационного потенциала и получение продуктового результата проекта (моделирование элементов конструкций и условий нагружения, создание специализированных ИКТ и т.п.); в условиях тьюторства – стремление к личностному и профессиональному самоопределению средствами дисциплины (например, при самостоятельной работе – мониторинг профессиональных интересов через «рефлексивный дневник», где студенты отражают свои ощущения, сильные стороны и интересы сквозь призму научной отрасли) и т.п. Здесь актуально применение методов наблюдения, организации опытно-экспериментальной работы.

3. *Аналитико-рефлексивный*. На данном этапе происходит оценка освоения студентами ключевых понятий науки «Сопротивление материалов» (прочность, жесткость, устойчивость, деформация, метод сечений и др.), анализ применяемых технологий и методов обучения, выявление трудностей студентов в образовательном процессе. Сравнение достигнутых результатов с поставленными целями, анализ итогов по практическим и лабораторным работам, промежуточной аттестации. Организация различных видов рефлексии (саморефлексии, групповой рефлексии, рефлексии с преподавателем). Возможно использование опросных методов, психологического и педагогического тестирования, анализа продуктов деятельности.

Эффективность механизма применения педагогических технологий в образовательном процессе общепрофессиональных дисциплин технического вуза можно оценивать в соответствии с признаками, рассмотренными в таблице 1. К примеру, если выбрана технология проблемного обучения и в ходе её реализации студенты демонстрируют:

- любопытство к поиску и постановке проблемной ситуации;
- самостоятельность в постановке проблемной ситуации;
- готовность результатов поисково-исследовательской деятельности,

то это обеспечит положительный эффект в получении образовательных результатов по дисциплине.

Говоря о внедрении различных педагогических технологий в образовательный процесс общепрофессиональных дисциплин технического вуза, стоит, в первую очередь, обратить внимание на целесообразность и системность вводимых действий, результаты и последствия. Среди преимуществ использования педагогических технологий выделяется разнообразие форматов обучения, направленность на получение запланированных результатов, практико-ориентированность образовательного процесса. К слабым сторонам можно отнести необходимость психолого-педагогической подготовки профессорско-преподавательского состава, ресурсозатратность адаптации технологий под технические дисциплины, потребность в достаточном материально-техническом обеспечении вуза.

Таким образом, в работе обозначена значимая роль педагогических технологий в образовательном процессе общепрофессиональных дисциплин технического вуза. Определены компоненты, описывающие инженерную деятельность и педагогические технологии по формированию соответствующих результатов. Описан механизм применения педагогических технологий на примере дисциплины «Сопротивление материалов». Полученные результаты могут использоваться при адаптации и проектировании педагогических технологий образовательного процесса общепрофессионального цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поддержка ученика в образовании / Н.Д. Андреева, С.В. Аранова, Н.Н. Лазукова [и др.]. Книга 1. Санкт-Петербург : Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, 2020. 112 с.

2. Семин Ю.Н. Теория и технология интеграции содержания общепрофессиональной подготовки в техническом вузе : автореф. дисс. ... д-ра пед. наук. Ижевск, 2001. 41 с.
3. Селевко Г.К. Энциклопедия образовательных технологий. В 2-х т. Т. 1. Москва : Народное образование, 2005. 556 с.
4. Синкина Е.А. Роль общепрофессиональных дисциплин в формировании профессиональной компетентности студентов технических вузов // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение. 2011. Т. 13, № 2. С. 116-119.
5. Фуртова Е.Н. Изучение состояния проблемы проектирования содержания общепрофессиональных дисциплин в технических вузах // Вестник Майкопского государственного технологического университета. 2022. Т. 14, № 3. С. 126-133.
6. Шаранов А.В., Червова А.А. Теоретические основы формирования инженерной компетентности курсантов военных инженерных вузов // Школа будущего. 2013. № 6. С. 99-102.
7. Ценностные кластеры будущих инженеров: анализ ценностных ориентаций и профессиональных приоритетов / Ж.Б. Есмурзаева, И.В. Куламихина, И.Н. Чурилова, О.А. Жбиковская // Педагогическое образование в России. 2025. № 2. С. 184-197.
8. Чешев В.В. Инженерное мышление в антропологическом контексте // Философия науки и техники. 2016. Т. 21, № 1. С. 104-117.
9. Инженерная аксиология. Глоссарий и комментарии : в помощь работникам образовательных организаций / С.А. Писарева, Е.В. Ланина, Т.А. Кузькова [и др.]. Выпуск 1. Санкт-Петербург : Частное образовательное учреждение дополнительного образования «Лингвистический Центр "Тайкун"», 2014. 124 с.
10. Козлова А.Г. Инженерная аксиология как составляющая образовательного процесса // Среднее профессиональное образование. 2016. № 9. С. 12-14.
11. Андрюхина Л.М., Гузанов Б.Н., Анахов С.В. Инженерное мышление: векторы развития в контексте трансформации научной картины мира // Образование и наука. 2023. Т. 25, № 8. С. 12-48.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ФОРМЕ МОДЕЛИ КОШИ

Н.А. Шуманова¹ ✉, А.М. Сиотанов^{1,2}, Б.С. Тёрушкин¹

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²АО «Лаборатория противодействия промышленному шпионажу»

✉ shumanova.na@mail.ru

Введение. Работа современных систем автоматики и электропривода притягивает инженеров, как совершенный механизм часов, разобрав который, можно достичь предельной точности, энергоэффективности и интеллектуальности управления. Ключом к этому пониманию служит математическая модель — отражение физических законов, управляющих двигателем. На настоящий момент существует фундаментальный аппарат, описывающий электромеханические связи, токи, моменты и скорости [1,2]. Наиболее важным этапом является построение математической модели, который требует соблюдения достаточной точности модели и минимальную вычислительную сложность.

Модель. В данной работе модель двигателя постоянного тока представляет собой следующие схемы: эквивалентная схема якоря и принципиальная схема ДПТ (рис. 1),

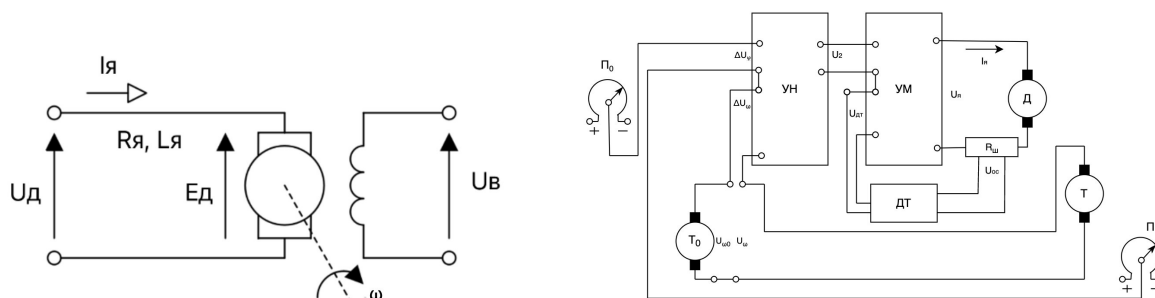


Рис. 1. Эквивалентная схема цепи якоря и принципиальная схема ДПТ.

где Д – двигатель постоянного тока; УН – усилитель напряжения; УМ – усилитель мощности; $R_{ш}$ – резистор для контроля тока двигателя; ДТ – датчик тока якоря двигателя; Т и T_0 – тахогенераторные датчики угловых скоростей, П и Π_0 – потенциометрические датчики угловых перемещений

Элементы и устройства, входящие в двигатель постоянного тока, описываются следующими уравнениями [3, 4].

- электрическая цепь двигателя, описывается вторым законом Кирхгофа (контур сонаправлен с током I_a)

$$L_{я} \frac{dI_{я}}{dt} + R_{я} I_{я} + E_{д} = U_{д}, \quad (1.1)$$

где $L_{я}$, $R_{я}$ – индуктивность якоря и активное сопротивление обмотки якоря, Гн и Ом;

- механическая часть двигателя, описывается уравнением равновесия моментов:

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_c = M_{д}, \quad (1.2)$$

где J – суммарный момент инерции ротора двигателя и приведенного к его валу общего момента инерции рабочего механизма, кг*м², M_c – момент сопротивления на валу двигателя, который является возмущающим воздействием, $M_{д}$ – вращающий момент;

- угловая скорость:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (1.3)$$

где φ – угол поворота якоря двигателя;

- усилитель мощности:

$$U_{\text{я}} = k_{\text{ум}} U_3, \quad (1.4)$$

где $k_{\text{ум}}$ – коэффициент усиления:

- отрицательная обратная связь по току:

$$U_3 = U_2 - U_{\text{дт}}; \quad (1.5)$$

- датчик тока:

$$U_{\text{дт}} = k_{\text{дт}} R_{\text{ш}} I_{\text{я}}, \quad (1.6)$$

где $k_{\text{дт}}$ – коэффициент передачи датчика тока; $R_{\text{ш}}$ – сопротивление резистора, Ом

- усилитель напряжения;

$$U_2 = k_1 U_1, \quad (1.7)$$

где k_1 – коэффициент усиления;

- операция сложения сигналов рассогласования ΔU_{φ} и ΔU_{ω} :

$$U_1 = \Delta U_{\varphi} + \Delta U_{\omega}; \quad (1.8)$$

- операции сравнения электрических сигналов потенциометрических и тахогенераторных датчиков соответственно:

$$\Delta U_{\varphi} = U_{\varphi 0} - U_{\varphi} \text{ и } \Delta U_{\omega} = U_{\omega 0} - U_{\omega}; \quad (1.9)$$

- потенциометрические датчики П и По угловых перемещений соответственно:

$$U_{\varphi} = k_{\text{п}} \varphi \text{ и } U_{\varphi 0} = k_{\text{п}} \varphi_0, \quad (1.10)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент передачи датчиков, В/рад;

- тахогенераторные датчики Т и Т0 угловых скоростей ω и ω_0 соответственно:

$$U_{\omega} = k_{\text{т}} \omega \text{ и } U_{\omega 0} = k_{\text{т}} \omega_0, \quad (1.11)$$

где $k_{\text{т}}$ – коэффициент передачи датчиков, В * с/рад.

Последовательной подстановкой уравнения (1.4) - (1.11) сведем к одному уравнению следующего вида:

$$U_{\text{я}} = k_{\text{ум}} k_1 [k_{\text{п}} (\varphi_0 - \varphi) + k_{\text{п}} (\varphi_0 - \varphi)] - k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} R_{\text{ш}} I_{\text{я}}. \quad (1.12)$$

Подставляем полученное выражение (1.12).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + E_{\text{д}} = U_{\text{д}} \\ J \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{с}} = M_{\text{д}} \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega \\ U_{\text{я}} = k_{\text{ум}} k_1 [k_{\text{п}} (\varphi_0 - \varphi) + k_{\text{п}} (\varphi_0 - \varphi)] - k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} R_{\text{ш}} I_{\text{я}} \end{array} \right. \quad (1.13)$$

Получаем систему уравнений, описывающие двигатель постоянного тока (1.13).

Модель в форме Коши. Подставляя в уравнения (1.1) – (1.2) выражение (1.12), $E_{\text{д}} = k_e \omega$, $M_{\text{д}} = k_m I_{\text{я}}$ и $M_{\text{с}} = r\omega$, получим:

$$L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} I_{\text{я}} + k_e \omega = k_{\text{ум}} k_1 [k_{\text{п}} (\varphi_0 - \varphi) + k_{\text{п}} (\varphi_0 - \varphi)] - k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} R_{\text{ш}} I_{\text{я}}; \quad (2.1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + r\omega = k_m I_{\text{я}}. \quad (2.2)$$

После преобразования (2.1) и (2.2) с учетом (1.3), система дифференциальных уравнений примет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = - \left(\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} + k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} \frac{R_{\text{ш}}}{L_{\text{я}}} \right) I_{\text{я}} - \left(\frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} + \frac{k_e}{L_{\text{я}}} \right) \omega - \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} \varphi \\ & + \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} \omega_0 + \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} \varphi_0 ; \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m}{J} I_{\text{я}} - \frac{r}{J} \omega; \quad (2.4)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega. \quad (2.5)$$

Систему из трех уравнений (2.3), (2.4) и (2.5) запишем в векторно-матричной форме:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{\text{я}} \\ \omega \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - \left(\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} + k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} \frac{R_{\text{ш}}}{L_{\text{я}}} \right) & - \left(\frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} + \frac{k_e}{L_{\text{я}}} \right) & - \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} \\ \frac{k_m}{J} & - \frac{r}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{я}} \\ \omega \\ \varphi \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} & \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \varphi_0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Введем обозначения координат вектора состояний системы как $I_{\text{я}} = x_1$; $\omega = x_2$; $\varphi = x_3$, а также обозначим:

$$\begin{aligned} - \frac{R_{\text{я}} + k_{\text{ум}} k_{\text{дт}} R_{\text{ш}}}{L_{\text{я}}} &= a_{11}, \quad - \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{т}} + k_e}{L_{\text{я}}} = a_{12}, \quad - \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{п}}}{L_{\text{я}}} = a_{13} = -b_{12}, \\ - \frac{k_m}{J} &= a_{21}, \quad - \frac{r}{J} = a_{22}, \quad \frac{k_{\text{ум}} k_1 k_{\text{т}}}{L_{\text{я}}} = b_{11}, \quad \omega_0 = u_1, \quad \varphi_0 = u_2. \end{aligned}$$

В результате получим уравнение системы в векторной форме:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (2.7)$$

где x – вектор состояния системы, u – входной вектор, причем

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{\text{я}} \\ \omega \\ \varphi \end{bmatrix}, \quad x \in R^3, \quad u = \begin{bmatrix} \omega_0 \\ \varphi_0 \end{bmatrix}, \quad u \in R^2.$$

Параметрическая матрица системы A и входная матрица B имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Анализ устойчивости модели. При вводе следующих параметров матрица A имеет собственные числа $\lambda_1 \approx -320$, $\lambda_{2,3} \approx -1 \pm 7,62i$, что подтверждает асимптотическую устойчивость системы [5].

$$\begin{aligned} k_{\text{п}} &= 0,26 \text{ В/рад}; \quad k_{\text{т}} = 1 \text{ В}^* \text{ с/рад}; \quad R_{\text{ш}} = 0,1 \text{ Ом}; \quad k_{\text{дт}} = 15; \quad k_1 = 5; \quad k_{\text{ум}} = 26; \\ k_e &= 2 \text{ В}^* \text{ с/рад}; \quad k_m = 2 \text{ Н}^* \text{ м/А}; \quad L_{\text{я}} = 0,13 \text{ Гн}; \quad R_{\text{я}} = 2,6 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$J = 0,115 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; r = 0,23 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$$

Результаты. Основным результатом является математическая модель ДПТ, представленная в форме Коши. На основе законов Кирхгофа и механики получена система уравнений. Ключевым этапом стало её алгебраическое преобразование к форме Коши и доказательство устойчивости полученной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Усольцев А.А.* Общая электротехника: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 301 с.
2. *Битюцкий, И. Б.* Электрические машины. Двигатель постоянного тока. Курсовое проектирование : учебное пособие — Санкт-Петербург : Лань, 2018. — 168 с.
3. *Проскуряков В.С., Соболев С.В.* Электротехника. Электрические машины постоянного тока. Учебное пособие. – Екатеринбург: Издательство ГОУ-ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – 41 с.
4. *Карташов Б.А.* Среда динамического моделирования технических систем: практикум по моделированию систем. – Москва: ДМК Пресс, 2017. – 424 с.
5. *Козлов В.Н., Куприянов В.Е., Шашихин В.Н.* Управление энергетическими системами. Часть 1: Теория автоматического управления: Учеб. Пособие / Под ред. В.Н. Козлова. СПб.: Изд-во Политехи, ун-та, 2008. - 316с.

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА ДЛЯ ДВУХ МЕТОДОВ И РАЗЛИЧНОГО ЧИСЛА СЛОЁВ

А.Е. Яковлева ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

✉ YakovlevaAnna07@mail.ru

Введение. В работах [2,3] предложены методы решения дифференциальных уравнений, основанные на аналитической модификации классических численных схем [1]. Суть состоит в замене фиксированного интервала на интервал с переменным верхним пределом. В данной работе исследуются два метода (обобщённый метод трапеций и метод регулировки разбиения интервалов). Первый состоит в замене рекуррентной формулы классического метода трапеций $y_{k+1} = y_k + \frac{h_k}{2}(f(x_k, y_k) + f(x_{k+1}, y_{k+1}))$ на формулу $y_{k+1} = y_k + h_k(u f(x_k, y_k) + (1-u)f(x_{k+1}, y_{k+1}))$ при равномерном разбиении промежутка с шагом $h_k(x) = (x - x_0) / n$. Метод регулируемого разбиения интервала получается, если $h_{k+1}(x) = u h_k(x)$. Для модельного уравнения выводятся формулы для приближённого решения. Путём минимизации целевых функционалов, связанных с точностью, определяется оптимальный параметр для каждого метода в зависимости от числа слоёв (шагов сетки).

Модель. В данной работе мы рассматриваем два метода.

Решается задача оптимизации обобщённого метода трапеций для некоторого дифференциального уравнения. Метод зависит от весового коэффициента u . Цель — найти такое значение u , которое минимизирует ошибку приближённого решения по отношению к точному решению исходного дифференциального уравнения. Эти выражения y_n являются функциями: независимой переменной x , параметра исходного ДУ α , оптимизируемого весового параметра метода u .

$$\text{Для } n = 1 \quad y_1(x, \alpha, u) = -\frac{x\alpha}{-\alpha + x^2(-1+u)^2(-1+\alpha^2) + x(-1+u)(1+\alpha^2)}$$

$$\text{Для } n = 2 \quad y_2(x, \alpha, u) = -\frac{4x\alpha(-4\alpha + x^2(-1+u)u(-1+\alpha^2) + x(-1+2u)(1+\alpha^2))}{(-4\alpha + x^2(-1+u)^2(-1+\alpha^2) + 2x(-1+u)(1+\alpha^2))^2}$$

Аналогичные более сложные и громоздкие выражения получены для $n = 3, 4, 5$.

На основе этих решений строился функционал невязки $d(u)$, который служит мерой ошибки удовлетворения исходному дифференциальному уравнению на множестве тестовых точек. Этот функционал вычисляется как корень из среднеквадратичного отклонения левой

части уравнения от нуля: $d(u) = \sqrt{\frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} \left[\frac{z_n'' + A(\alpha_i)z_n' + B(\alpha_i)z_n}{z_n(1, \alpha_i, u)} \right]^2}$ для набора случайных точек в области: $x \in [0, 1]$ $\alpha \in [0.01, 0.1]$.

$$\begin{array}{cc} \text{Также} & \text{находились} \\ \sqrt{\frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} \left[\frac{z_n'' + A(0.01)z_n' + B(0.01)z_n}{z_n(1, 0.01, u)} \right]^2} & \text{минимумы} \\ \text{и } d_{\max}(u) = \sqrt{\frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} \left[\frac{z_n'' + A(0.1)z_n' + B(0.1)z_n}{z_n(1, 0.1, u)} \right]^2} & \text{функционалов } d_{\min}(u) = \end{array}$$

Использование случайных равномерно распределённых точек вместо равномерной сетки — это метод Монте-Карло интегрирования для оценки среднеквадратичной нормы. Это позволяет избежать влияния возможных периодических структур ошибки и даёт более надёжную оценку средней ошибки по области. Задача оптимизации свелась к нахождению для каждого количества слоёв n такого численного значения параметра u , которое доставляет минимум соответствующим функционалам $d(u)$, $d_{\min}(u)$ и $d_{\max}(u)$.

Для второго метода — метода регулировки разбиения интервалов — применяется аналогичная двухэтапная схема. Вместо равномерной сетки используется переменный шаг интегрирования. Если ошибка больше допустимой — шаг уменьшается. Если меньше — увеличивается. Для каждого n находятся оптимальные значения параметра адаптации u , обеспечивающие наилучшее соответствие приближённого решения (полученного с переменным шагом) исходному уравнению в среднем и на границах диапазона α . Это позволяет оценить эффективность адаптивной стратегии по сравнению с методом фиксированного шага.

Итоговым результатом для каждого метода и каждого количества слоёв n является оптимальное значение параметра u . Совокупность этих значений, представленная в виде точечных графиков зависимости u от n , позволяет провести сравнительный анализ методов и выработать рекомендации по их оптимальной параметрической настройке.

Результаты. Целью вычислительного эксперимента было найти оптимальное фиксированное значение параметра u . Ниже представлены некоторые результаты вычислительных экспериментов. Параметр u считался постоянным и находилось его оптимальное значение как для всей области изменения параметра, так и для крайних его значений.

Таблица 1. Среднеквадратичная невязка d для одного слоя.

Изменение параметра	$d[0.]$	$d[0.5]$	$d_{\min}$
$\alpha \in [0.01, 0.1]$	101.415	55.6921	48.4792
$\alpha = 0.01$	450.591	223.748	193.796
$\alpha = 0.1$	26.0286	10.4978	9.45463

Во всех трёх рассмотренных сценариях (диапазон α , фиксированные $\alpha=0.01$ и $\alpha=0.1$) минимальная невязка $d_{\min}$ достигается не при стандартных значениях ($u=0$ или $u=0.5$), а при специально подобранном оптимальном значении u . Это доказывает принципиальную возможность и эффективность оптимизации параметра метода для повышения точности. Из таблицы 1 видно, что оптимизация параметра u позволяет уменьшить невязку, хотя её уменьшение по сравнению со стандартным методом трапеций невелико.

Таблица 2. Среднеквадратичная невязка d для пяти слоёв.

Изменение параметра	$d[0.]$	$d[0.5]$	$d_{\min}$
$\alpha \in [0.01, 0.1]$	28.1089	16.7715	6.99495
$\alpha = 0.01$	2009.633	79.1093	39.9815
$\alpha = 0.1$	7.56354	0.45680	0.38691

Таблица 2 позволяет сделать вывод о том, что с ростом числа слоёв невязка существенно убывает. Кроме того, растёт выигрыш от выбора оптимального параметра.

Результаты для метода разбиения интервалов

Таблица 3. Среднеквадратичная невязка d для двух слоёв.

Изменение параметра	$d[0.]$	$d[0.5]$	d_{min}
$\alpha \in [0.01, 0.1]$	1.63482	0.936781	0.827007
$\alpha = 0.01$	2.87936	1.74852	1.73694
$\alpha = 0.1$	1.23191	0.421317	0.357005

Результаты для двух слоёв подтверждают стабильное преимущество оптимального параметра (d_{min}), обеспечивающего наименьшую невязку во всех случаях. Наибольший выигрыш в точности по сравнению со стандартными схемами наблюдается при $\alpha=0.1$. При этом в "жёсткой" области ($\alpha=0.01$) эффективность оптимизации снижается, и результат становится сопоставимым с классическим методом ($u=0.5$). Явная схема ($u=0.0$) остаётся наименее точной.

Таблица 4. Среднеквадратичная невязка d для трех слоёв.

Изменение параметра	$d[0.]$	$d[0.5]$	d_{min}
$\alpha \in [0.01, 0.1]$	1.55319	0.309342	0.282108
$\alpha = 0.01$	3.04216	1.11327	1.05799
$\alpha = 0.1$	1.26538	0.12641	0.0664297

Для трёх слоёв оптимальный параметр обеспечивает минимальную невязку во всех случаях. Наибольший выигрыш в точности наблюдается при $\alpha=0.1$: невязка снижается почти вдвое по сравнению со схемой $u=0.5$ (с 0.12641 до 0.06643). При $\alpha=0.01$ разница между оптимальным параметром и $u=0.5$ незначительна. Схема с $u=0.0$ ($d[0.]$) демонстрирует наихудшую точность. Зависимость невязки от α , показанная на Рисунке 4, подтверждает, что оптимальный параметр особенно эффективен в области больших значений α .

С увеличением n абсолютная величина ошибки закономерно уменьшается, а выигрыш от применения оптимального параметра возрастает. Наибольшая эффективность оптимизации наблюдается при большом числе слоёв.

Вывод. Проведённое исследование было посвящено сравнительному анализу и оптимизации двух численных методов решения дифференциальных уравнений — обобщённого метода трапеций и метода регулировки разбиения интервалов, основанных на модификации схемы Эйлера. Основным результатом работы является доказательство эффективности целенаправленного подбора весового параметра u для минимизации среднеквадратичной невязки. Для каждого метода и для различного числа слоёв (от 1 до 5) было показано, что существует и может быть найден оптимальный параметр u , обеспечивающий существенно более высокую точность по сравнению со стандартными значениями ($u=0.0$ и $u=0.5$)

ЛИТЕРАТУРА

1. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989.
2. Lazovskaya T., Malykhina G., Tarkhov D. Physics-Based Neural Network Methods for Solving Parameterized Singular Perturbation Problem // Computation. 2021. Vol. 9. P. 97.
3. Tarkhov D., Vasilyev A. Semi-Empirical Neural Network Modeling and Digital Twins Development. Academic Press, 2020.

Содержание

<i>Анциферова К.Е., Конаныхина А.С., Полозков Р.Г.</i> Теоретическое исследование электронной структуры смешанных перовскитов вида $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$ и $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{I})_3$	3
<i>Бобков А.А.</i> Наноархитектоника как метод создания высокоэффективных функциональных покрытий на примере наноструктур оксида цинка.....	7
<i>Варенникова М.В., Бalandюк А.В., Преображенский С.П.</i> Метод контурного интегрирования Лапласа в решении дифференциальных уравнений второго порядка с линейными коэффициентами и его приложения.....	10
<i>Вересов С.О., Горбенко О.М., Голубок А.О.</i> Математическое моделирование электронно-оптической микроколонны.....	13
<i>Грачев Д.Р., Сулейманова Е.М., Сысоев И.В.</i> Выявление фрактальных свойств дельта- и тета-ритмов сигналов локальных потенциалов мозга крыс.....	16
<i>Гречнева А.О., Тарасов В.Д., Тархов Д.А., Шатров А.В.</i> Адаптивная оптимизация архитектур физически информированных нейронных сетей на основе фронта Парето: применение к модели нитрификации.....	19
<i>Джафарова А.С., Грищенко А.А., Сулейманова Е.М., Корнилов М.В.</i> Детектирование тета-ритма в гиппокампе одного из полушарий мозга по сигналам локальных потенциалов крыс с использованием вейвлет-преобразования.....	23
<i>Долинина А.Ю., Сысоев И.В., Сулейманова Е.М., Сысоева М.В.</i> Частотно-временной анализ сигналов локальных потенциалов коры головного мозга крыс-моделей.....	26
<i>Иванов Д.С., Павленко П.А., Тархов Д.А., Яковлева А.Е.</i> Обучение нейронной сети для параметра метода, зависящего от параметра задачи.....	30
<i>Иванов К.И., Гольдберг А.А., Бортковская М.Р.</i> Несколько тем в одной задаче на занятиях факультатива по олимпиадной математике.....	33
<i>Иванов С.С., Нужин И.М., Навроцкий А.Г., Турчак Е.А., Янковская У.И.</i> Разработка модели машинного обучения для оптимизации состава и свойств металломатричного композита с титановой матрицей для производства ортопедических имплантатов.....	36
<i>Ижак П.Д.</i> Разработка и реализация трехуровневой модели подготовки к математическим олимпиадам для учащихся 5-6 классов.....	40
<i>Капустников А.А., Сысоев И.В.</i> Идентификация систем из двух дифференциальных уравнений по временным рядам одной из переменных.....	43
<i>Керестень И.А., Быков Н.Ю., Захаров В.В., Лукин А.Я.</i> Разработка термонапряженной модели приповерхностного слоя ядра кометы.....	46
<i>Костина З.С., Гайлит Е.В.</i> Проектирование из точки равновесия: использование 3D-моделей точек Лагранжа системы Солнце-Земля в инженерной практике.....	49
<i>Крылова М.Ю.</i> Перспективы применения VR- и MR-технологий при изучении наносистем.....	52
<i>Куценко Г.М., Шемякина Н.В.</i> Реализация научно-технологических проектов старшеклассников как путь развития инженерного образования в современной школе (из опыта реализации всероссийской образовательной инициативы «Сириус.Лето»)...	55
<i>Лачинова Д.А., Смирнова М.П., Виноградова Л.В., Сысоев И.В.</i> Анализ направленной связанности в кортикальной сети по сигналам локальных потенциалов мозга при прохождении волны распространяющейся деполяризации.....	58
<i>Могильников А.В.</i> Информационная система управления биоэлектрическим протезом.....	61
<i>Нарсеев А.С., Янковская У.И.</i> Программа конструирования атомистических моделей металломатричных композитов с углеродными наноструктурами.....	64
<i>Никитин А.Г., Веневцев И.Д., Тонков Д.Н., Грозова Н.А., Кобыхно И.А.</i> Исследование оптических свойств термопластичного полиуретана с одностенными углеродными нанотрубками.....	68

Содержание

<i>Новиков И.А.</i> Расширение приборной базы устройств нанотехнологий и сенсорики на примере магнитно-силовой микроскопии.....	72
<i>Павленко П.А., Иванов Д.С., Тархов Д.А., Яковлева А.Е.</i> Оптимизация нейросетевой архитектуры для реализации адаптивного параметра в обобщённом методе трапеций.....	76
<i>Пимахина Е.В., Поддубский С.О., Яричук Т.А., Вишняков Н.В.</i> Инновационный подход к управлению фоновым шумом в операционной: голосовое управление и междисциплинарное восприятие.....	80
<i>Приказчиков Д.А.</i> Формирование исследовательских компетенций у старшеклассников и студентов через проектную деятельность с элементами свободного творчества и взаимного рецензирования.....	83
<i>Радайкин Д.Г.</i> Оптимизация разработки фотокатализаторов для разложения микропластика.....	85
<i>Рындин М.А., Быков Н.Ю.</i> Генерация адаптивной сетки для расчета разреженных течений методом прямого статистического моделирования.....	89
<i>Садовников Е.Ю.</i> Интеграция ИИ-ассистентов в учебный процесс для преодоления неосмысленного использования ИИ студентами.....	92
<i>Сиотанов А.М., Шуманова Н.А., Терушкин Б.С.</i> Методы анализа сигналов для обнаружения скрытых каналов утечки информации в инженерных системах.....	96
<i>Стародуб И.М., Гайлит Е.В.</i> Многоуровневое компьютерное моделирование сложных инженерных систем на примере проектирования гоночного болида.....	100
<i>Сысоева А.Д., Егоров Н.М., Сысоев И.В.</i> Идентификация моделей нейронов и реконструкция их параметров по экспериментальным сигналам.....	103
<i>Такашвили Л.В., Сысоева М.В., Пономаренко В.И., Сысоев И.В.</i> Разброс параметров генерации в ансамбле электронных нейронов.....	106
<i>Тарасов В.Д., Гречнева А.О., Тархов Д.А., Шатров А.В.</i> Сравнение методов физически информированных нейронных сетей для задач нитрификации: ФИНС с идентификацией параметров и ФИНС для чистого решения.....	110
<i>Тихонова Т.А., Андреева Т.А., Купцов А.О., Лукин А.Я.</i> VR-лабораторные работы нового поколения.....	114
<i>Ткаченко К.Ю., Овсяников А.К., Усманов О.В.</i> Исследование магнитных фазовых переходов в ортоферрите $TmFeO_3$ методом нейтронографии при воздействии внешнего магнитного поля.....	118
<i>Толкач Н.М.</i> Разработка устройства для оптической модуляции на основе материала системы Ge-Sb-Te.....	121
<i>Ферафонтова И.С., Храмков А.Н., Гриднев В.И., Караваев А.С., Ишбулатов Ю.М.</i> Количественная оценка силы кардиореспираторного взаимодействия методом реконструкции параметров математической модели.....	125
<i>Халугарова К.</i> Иерархические пористые наночастицы оксида никеля с высокой удельной поверхностью, полученные методом зеленого синтеза.....	129
<i>Шарапова А.А.</i> Специфика педагогических технологий в образовательном процессе общепрофессиональных дисциплин технического вуза.....	133
<i>Шуманова Н.А., Сиотанов А.М., Терушкин Б.С.</i> Математическое моделирование двигателя постоянного тока в форме модели Коши.....	138
<i>Яковлева А.Е.</i> Подбор оптимального параметра для двух методов и различного числа слоёв.....	142

МОЛОДЁЖНАЯ ПЕТЕРБУРГСКАЯ ШКОЛА-КОНФЕРЕНЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ-ПЕДАГОГОВ

Сборник материалов научной конференции

3–5 февраля 2026 года

Подписано в печать 27.02.2026. Формат 60×84/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 9,25. Тираж 44. Заказ 0880.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного редакционной коллегией,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.