Учитывая эти результаты, была проведена постобработка и ретопология всех просканированных в ходе работы объектов, что позволило убедиться в эффективности выбранных методов.

Заключение. В результате была проведена всесторонняя оценка технологий 3D-сканирования и ретопологии, что позволило достигнуть поставленную цель – создание цифровых моделей музейных экспонатов, которые будут включены в виртуальный музей «ДЕКАРТФОНД», что обеспечит эффективное сохранение и демонстрацию культурного наследия для будущих поколений.

1. Джуманазарова, С.А. Применение технологий 3D-моделирования для построения моделей культурно-исторического наследия каракалпакского народа / С.А. Джуманазарова. – Текст: электронный // Репозиторий ВГУ имени П. М. Машерова. – URL: https://rep.vsu.by/handle/123456789/43355 (дата обращения: 10.03.2025). – Электрон. версия ст. из: Молодость. Интеллект. Инициатива: материалы XII Международной научно-практической конференции студентов и магистрантов, Витебск, 26 апреля 2024 года: в 2 т. Т. 1. Витебск: ВГУ имени П. М. Машерова, 2024. С. 26–28.
2. Как работает 3D сканирование [Электрон. ресурс]. – 2023. – Режим доступа: https://676.su/kVcv. – Дата доступа: 10.03.2025.
3. Вильяр, Оливер. Изучаем Blender: Практическое руководство по созданию анимированных 3D-персонажей / Оливер Вильяр; [перевод с английского М.А. Райтмана] – Москва: Эксмо, 2023. – 464 с.

FERROSIM: ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ПОЛЕЙ И ТЕРМООБРАБОТКИ НА ПОЛЯРИЗАЦИЮ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Сипаков И.Е.,
магистрант ВГУ имени П.М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь
Научный руководитель – Кашевич И.Ф., канд. физ.-мат. наук, доцент

Сегнетоэлектрики, кристаллические самопроизвольной) поляризацией, которая существенно изменяется под влиянием внешних воздействий. Электрические свойства во многом подобны магнитным свойствам ферромагнетиков. К числу наиболее исследованных относятся титанат бария, сегнетова соль, триглицинсульфат и так далее [1; 2].

Изучение сегнетоэлектрических материалов, таких как титанат бария ($BaTiO_3$), критически важно для разработки функциональных элементов микроэлектроники, энергонезависимой памяти и датчиков нового поколения. Высокая диэлектрическая проницаемость, температурная стабильность и нелинейные свойства $BaTiO_3$ делают его ключевым объектом для современных исследований. Однако сложность прогнозирования поведения этих материалов, включая динамику гистерезиса, влияние пироэлектрических эффектов и последствия термической обработки, требует углубленного моделирования. Отсутствие точных вычислительных инструментов, учитывающих взаимодействие дефектов структуры, доменной динамики и внешних полей, ограничивает возможность создания материалов с заданными характеристиками для работы в экстремальных условиях.

Цель работы – создание открытой программной платформы для многометодного моделирования и сравнительного анализа гистерезисных явлений в сегнетоэлектриках, позволяющей количественно оценивать влияние дефектов кристаллической решётки, температурных условий и режимов термообработки на динамику поляризации.

Материал и методы. В качестве объекта исследования выбран титанат бария ($BaTiO_3$) – модельный сегнетоэлектрик с ярко выраженными нелинейными свойствами и типичной петлёй гистерезиса. Для численного моделирования использован многометодный подход, объединяющий: модифицированное уравнение Ландау-Халатникова; метод Монте-Карло для 2D-решётки спинов ($L \times L$); модель Джилса-Атертона,

разделяющая поляризацию на обратимое (P_{rev}) и необратимое (P_{irr}) слагаемые, модель отжига с параметризацией униполярности *k*.

Результаты и их обсуждение. Петля гистерезиса сегнетоэлектриков, таких как титанат бария, описывает зависимость поляризации P от внешнего электрического поля E. В идеальной кристаллической решётке петля симметрична относительно осей P и E. Однако в реальных условиях её форма и положение существенно зависят от дефектов структуры, температурных эффектов и термообработки.

Наличие внутренних полей E_{int}, обусловленных дефектами (кислородные вакансии, примесные ионы), приводит к сдвигу петли вдоль оси E. В разработанной программе *FerroSim* это явление моделируется модифицированным уравнением Ландау-Халатникова:

$$\frac{dP}{dt} = -\Gamma\left(\alpha P + \beta P^3 + \gamma P^5 - \left(E + E_{int}\right)\right), \quad (1)$$

где E_{int} имитирует локальные поля от дефектов. Например, при E_{int}=2.0 В/м коэрцитивное поле увеличивается на 25%, что согласуется с экспериментами для $BaTiO_3$ с примесями Cr^{3+} [3].

Асимметрия поляризации, вызванная униполярностью *k*, моделируется в *FerroSim* добавлением параметра *k* в уравнение:

$$P_{obs} = P + k, \quad (2)$$

где *k* зависит от режима отжига. Для однородных образцов: $k = k_0 \cdot e^{-n\cdot\lambda}$, а для неоднородных – градиентным изменением *k*. Моделирование в *FerroSim* выявило:

– для однородных образцов: уменьшение *k* на 50% после 10 циклов отжига (λ=0.3); снижение остаточной поляризации Pr с 0.28 до 0.15 Кл/м².

– для неоднородных образцов: стабилизация *k* после 3 циклов (Δk=0.05); сохранение асимметрии петли из-за фиксированных градиентов примесей.

Разработанное приложение *FerroSim* представляет собой универсальную платформу, объединяющую теоретические модели и практические инструменты для исследования сегнетоэлектриков. Его ключевой особенностью является интеграция четырёх методов – от классического подхода Ландау-Халатникова до статистического моделирования методом Монте-Карло, что позволяет исследователям анализировать гистерезисные явления в рамках единого интерфейса. Гибкость настройки параметров, таких как внутренние поля (E_{int}), температура (kT) и униполярность (*k*), сочетается с интуитивным графическим интерфейсом, разработанным на *PyQt5* [4]. Это обеспечивает возможность оперативного сравнения результатов разных методов без необходимости переключения между отдельными программами.

Интерфейс *FerroSim* (рисунок) включает специализированные вкладки для каждого алгоритма, прогресс-бар для отслеживания вычислений и иллюстрирование на базе *Matplotlib*, поддерживающий настройку стилей графиков в реальном времени [5]. Благодаря реализации многопоточности (*QThread*), ресурсоёмкие расчёты, такие как моделирование крупных спиновых решёток, выполняются в фоновом режиме, не блокируя взаимодействие с программой. Для обеспечения воспроизводимости результатов предусмотрены функции экспорта данных: петли гистерезиса сохраняются в векторных и растровом форматах (*PDF, SVG, PNG*) для публикаций, а расчётные данные – в *CSV* для дальнейшего анализа в сторонних пакетах. Открытый исходный код (*GPLv3*) и встроенные примеры настроек для титаната бария и других материалов делают *FerroSim* не только инструментом для расчётов, но и платформой для обучения и разработки новых моделей.

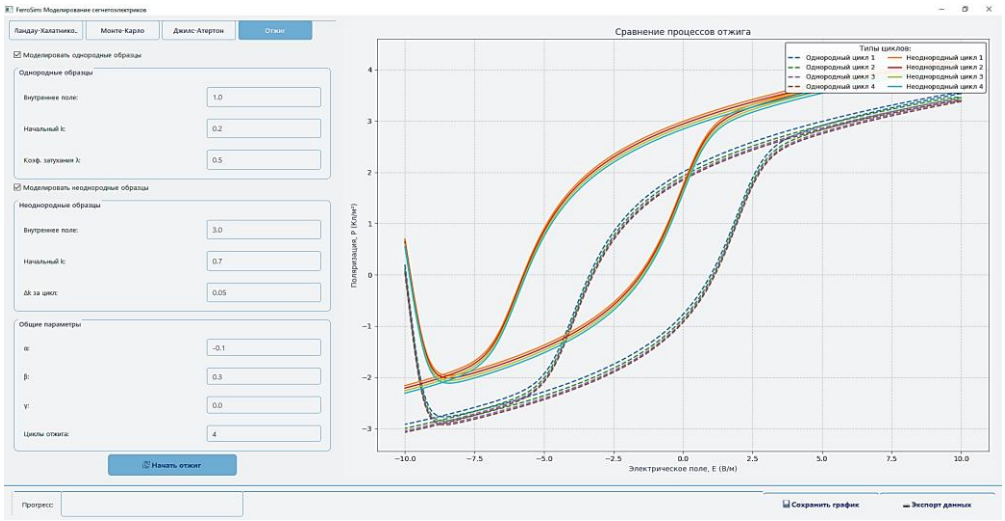

Рисунок – Интерфейс программной платформы *FerroSim*

Заключение. Разработана многофункциональная программная платформа *FerroSim*, интегрирующая четыре метода моделирования гистерезиса сегнетоэлектрических материалов. Установлено, что внутренние поля (E_{int}) и униполярность (k) существенно влияют на асимметрию и смещение петли гистерезиса, а термическая обработка снижает k в однородных образцах, приводя к симметризации. Разработанная платформа, благодаря поддержке многометодного подхода и открытой архитектуре, может быть адаптирована для исследования широкого класса сегнетоэлектриков и мультиферроиков. *FerroSim* может служить как инструментом для фундаментальных исследований, так и платформой для инженерного проектирования материалов с управляемыми гистерезисными характеристиками.

1. Характеристики некоторых сегнетоэлектриков. – URL: https://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/100/712.htm – (дата обращения: 10.03.2025).
2. Фазовые переходы в сегнетоэлектриках с распределенной поляризацией, вызванной закономерным изменением состава: Договор с БРФФИ №№ Ф08Р-110 от 1 апр. 2008 г. : отчет о НИР (заключ.) / науч. рук. В.Н. Шут; [исполн.: В.Н. Шут, И.Ф Кашевич, С.Е. Мозжаров, Ю. . Шиенок]; М-во образования Республики Беларусь, УО “ВГУ им. П. М. Машерова”. – Витебск, 2010. – 46 л. – URL: https://rep.vsu.by/handle/123456789/24873 – (дата обращения: 10.03.2025).
3. Сегнетоэлектрические кристаллы триглицинсульфата с профильным распределением примеси ионов хрома / В.Н. Шут, И.Ф. Кашевич [и др.] // Кристаллография. – 2010. – Т. 55, № 3. – С. 495–498.
4. Руководство по PyQt5. – URL: https://pythonist.ru/rukovodstvo-po-pyqt5/ – (дата обращения: 10.03.2025).
5. Python: библиотеки NumPy и Matplotlib. – URL: https://ya.zerocoder.ru/pgt-python-biblioteki-numpy-i-matplotlib/ – (дата обращения: 10.03.2025).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБУЧЕНИИ МАТЕМАТИКЕ

Сенчило В.А., Юшкевич Ю.А.,
студентки 2 курса ВГУ имени П.М. Машерова, г. Витебск, Республика Беларусь
Научный руководитель – Александрович Т.А., ст. преподаватель

В современном мире информационные технологии (ИТ) играют все более важную роль во всех сферах жизни, включая образование. Особенно актуально использование ИТ в обучении математике, так как эта дисциплина является фундаментальной для многих областей науки и техники. Информационные технологии могут существенно улучшить процесс обучения математике, сделав его более интерактивным, доступным и эффективным [1].