

ОТЗЫВ

на диссертацию Совина Кирилла Владимировича
«Разработка радиочастотных методов исследования обратимых и необратимых изменений в биологических тканях при термическом воздействии»
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Автор отзыва

ФИО: Юрченко Станислав Олегович
Ученая степень: доктор физико-математических наук
Год присуждения ученой степени и научная специальность: 2019, 01.04.07 – Физика конденсированного состояния
Ученое звание: нет
Место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
Подразделение: факультет «Биомедицинская техника»
Должность: декан факультета «Биомедицинская техника»
Контактная информация: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1; тел.: +7 (499) 263-63-91; e-mail: st.yurchenko@mail.ru, st.yurchenko@bmstu.ru

Диссертационная работа Совина К.В. направлена на решение фундаментальной задачи – повышение точности определения параметров Аррениуса кинетики термической дегградации биологических тканей (частотного фактора A и критической температуры T_{cr}), которые являются ключевыми входными данными для математических моделей предоперационного планирования в хирургической абляции. Широкое распространение методов радиочастотной, микроволновой и лазерной деструкции опухолей печени, сердечных аритмий и других патологий требует адекватного теоретического описания процессов повреждения, однако существующие экспериментальные подходы не позволяют в явном виде разделить обратимые (температурные) и необратимые (структурные) изменения электрических свойств ткани, что ведёт к систематическим ошибкам при восстановлении параметров Аррениуса. Основной результат диссертации связан с повышением точности получения корректных значений параметров, необходимых для построения достоверных вычислительных моделей и последующего улучшения результатов экспресс-контроля степени повреждения тканей в реальном времени.

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, списка публикаций и цитируемой литературы, а также благодарностей. Общий объём диссертации составляет 100 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит развёрнутый обзор литературы. Автором последовательно рассмотрены уровни организации живых систем (от субклеточного до органного) с акцентом на строение печени, электрические свойства биологических тканей (модели Дебая

и Коула-Коула, α -, β - и γ -дисперсии), методы импедансной спектроскопии (синхронное детектирование, 4-электродная схема), а также физические основы термического воздействия и формализм Аррениуса для описания кинетики деградации. Особый интерес представляет анализ модуляционных методов (включая ТМ-ДСК), которые в других областях физики успешно применяются для разделения обратимых и необратимых процессов. В результате сформулирован вывод о необходимости разработки нового подхода, сочетающего однородный объёмный нагрев и модуляционную импедансометрию.

Вторая глава посвящена измерениям радиочастотного импеданса при разогреве постоянной мощностью. Автором разработана и создана экспериментальная установка, обеспечивающая однородный нагрев образцов рассеянным излучением лазера с длиной волны 1064 нм. Применена 4-электродная схема с синхронным детектированием в диапазоне частот 100 Гц – 4 МГц. Полученные спектры импеданса проанализированы в рамках модели Коула-Коула (в качестве модельного объекта была взята печень курицы); показано, что низкочастотное сопротивление R_L , ассоциированное с мембранами клеток, претерпевает необратимые изменения в процессе деградации. С использованием формализма Аррениуса из кинетик $R_L(t)$ и $T(t)$ получены параметры деградации ($\ln A \sim 83\text{--}107 \ln(c^{-1})$, $T_{cr} \sim 88\text{--}92 \text{ }^\circ\text{C}$). Важный результат главы связан с математическим моделированием, которое продемонстрировало, что оптический объёмный нагрев способен обеспечить в 4 раза меньшую ошибку определения параметров Аррениуса по сравнению с конвективными методами нагрева через поверхность образца.

Третья глава представляет разработку модуляционного метода радиочастотной импедансометрии. Автор перешёл к плоским образцам (толщиной 3 мм) и двухэлектродной схеме с оптически прозрачными электродами из оксида индия-олова. Мощность лазера (970 нм) модулировалась на частоте 0,1 Гц со 100% глубиной. Для измерения температуры применена схема на двух волоконных брэгговских решётках с регистрацией проходящей мощности, что обеспечило высокую точность и отсутствие влияния на электрические измерения. Автором предложен и реализован алгоритм разложения экспериментальных кинетик в ряд Фурье, позволяющий в явном виде выделить обратимую компоненту – температурный коэффициент адмиттанса $\partial|Y|/\partial T$, – не прибегая к экстраполяциям. Показано, что этот коэффициент монотонно уменьшается более чем в 4 раза при нагреве от 25 до 80 $^\circ\text{C}$. На основе выделенной необратимой компоненты получены уточнённые параметры Аррениуса для исследованной ткани: $\ln A = 48,5 \pm 3,8 \ln(c^{-1})$, $T_{cr} = 101 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Сравнение с немодуляционным методом выявило, что пренебрежение непостоянством температурного коэффициента приводит к систематическому занижению T_{cr} ($\sim$ на 11 $^\circ\text{C}$) и завышению $\ln A$ ($\sim$ в 2 раза). Проведённая численная проверка алгоритма подтвердила высокую точность восстановления параметров (погрешность менее 1%).

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Представленные в работе результаты опубликованы в рецензируемых журналах, а также апробированы на российских и международных конференциях.

К достоинствам диссертации можно отнести высокое качество изложения материала, наличие в работе как экспериментальных результатов, так и моделирования, их сочетания между собой.

Автореферат полностью отражает содержание работы и соответствует требованиям п. 25 «Положения о присуждении ученых степеней».

По диссертации имеются следующие замечания:

- При описании установки в главе 3 не поясняется номинал резистора, выбранного для Электрической схемы подключения лазера для модуляции его излучения (рис. 37)

- На стр. 75 говорится о пренебрежимой малости осцилляционных членов внутри выражения для производной степени деградации по времени, однако не приводится численное обоснование корректности такого допущения.
- На стр. 88 говорится о малой теплоёмкости волоконной брегговской решетки, используемой в качестве датчика температуры, однако не приводится численная оценка и сравнение с теплоемкостью образца.

Вместе с тем, указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы и носят скорее характер пожеланий для дальнейших исследований.

Несмотря на представленные замечания, считаю, что диссертация, выполненная Совиным К.В., представляет собой законченное научное исследование и полностью соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук, установленным в Постановлении Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 16.10.2024) "О порядке присуждения ученых степеней" (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025), а диссертант заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Дата: 24 августа 2026 г.

Подпись: _____

Юрченко С.О.

