



СОДЕРЖАНИЕ

Основная школа

Р. М. Абдулов М. С. Свечникова	ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ЛАБОРАТОРИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РАЗДЕЛА «ДАВЛЕНИЕ»	3
-----------------------------------	---	---

Старшая школа

М. А. Фаддеев Ю. В. Масленникова Н. С. Тараканов	ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЛОМЛЕНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ ПУЧКОВ СВЕТА В ТРЕУГОЛЬНОЙ ПРИЗМЕ	11
--	---	----

Высшая школа

А. И. Грибков Р. В. Романов	ПРОСТОЙ МАЯТНИК: ИСТОРИЯ, ТЕОРИЯ, РЕАЛЬНОСТЬ И ВИРТУАЛЬНОСТЬ	22
А. А. Кривушин О. А. Милованова С. А. Кривушина	ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИМПЕДАНС БИОТКАНИ В УЧЕБНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ МЕДИЦИНСКОГО ВУЗА	40
В. В. Майер Ю. А. Корнев	ПОЛУЧЕНИЕ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПЬЕЗОГЕНЕРАТОРА	56

Технологии обучения

П. В. Зуев В. Е. Сидоров	ПРОПЕДЕВТИКА ОБУЧЕНИЯ ФИЗИКЕ УЧАЩИХСЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КЛАССОВ НАЧАЛЬНОЙ ШКОЛЫ В УСЛОВИЯХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА	66
-----------------------------	---	----

Науковедение

Ю. А. Сауров	ЭССЕ О КНИГЕ «ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ В КУРСЕ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ»	76
--------------	---	----

АВТОРЫ ЖУРНАЛА	80
----------------------	----

Редакция журнала:

В. В. Майер (главный редактор), Р. В. Акатов, Е. И. Вараксина, Л. С. Кропачева

Редакционный совет:

С. В. Барышников	д.ф.-м.н., профессор, Благовещенск
И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
А. А. Шаповалов	д.п.н., профессор, Барнаул

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская-Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Перечень ВАК: Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.
E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropach@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686, перерегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

Подписной индекс: 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 02.09.25. Подписано в печать 25.09.25.

Дата выхода в свет: 30.09.25.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 5,0.

Заказ 171. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Экспериментальная установка для проверки закона Кулона в демонстрационном опыте.

Научная статья

ББК 74.48, 28с

УДК 372.853:616-073.75

А. А. Кривушин, О. А. Милованова, С. А. Кривушина

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИМПЕДАНС БИОТКАНИ В УЧЕБНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ МЕДИЦИНСКОГО ВУЗА

В работе исследовано влияние температуры на импеданс картофельной ткани с целью демонстрации биофизических закономерностей студентам медицинских вузов. Проведены измерения импеданса при охлаждении, нагревании и последующем восстановлении температуры образцов. Показано, что охлаждение приводит к обратимому увеличению импеданса, а нагрев вызывает необратимое снижение и исчезновение дисперсии. Работа подчеркивает важность методической точности при электроизмерениях биологических объектов.

Ключевые слова: импеданс, биоткани, частотная зависимость, биоимпедансометрия, медицинское образование.

A. A. Krivushin, O. A. Milovanova, S. A. Krivushina

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON BIOLOGICAL TISSUE IMPEDANCE IN AN EDUCATIONAL EXPERIMENT FOR MEDICAL UNIVERSITY STUDENTS

The study investigates the influence of temperature on the impedance of potato tissue to demonstrate biophysical patterns to medical students. Impedance measurements were conducted during cooling, heating, and subsequent temperature recovery of the samples. It was shown that cooling leads to a reversible increase in impedance, while heating causes an irreversible decrease and disappearance of dispersion. The study highlights the importance of methodological accuracy in electrical measurements of biological tissues.

Keywords: impedance, biological tissues, frequency dependence, bioimpedance spectroscopy, medical education.

DOI: 10.62957/2307-5457-2025-3-40-55

Учебная физика. 2025. № 3. С. 40–55

© Кривушин А. А., Милованова О. А., Кривушина С. А., 2025

Введение

Биоимпедансометрия — измерение полного электрического сопротивления биологических объектов переменному току — является важным методом исследования в биофизике и медицинской диагностике. Импеданс тканей определяется их составом: клетками, окруженными внеклеточной жидкостью, и свойствами клеточных мембран. Биологические ткани проявляют как активное (омическое), так и емкостное сопротивление, поэтому полное сопротивление (импеданс Z) зависит от частоты тока. Эта частотная зависимость называется дисперсией импеданса: при низких частотах клеточные мембраны препятствуют прохождению тока как диэлектрики, а при высоких частотах емкостной ток через мембраны возрастает, и эффективный импеданс снижается. Измеряя импеданс на различных частотах, можно получить информацию о структурно-функциональных особенностях ткани.

Для описания поведения биологических тканей при воздействии переменного тока существует множество эквивалентных электрических моделей различной сложности — от простых RC -цепей до обобщенных моделей Коул–Коула [1]. Однако в рамках курса общей физики для медицинских вузов наша задача заключается не в детальном анализе этих схем, а в демонстрации самой физической аналогии между биологическими тканями и электрическими компонентами. Например, элементарная эквивалентная схема клеточной мембраны может быть представлена параллельным соединением резистора и конденсатора, что иллюстрирует сочетание проводимости и поляризуемости мембранной структуры (рис. 1).

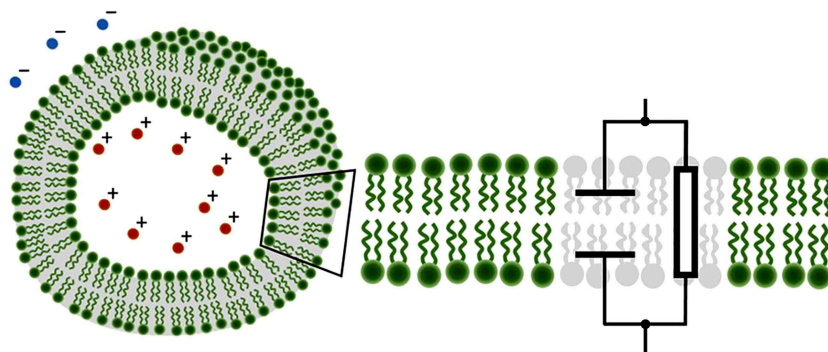


Рис. 1. Модель клеточной мембраны: биологическая структура и электрическая эквивалентная схема с параллельным соединением резистора и конденсатора

Измерение биоимпеданса находит практическое применение в медицине: например, метод реографии основан на том, что импеданс участка ткани меняется в зависимости от кровенаполнения, отражая

фазу сердечного цикла. Многочастотная импедансометрия используется для оценки состава тела, состояния жидкости в организме, определения доли жировой и мышечной тканей. Эти методы важны для будущих врачей, поскольку позволяют косвенно судить о физиологических параметрах через электрические характеристики тканей. Регистрация разности потенциалов на биологических объектах лежит также в основе электрокардиографии (ЭКГ), хотя природа сигнала в ЭКГ и импедансометрии различна: в первом случае фиксируются собственные биотоки, во втором — отклик ткани на внешний переменный ток [2]. Тем не менее, понимание физических основ прохождения тока через ткани, правил наложения электродов, контроля сигналов и учета внешних факторов (температуры, влажности кожи, состояния тканей) является важной частью подготовки будущих врачей к грамотной работе с диагностической аппаратурой.

Температура является одним из ключевых физических факторов, влияющих на состояние и свойства биологических тканей. В организме поддержание температуры обеспечивает оптимальные условия для биохимических реакций и структурной целостности мембран. Снижение температуры делает среду более вязкой и замедляет движение ионов, что повышает сопротивление; повышение температуры ускоряет диффузию и снижает сопротивление, однако при достаточном нагревании происходят необратимые изменения, такие как денатурация белков и разрушение клеток. Критические температуры известны: около 42 °C начинается денатурация белков мышечной ткани, а при 0 °C и ниже возникает повреждение клеток вследствие кристаллизации воды. Литературные данные показывают, что изменение температуры существенно влияет на импеданс биотканей: так, при охлаждении и нагревании тканей наблюдаются характерные изменения импеданса, что позволяет различать свежие и поврежденные образцы [3, 4].

В настоящей работе исследуется температурное влияние на измерение импеданса биологической ткани на примере картофеля. Картофельный клубень, состоящий из живых клеток паренхимы, насыщенных водой и крахмалом, является удобным модельным биообъектом для лабораторных занятий. Проведены измерения комплексного сопротивления картофеля на различных частотах в условиях охлаждения, нагревания и восстановления температуры до исходной. Эксперимент позволяет наглядно продемонстрировать студентам биофизические закономерности (дисперсию импеданса, влияние температуры, поляризацию мембран) и подчеркнуть значение точности методики измерений (стабильность тока, правильная регистрация сигнала, выявление и учет артефактов) при работе с биологическими объектами.

Цель работы

Цель исследования заключается в изучении влияния изменения температуры на импеданс биологического объекта и в отработке методики корректных измерений. Экспериментальной задачей является

определение зависимости импеданса картофельной ткани от частоты в различных температурных состояниях: при нормальной комнатной температуре, после охлаждения до нескольких градусов выше 0°C , после нагревания до $50\text{--}60^{\circ}\text{C}$, а также после восстановления температуры к исходной.

Планируется показать: 1) наличие частотной дисперсии импеданса картофеля и ее изменение при варьировании температуры; 2) рост импеданса при охлаждении и снижение при нагреве; 3) степень обратимости изменений импеданса после возвращения к исходной температуре.

Дополнительно ставится дидактическая задача — ознакомить студентов с методами измерения импеданса и регистрации сигналов, а также продемонстрировать влияние методических погрешностей и способы их минимизации при работе с биологическими объектами.

Методика эксперимента

Материалы и оборудование. Объектом исследования служил свежий картофель средней величины. Для подачи переменного тока и проведения измерений использовали генератор сигналов (источник синусоидального напряжения фиксированной частоты), резистор-ограничитель тока, потенциометр для регулировки силы тока и осциллограф для регистрации сигнала на образце [5].

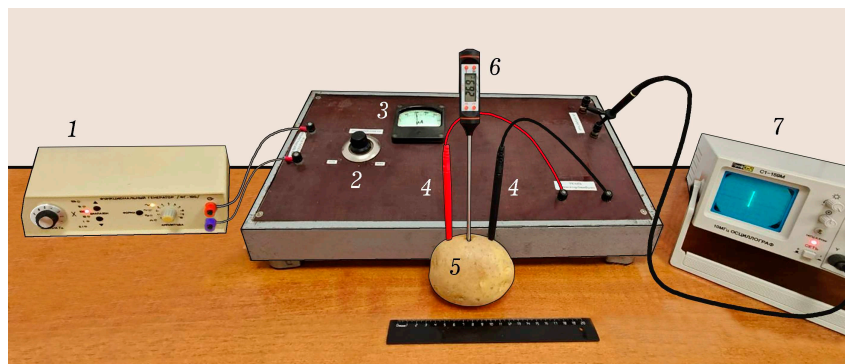


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки для измерения импеданса биологического объекта: 1 — функциональный генератор; 2 — потенциометр; 3 — микроамперметр; 4 — электроды; 5 — биоткань; 6 — термометр; 7 — осциллограф

Два металлических игольчатых электрода вводились в клубень картофеля на глубину 1–1,5 см на фиксированном расстоянии друг от друга (порядка нескольких сантиметров) для обеспечения стабильного электрического контакта. Электроды подключались последовательно с генератором и резистором так, чтобы через образец протекал малый

переменный ток. Регулировка тока осуществлялась с помощью потенциометра, а его эффективное значение поддерживалось на уровне около $I_{\text{эф}} = 200$ мкА. Такой ток был достаточно малым, чтобы избежать нагрева образца или электролитических эффектов, но достаточным для стабильной регистрации сигнала.

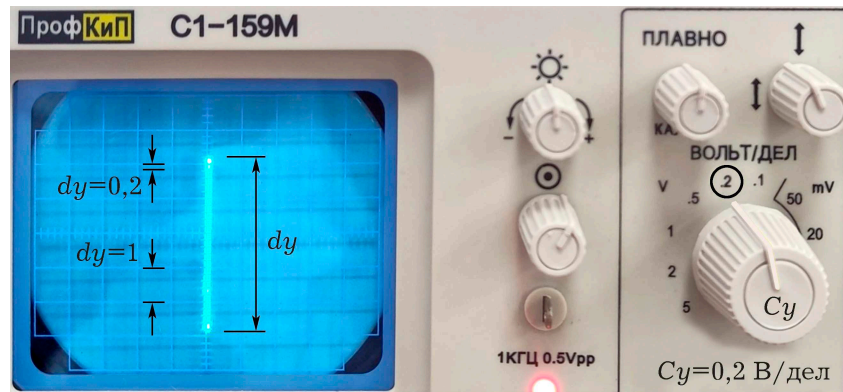


Рис. 3. Экран осциллографа при определении амплитуды сигнала и чувствительности вертикального канала для расчета эффективного напряжения

При измерении напряжения использовался осциллограф с отключенной внутренней генерацией развертки. В результате на экране фиксировалась неподвижная вертикальная светящаяся линия, соответствующая полному размаху переменного сигнала. Измерялась удвоенная амплитуда колебаний сигнала, выраженная в количестве делений по вертикальной оси осциллографа dy , с учетом установленной чувствительности канала Cy (в вольтах на деление).

Эффективное значение напряжения $U_{\text{эф}}$ рассчитывалось по формуле:

$$U_{\text{эф}} = \frac{2U_m}{2\sqrt{2}} = \frac{dy \cdot Cy}{2,83},$$

где dy — число делений полного размаха сигнала по вертикали, Cy — цена одного большого деления осциллографа в вольтах.

Измеряемая величина $dy \cdot Cy$ соответствовала удвоенной амплитуде мгновенного значения напряжения переменного сигнала, поэтому для получения эффективного значения напряжения требовалось деление сначала на 2, затем на корень из 2, что в итоге эквивалентно делению на 2,83.

Переход от амплитудных значений напряжения к эффективным был необходим, поскольку сила тока задавалась в эффективных единицах. Для корректного применения закона Ома при расчете импеданса ток и напряжение должны быть приведены к одной системе измерений. После пересчета напряжения рассчитывался модуль полного

импеданса, определяемый по выражению:

$$|Z| = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}},$$

где $U_{\text{эф}}$ — эффективное значение напряжения на образце, а $I_{\text{эф}}$ — эффективное значение силы тока.

В дальнейшем для краткости будем называть модуль полного импеданса $|Z|$ просто импедансом Z . Таким образом, измерение эффективного напряжения и знание силы тока позволяли экспериментально определить полное сопротивление биологической ткани.

Процедура измерения

Эксперимент состоял из нескольких этапов, соответствующих разным температурам картофеля.

1. Измерение при комнатной температуре. Картофель (условно обозначим его как образец №1) выдерживали при комнатных условиях ($\sim 21^\circ\text{C}$) достаточное время, чтобы температура внутри клубня выровнялась. Затем подключали электроды и проводили серию измерений импеданса на различных частотах (от 500 Гц до 20 кГц). Частоту меняли дискретно, задавая синусоидальный сигнал указанной частоты из генератора, и для каждой частоты измеряли напряжение на образце. Для контроля возможной анизотропии или влияния места контакта, измерения повторяли при другом расположении электродов (например, вдоль продольной оси клубня и поперек, либо на разных сторонах — на округлой поверхности и на срезе). Однако в данной статье мы сосредоточены на сравнении температурных состояний, поэтому усредним данные для комнаты как одни характерные значения.

2. Измерение при охлаждении. Тот же образец №1 затем подвергали охлаждению: его помещали в холодильную камеру с температурой $\sim +5 \dots +6^\circ\text{C}$ на достаточное время (не менее 1–2 часов), чтобы весь объем клубня остыл до этой температуры. Важно выдержать паузу для выравнивания температуры, иначе поверхность охладится сильнее, чем центр, и измерения будут затруднительны в интерпретации. После выдержки образец извлекали и быстро, не допуская значительного нагрева от окружающего воздуха, производили измерения импеданса на тех же частотах (500 Гц–20 кГц). Фиксировали напряжения и рассчитывали Z по описанной методике.

3. Измерение после восстановления температуры (после охлаждения). После окончания серии измерений в охлажденном состоянии, картофель №1 оставляли при комнатной температуре, давая ему прогреться обратно $\sim$ до $21\text{--}23^\circ\text{C}$. По достижении исходной температуры (контролировалось термометром) повторно измеряли импеданс на всех частотах. Этот этап позволял оценить, вернутся ли электрические характеристики к первоначальным значениям, то есть насколько изменения от охлаждения были обратимыми или вызвали устойчивые

сдвиги (например, из-за возможного повреждения клеток холодом или изменения контакта электродов).

4. Измерение при нагревании. Далее проводился эксперимент с повышением температуры. Для этого брали тот же и другой подобный клубень (для чистоты эксперимента, использован образец № 2 — другой картофель, чтобы процессы охлаждения и нагрева не накладывались друг на друга). Образец № 2 сначала измерили при комнатной температуре аналогично пункту 1 (эти исходные данные близки к образцу № 1 и служили контролем). Затем его подвергали нагреванию до примерно 50–55 °С. Практически это реализовано погружением картофелины в термостатируемую воду (в пластиковом пакете, чтобы избежать прямого контакта с водой). Выдерживали клубень до равномерного прогрева внутренней части. Важно не перегреть сильно выше нужной температуры, чтобы не сварить образец полностью и не испортить возможность измерений. Достигнув ~ 54 °С внутри, образец быстро переносили в изолированную среду для измерений. Провели серию измерений импеданса на тех же частотах для горячего картофеля.

5. Измерение после восстановления температуры (после нагревания). После горячей серии образец № 2 оставляли остывать на воздухе до комнатной температуры (~ 23 °С). Затем его импеданс измеряли в последний раз. Сопоставляя эти данные с исходными значениями до нагрева, можно понять, произошли ли необратимые изменения в структуре (например, тепловое повреждение клеток, повлиявшее на проводимость).

На всех этапах эксперимента особое внимание уделялось методической точности. Во-первых, как уже отмечено, постоянно поддерживали заданную силу тока — это достигалось стабильностью генератора и большим сопротивлением токоограничивающего резистора по сравнению с импедансом образца. Во-вторых, при смене температур образец выдерживали до термодинамического равновесия, избегая градиентов температуры внутри него. В-третьих, электроды старались не смещать и не вынимать между измерениями, чтобы геометрия контакта оставалась неизменной (перемещение электродов могло бы само по себе изменить результирующее сопротивление из-за нового пути тока). В-четвертых, перед каждым замером на новой частоте убеждались, что сигнал на осциллографе стабилизировался (переменный ток проходит через емкостные и индуктивные элементы, поэтому сразу после переключения частоты могли возникать переходные процессы). Мы дожидались установления стационарного синусоидального режима и только затем снимали отсчет. Наконец, тщательно следили за возможными *артефактами*. Под артефактами понимали любые искажения или аномалии в показаниях, не связанные напрямую со свойствами образца.

В ходе эксперимента использовались два картофельных клубня (образцы № 1 и № 2), подвергавшиеся различным температурным ре-

жимам (образец № 1 предварительно охлаждался). Качественный характер частотной зависимости импеданса оказался сходным для обоих образцов, различия наблюдались лишь в абсолютных величинах сопротивления, что связано с естественными индивидуальными особенностями тканей. В дальнейшем для представления результатов и анализа использованы данные, полученные на образце № 2.

Результаты эксперимента

В табл. 1 сведены результаты измерений импеданса Z картофеля при различных температурах на частотах 0,5–20 кГц. Приведены данные для трех состояний первого образца: исходная комнатная температура ($\sim 21^\circ\text{C}$), охлажденный до $\sim 6^\circ\text{C}$, и после возвращения к $\sim 22^\circ\text{C}$ (после отогревания).

Таблица 1. Импеданс картофеля (образец № 1)

ν , Гц	Z , Ом (при $\sim 21^\circ\text{C}$)	Z , Ом (при $\sim 6^\circ\text{C}$)	Z , Ом (при $\sim 22^\circ\text{C}$)
500	3534	4947	2827
1000	3357	4594	2650
2000	3180	4240	2403
5000	2615	3357	2049
10000	2191	2615	1767
15000	1979	2261	1625
20000	1908	2049	1555

По табл. 1 видно, что при комнатной температуре импеданс картофеля довольно велик на килогерцовых частотах (порядка нескольких килоом) и уменьшается с ростом частоты. Например, при 500 Гц, $Z \approx 3,53$ кОм, а при 20 кГц — около 1,91 кОм. Эта *убывающая зависимость* $Z(\nu)$ демонстрирует *дисперсию импеданса биоткани*: чем выше частота переменного тока, тем легче ему пройти через ткань (т.е. тем меньше импеданс) за счет емкостных путей проводимости через мембраны. График на рис. 4 (кривая 1) иллюстрирует эту частотную зависимость.

После охлаждения до $\sim 6^\circ\text{C}$ (вторая колонка табл. 1) импеданс на всех частотах существенно вырос. Так, при 500 Гц сопротивление увеличилось до $\sim 4,95$ кОм (против 3,53 кОм в норме), а на 20 кГц возросло до $\sim 2,05$ кОм (против 1,91 кОм). Повышение сопротивления холодной ткани объясняется уменьшением электропроводности: влага в клетках и межклеточном пространстве при низкой температуре становится более вязкой, и подвижность ионов снижается. Кроме того, температурное снижение проводимости характерно и для полупроводниковых элементов клеточных мембран. В результате полный

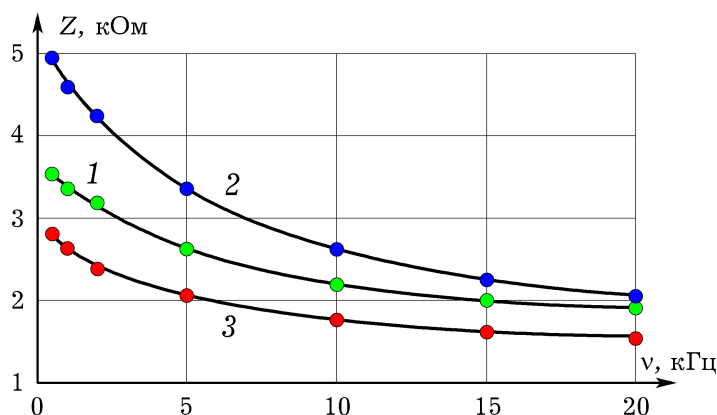


Рис. 4. График частотной зависимости импеданса картофеля (образец № 1) при охлаждении: 1 — норма при 21 °С; 2 — охлаждение при 6 °С; 3 — восстановление при 22 °С

импеданс возрастает. Как видно, разница наиболее заметна на низких частотах (где ток идет в основном через внеклеточную среду и должен обходить мембраны: их емкостной ток при 500 Гц мал, а сопротивление мембран велико). На высоких частотах (10–20 кГц) доля тока, проходящего сквозь мембраны, выше, а сопротивление внутриклеточной жидкости меньше, поэтому относительное увеличение не столь значительно. Тем не менее, при 20 кГц тоже фиксируется разница (2,05 кОм против 1,91 кОм, $\sim +8\%$). Кривая 2 на рис. 4 показывает импеданс охлажденного картофеля: она лежит выше кривой 1 на всем диапазоне.

После того как охлажденный образец отогрелся обратно до $\sim 22^\circ\text{C}$, импеданс несколько уменьшился, приближаясь к исходным значениям (третья колонка табл. 1). Например, на 500 Гц Z стало $\sim 2,83$ кОм — существенно ниже, чем было в охлажденном состоянии, но *еще ниже, чем изначально* при 21 °С (3,53 кОм). Аналогично, на 5 кГц получили $\sim 2,05$ кОм против исходных 2,615 кОм. То есть, по возвращении к прежней температуре, сопротивление ткани *не полностью вернулось* к своему первоначальному значению, а осталось несколько пониженным. Это может свидетельствовать о слабых необратимых изменениях в образце, произошедших из-за охлаждения. В рассматриваемом случае картофель не замораживался (лед не образовывался), однако даже охлаждение до $+6^\circ\text{C}$ могло привести к умеренному повышению проницаемости мембран или изменению распределения влаги. Кроме того, нельзя исключить, что за время эксперимента изменилось состояние контакта электродов (например, увлажнение контактной зоны сократилось). Тем не менее, разброс невелик: после восстановления параметры расположены между исходными и

охлажденными. Кривая 3 на рис. 4 изображает зависимость $Z(\nu)$ после восстановления: она ниже исходной кривой 1.

Следующий этап — эксперимент с нагреванием (образец № 2). Результаты приведены в табл. 2. Здесь первая колонка — импеданс картофеля при комнатной температуре ($\sim 23^\circ\text{C}$) до нагрева, вторая — в нагретом состоянии ($\sim 54^\circ\text{C}$), третья — после остывания обратно до $\sim 23^\circ\text{C}$.

Таблица 2. Импеданс картофеля (образец № 2)

ν , Гц	Z , Ом (при $\sim 23^\circ\text{C}$)	Z , Ом (при $\sim 54^\circ\text{C}$)	Z , Ом (при $\sim 23^\circ\text{C}$)
500	3534	212	141
1000	3357	205	134
2000	3180	198	127
5000	2332	198	120
10000	1837	198	106
15000	1625	191	127
20000	1555	184	141

При сравнении исходных данных образца № 2 (первый столбец) с образцом № 1 (табл. 1) заметно их количественное сходство, что ожидаемо для двух схожих картофелин. Нагрев до $\sim 54^\circ\text{C}$ вызвал *резкое падение импеданса* (в десятки раз!). На низких частотах сопротивление снизилось с килоом до единиц сотен Ом: так, при 500 Гц $Z \sim 212$ Ом, тогда как было ~ 3500 Ом. На частотах 5–10 кГц разница еще более разительная: ~ 200 Ом против 1800–2300 Ом. Это означает, что прогретая ткань стала чрезвычайно проводящей.

Объясняется это несколькими факторами. Во-первых, при повышении температуры электропроводность растворов растет (примерно на 2% на градус для физиологических растворов): ионы быстрее дрейфуют под действием поля, вязкость среды падает, потому омическое сопротивление снижается. Во-вторых, 54°C — это достаточно высокая температура, близкая к порогу денатурации белков. В растительных тканях при ~ 50 – 60°C начинается коагуляция цитоплазматических белков и необратимое повреждение мембран. Мембраны теряют свою изоляционную функцию, повышается их ионная проницаемость. Фактически клетки могут гибнуть, превращаясь в мешочки с растворенными веществами. В результате исчезает емкостный барьер на низких частотах — ток проходит повсюду, и импеданс определяется главным образом солевым составом внутриклеточной и внеклеточной жидкостей [2, 3]. Это хорошо согласуется с нашими данными: на всех исследованных частотах (даже самых низких 500–1000 Гц) импеданс нагретого образца оказался около ~ 200 Ом, то есть почти постоянным. Частотная зависимость сгладилась, что свидетельствует об ис-

чезновении выраженной емкостной компоненты (мембраны «сдались» и уже не препятствуют току). Другими словами, *дисперсия импеданса практически пропала*: кривые $Z(\nu)$ для нагретой ткани стали почти горизонтальными. Это признак сильного изменения структуры биоткани — в норме, как обсуждалось, у здоровой ткани заметна частотная зависимость, а когда мембраны разрушены, импеданс ведет себя больше, как простой солевой раствор.

После остывания нагретого картофеля до $\sim 23^\circ\text{C}$ импеданс немного изменился (третий столбец табл. 2), но не вернулся к исходным высоким значениям — напротив, остался на уровне сотен Ом. Например, при 500 Гц получили ~ 141 Ом (против 212 Ом в горячем состоянии и 3534 Ом до нагрева). То есть охлаждение до комнатной температуры после теплового повреждения *еще больше снизило сопротивление*.

На первый взгляд это кажется противоречащим обычному влиянию температуры (мы ожидали рост сопротивления при остывании). Однако здесь сказываются необратимые структурные изменения: пока образец был горячим, возможно сохранялись какие-то градиенты или пузырьки газа, частично препятствующие току, а после полного остывания ткань пропиталась высвободившейся жидкостью равномерно. Вероятно, при разрушении клеток значительная часть внутриклеточной жидкости вышла в межклеточное пространство, увлажнив его, плюс сами клетки потеряли тургор. В итоге образовалась более однородная проводящая среда. Падение сопротивления после охлаждения может быть связано также с тем, что при 54°C часть воды могла испариться или отойти от электродов, а затем влага могла перераспределиться и вновь увлажнить контактную зону. Так или иначе, *нагрев нанес биоткани необратимое повреждение*, и даже вернувшись к нормальной температуре, образец уже не восстановил высокий импеданс здоровой ткани. Это подтверждает ключевой вывод: *температурные изменения могут существенно и необратимо изменять электрические свойства биологических объектов*.

Интересно отметить, что второй образец (табл. 2) после нагревания имеет импеданс даже ниже, чем первый образец после охлаждения (табл. 1) — то есть нагретый картофель при 23°C (~ 100 – 140 Ом) проводит ток намного лучше, чем сырая картофелина при 6°C (2 – 5 кОм). Таким образом, эффект нагревания (через структурное разрушение и повышение ионной проводимости) способен превосходить эффект обычного охлаждения на порядок и более. В связи с этим, графическое отображение этих данных совместно с исходными значениями оказалось бы малоинформативным: кривые оказались бы практически прижатыми к оси частот, а различия между ними плохо различимыми на общем фоне. Поэтому данные о состоянии образца после нагрева представлены только в табличной форме.

При проведении опытов с нагретым образцом были зафиксированы осциллографические *артефакты*. В частности, в серии измерений при температуре $\sim 54^\circ\text{C}$ на частоте 20 кГц наблюдались искажения формы сигнала: вместо четкой синусоиды появилась характерная уширенная

кривая с размытыми вершинами и основаниями (рис. 5). Такое уширение особенно выражено в максимумах и минимумах осциллограммы и свидетельствует о нарушении чистоты сигнала.

На фоне этих искажений фиксировались аномальные значения импеданса: так, на 20 кГц измеренное сопротивление оказалось значительно выше ожидаемого (~ 300 Ом вместо $\sim 190\text{--}200$ Ом). Повторные замеры подтвердили нестабильность показаний, указывая на наличие паразитных влияний в измерительной цепи. Вероятной причиной стали паразитные емкости соединительных проводов и увеличение влияния высокочастотных наводок при нагревании образца, когда сопротивление ткани становится очень низким. Для качественного анализа мы приняли усредненное значение импеданса (~ 184 Ом) на 20 кГц в нагретом состоянии, а выбивающиеся точки учли, как осциллографические артефакты.

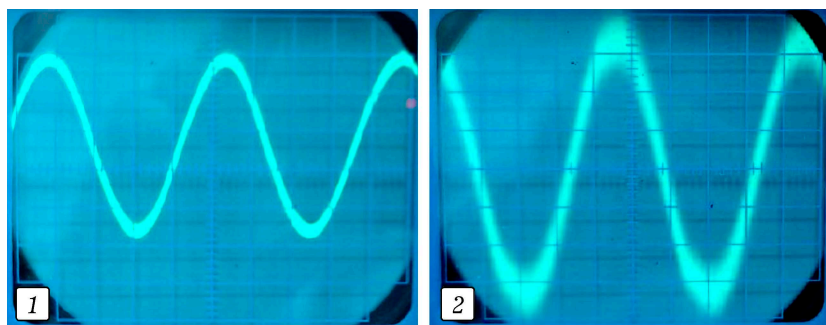


Рис. 5. Осциллограммы сигнала: 1 — расщепленная форма; 2 — форма с уширением максимумов

Подобные эффекты подчеркивают важность тщательной оценки формы сигнала и контроля качества измерений, особенно при работе на высоких частотах с низкоомными объектами. В реальной практике при обнаружении уширения синусоиды необходимо либо уменьшить частоту, либо корректировать методику съема данных.

Обсуждение результатов

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о биофизике тканей и подтверждают значимость контроля температуры при электроизмерениях. В нормальных условиях импеданс биологических объектов определяется сочетанием сопротивления электролитов (внеклеточной и внутриклеточной жидкости) и емкостного сопротивления клеточных мембран. При комнатной температуре картофельная ткань ведет себя как классическая биоткань: обладает выраженной дисперсией импеданса (рис. 4, кривая 1). Это аналогично тому, что наблюдается и в живых тканях животных и человека.

Например, импеданс мышечной или грудной ткани человека на частотах порядка 50–1000 кГц также заметно падает с ростом частоты, и именно на этом принципе основаны методы биоимпедансного анализа состава тела и диагностики состояния органов.

Влияние охлаждения. При снижении температуры до $+6^{\circ}\text{C}$ в нашем эксперименте сопротивление картофеля возросло. Основная причина — уменьшение подвижности носителей заряда (ионов) в растворах. Известно, что электропроводность жидкости примерно линейно зависит от температуры для воды с растворенными солями. Понижение с 21°C до 6°C ($\sim 15\text{ K}$ разницы) даст снижение проводимости $\sim 30\%$ [1]. В наших данных импеданс вырос на $\sim 40\text{--}50\%$, что несколько больше, но надо помнить, что проводимость связана с импедансом нелинейно (через сложную геометрию тока и емкостные пути). Кроме того, возможно небольшое влияние и других факторов: при охлаждении ткани могут меняться свойства мембран (например, жирные кислоты в мембране становятся более вязкими, переходя в менее жидкое состояние). Это усиливает активное сопротивление мембран и увеличивает время релаксации диполей, уменьшая диэлектрическую проницаемость. С точки зрения эквивалентной схемы, емкость мембран при пониженной температуре может снижаться, а сопротивление — расти. Поэтому рост полного импеданса биоткани при охлаждении — ожидаемое явление.

Стоит подчеркнуть, что *изменения от умеренного охлаждения обратимы*. После возвращения образца к первоначальной температуре его импеданс почти вернулся к исходным значениям. Небольшое расхождение (в сторону меньшего сопротивления после цикла охлаждения / отогрев) может быть следствием микрповреждений: хотя $+6^{\circ}\text{C}$ еще далеко от точки замерзания, возможно, часть клеток ощутила холодовой шок, что слегка повысило их проницаемость. Однако в целом, можно считать, что структура ткани сохранилась, о чем свидетельствует схожая форма кривой $Z(\nu)$ до и после. Для живых тканей организма такое умеренное охлаждение (например, охлаждение конечностей) также приводит к увеличению сопротивления и уменьшению кровотока, но при возвращении температуры физиологические параметры восстанавливаются. В практике медицины это важно: электродиагностические исследования (например, те же реографии) требуют учитывать температуру пациента, так как холодные конечности дадут более слабый сигнал из-за повышенного импеданса. Поэтому обследования проводят в комфортных температурных условиях.

Влияние нагревания. Нагрев до 54°C вызвал глубокие изменения электрических свойств ткани. Снижение импеданса на порядок и более свидетельствует о резком росте проводимости. Первоначально, пока температура повышалась постепенно, этому способствовал чисто физический фактор — уменьшение вязкости и рост ионной подвижности, как уже обсуждалось. Но при превышении $\sim 50^{\circ}\text{C}$ включаются биохимические и структурные факторы: начинается денатурация бел-

ков и гибель клеток. В картофеле это сопровождается «развариванием» ткани — примером тому служит размягчение вареного картофеля.

В электрическом эквиваленте происходят следующие изменения: мембранные емкости разрушаются (мембраны перестают удерживать заряд, пробой), внутреннее содержимое клеток смешивается с наружным, уменьшается доля непроводящих структур. Биоткань превращается фактически в однородный проводящий гель. Импеданс такой среды близок к импедансу простого электролита, определяемого концентрацией солей. Это и показали измерения: при 54 °C импеданс почти не зависит от частоты, что указывает на исчезновение емкостного элемента, осталось в основном активное солевое сопротивление. Более того, численно ~ 200 Ом для картофеля соотносится с сопротивлением физиологического раствора схожих размеров. Таким образом, гипотеза о разрушении структуры подтверждается экспериментально.

После охлаждения разрушенной ткани до комнатной температуры ее импеданс остался низким (даже чуть снизился по сравнению с горячим состоянием). Этот результат демонстрирует необратимость теплового повреждения. В живых системах подобное происходит при ожогах: прогрев тканей выше ~ 50 °C убивает клетки, изменяя их электропроводность. Буквально в 2023 году сообщалось о применении импедансометрии для определения степени термического повреждения мышечной ткани — там в диапазоне 1–10 МГц также наблюдалось снижение импеданса вплоть до полного исчезновения частотной зависимости при коагуляции белков [2]. Наш опыт наглядно подтверждает: если охлаждение давало обратимый эффект, то сильный нагрев — нет. Для студента-медика отсюда прямой вывод: *температурные травмы (обморожения, ожоги) можно диагностировать с помощью измерения электрического импеданса*. Более того, различие в характере спектра импеданса (сохранилась или нет дисперсия) может указать на степень повреждения ткани. Например, в методах тепловой абляции опухолей, основанных на локальном нагревании ткани (радиочастотной или микроволновой), используется измерение импеданса: падение его ниже определенного порога и исчезновение частотной зависимости свидетельствуют о полной коагуляции ткани [6].

Эксперимент позволяет не только изучить физические закономерности изменения импеданса биотканей при различных температурах, но и наглядно показать их практическое значение. Это делает лабораторную работу особенно важной в образовательном процессе подготовки студентов-медиков.

Студенты на практике своими руками убедились, что живые ткани обладают сложными электрическими свойствами. Они увидели, как физические факторы (температура) влияют на биологические объекты на электрическом уровне. Важно, что эти эффекты имеют прямые аналоги в медицине: сужение от холода — рост сопротивления, гиперемия от тепла — падение сопротивления, некроз ткани — резкое изменение электрических свойств. Такой междисциплинарный подход (физический эксперимент + биологическая интерпретация) развивает системное мышление у будущих врачей [7]. Кроме того, освоены при-

борные навыки: работа с осциллографом, умение рассчитывать эффективные значения, умение распознавать шумы и помехи [8]. Эти умения пригодятся им и при эксплуатации медицинской аппаратуры (где тоже есть экраны, графики, помехи).

Заключение

Методические аспекты. В работе показано, что для получения достоверных результатов требуется выдержка образцов при заданной температуре, применение малого стабильного тока, корректная обработка осциллографических данных. Любые артефакты (шумы, нестабильность на высоких частотах) нужно выявлять и учитывать при анализе. В противном случае можно неверно интерпретировать наблюдения. Студенты–медики на практике убедились, что тщательность выполнения эксперимента напрямую влияет на качество научных выводов — это принципиально и для клинических исследований.

Дидактическое значение. Лабораторная работа позволила связать теоретические знания по физике (электричество, переменный ток, импеданс, диэлектрики) с их проявлением в реальном биологическом объекте. Такая интеграция знаний физики и биологии углубляет понимание процессов, лежащих в основе работы живого организма [9]. Через эксперимент с картофелем (аналогом ткани) студенты постигли, почему, например, холодная кожа электрически «сухая» (плохо проводит, импеданс высок) — что влияет на показания датчиков, или почему при воспалении (нагреве, притоке крови) электрическое сопротивление тканей падает. Эти сведения расширяют кругозор будущих врачей, готовят их к работе с приборами физиологической диагностики (ЭКГ, реографы, импедансные томографы) и формируют понимание того, как физические факторы среды влияют на организм [10].

Таким образом, цель работы — изучить температурное влияние на импеданс биообъекта — достигнута. Экспериментально подтверждены ключевые ожидаемые эффекты: рост Z при охлаждении и падение при нагревании, а также выявлена разница между обратимыми и необратимыми изменениями. Результаты согласуются с литературными данными и современными представлениями биофизики тканей. Работа подчеркивает, что импедансометрия — ценный инструмент не только для научных исследований, но и для образовательных целей, наглядно демонстрирующий междисциплинарные связи между физикой и медициной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ayllon D., Seoane F., Gil-Pita R. Cole equation and parameter estimation from electrical bioimpedance spectroscopy measurements: a comparative study // Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). — 2009. — P. 3779–3782.
2. Изучение дисперсии импеданса биологических тканей / В. Н. Маликов, П. А. Шмыкова, Д. А. Фадеев [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2023. — № 8. — С. 245–249.

3. Lorenzo M.F., Bhonsle S.P., Arena C.B., Davalos R.V. Rapid impedance spectroscopy for monitoring tissue impedance, temperature, and treatment outcome during electroporation-based therapies // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 2021. — Vol. 68, No. 5. — P. 1536–1546.
4. Fuentes A., Vázquez-Gutiérrez J.L., Pérez-Gago M.B., Vonasek E., Nitin N., Barrett D.M. Application of nondestructive impedance spectroscopy to determination of the effect of temperature on potato microstructure and texture // *Journal of Food Engineering*. — 2014. — Vol. 133. — P. 16–22.
5. Авачева Т.Г., Ельцов А.В., Кривушин А.А. Физика: Лабораторный практикум по дисциплине «Физика, Математика» для обучающихся по специальности Лечебное дело. Часть 1. — Рязань: Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова, 2019. — 176 с.
6. Торнурев Ю.В., Непомнящих Д.Л., Никитюк Д.Б. и др. Диагностические возможности неинвазивной биоимпедансометрии // *Фундаментальные исследования*. — 2014. — № 10–4. — С. 782–788.
7. Авачева Т.Г., Кривушин А.А. Физический практикум в условиях дистанционного обучения // *Инновационные технологии в медицине: взгляд молодого специалиста: Сборник докладов VI Всероссийской научной конференции молодых специалистов, аспирантов, ординаторов*, Рязань, 08 октября 2020 года. — Рязань: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2020. — С. 53–55.
8. Куимов А.С., Зуев П.В. Формирование элементов технической грамотности учащихся при проведении физического эксперимента // *Учебная физика*. — 2024. — № 2. — С. 58–65.
9. Вараксина Е.И., Майер В.В., Долженко А.В. Гемодинамическая модель сердца для демонстрационных опытов на уроках физики и биологии // *Учебная физика*. — 2025. — № 2. — С. 3–12.
10. Авачева Т.Г., Кривушин А.А. Формирование базовых представлений о функционировании организма человека в курсе физики медицинского университета // *Естественнонаучные основы медико-биологических знаний: Материалы III Всероссийской конференции студентов и молодых ученых с международным участием*, Рязань, 29 апреля 2021 года. — Рязань: Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова, 2021. — С. 161–163.

Рязанский государственный
медицинский университет
имени академика И.П.Павлова

Поступила в редакцию 30.04.25.