

МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ
Українська медична стоматологічна академія

«Затверджено»
на засіданні кафедри
медичної інформатики,
медичної і біологічної фізики
«27» серпня 2020 р.
протокол №1 від «27» серпня 2020 р.
Зав. кафедри _____ доцент Сілкова О.В.



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТІВ
ПІД ЧАС ПІДГОТОВКИ ДО ПРАКТИЧНОГО (СЕМІНАРСЬКОГО)
ЗАНЯТТЯ

| | |
|----------------------|---|
| Навчальна дисципліна | Медична і біологічна фізика |
| Модуль №2 | Основи медичної фізики |
| Змістовний модуль | Електродинаміка, її медичне застосування. Основи медичної апаратури. |
| Тема заняття | Електрокінетичні явища. Електрофорез. |
| Курс | I,II |
| Факультет | Медичний №1,2, стоматологічний |

Актуальність теми:

Живі тканини організму є композиційними середовищами, що містять такі структурні елементи, як провідники, діелектрики, та напівпровідники. Дія електричного поля на організм пов'язана в основному з двома процесами: поляризацією – виникненням дипольного моменту в тканинах та рухом заряджених частинок – їх появою та зміною концентрації, які призводять до порушення нормального для клітини розподілу зарядів і, як наслідок, її функцій.

Крім того на сьогодні є чимало експериментальних фактів, які свідчать про вплив магнітних полів (сильних чи слабких) на біологічні об'єкти. Це стосується, наприклад, їх впливу на властивості крові, інтенсивності водного обміну, активності багатьох ферментів, впливу різких змін напруженості магнітного поля Землі (магнітні бурі) на самопочуття людей тощо. За допомогою магнітних полів вдається впливати на хід деяких біологічних процесів і хімічних реакцій.

На даному етапі роль електрокінетичних явищ, які відбуваються в складних гетерогенних системах – клітинах і тканинах живих організмів (в нормі і патології), вивчена ще далеко недостатньо. Тому задачею біофізичних експериментів є вивчення молекулярних фізико-хімічних явищ і перетворень, що лежать в основі первинних механізмів біологічних процесів.

2. Конкретні цілі:

- *Аналізувати* фізичні процеси, що відбуваються при дії електричного та магнітного полів на живі тканини організму.
- *Пояснювати* поняття: густина електричного струму; рухливість іонів, електрокінетичний потенціал.
- *Запропонувати* метод визначати рухливість іонів гідроксилу.
- *Трактувати* природу поляризації діелектриків, електрофорезу, електроосмосу, іонофорезу, потенціалу течії, потенціалі седиментації, подвійного електричного шару.
- *Малювати* найпростіші електричні схеми, графіки.
- *Проаналізувати* закон Ома в диференціальній формі та формули для визначення електрокінетичного потенціалу.

3. Базові знання, вміння, навички, необхідні для вивчення теми (міждисциплінарна інтеграція)

| Назви попередніх дисциплін | Отримані навички |
|----------------------------|--------------------------------|
| 1. фізика | Малювати електричні схеми |
| 2. математика | Розраховувати значення величин |

4. Завдання для самостійної роботи під час підготовки до заняття.

4.1. Перелік основних термінів, параметрів, характеристик, які повинен засвоїти студент при підготовці до заняття:

| № п/п | Термін | Визначення |
|-------|------------------------|--|
| 1 | Електрокінетичне явище | Електрокінетичні явища – група явищ, які спостерігаються в дисперсних системах, мембранах і капілярах; включає електроосмос, електрофорез, |

| | | |
|---|------------------|---|
| | | потенціал протікання і потенціал осідання (седиментаційний потенціал, або ефект Дорна). |
| 2 | Електроосмос | Напрявлене переміщення рідини в пористому тілі під дією прикладеної різниці потенціалів. |
| 3 | Електрофорез | Напрявлений рух рідин (води, водних розчинів) у капілярах пористої системи в електричному полі постійного струму під впливом електрокінетичних сил, що виникають внаслідок взаємодії прикладеної різниці потенціалів та заряду подвійного електричного шару на границі розділу фаз. |
| 4 | Рухливість іонів | Стала величина стала для кожного іона, вона пропорційна його абсолютній швидкості та залежить від температури та природи розчинника. Рухливість іона дорівнює добутку його абсолютної швидкості U на сталу Фарадея F . |

4.2. Теоретичні питання до заняття:

1. Як себе поведуть діелектрики в електричному полі?
2. Як себе поведуть провідники в електричному полі?
3. Назвати і охарактеризувати основні типи поляризації.
4. Що є носіями електричного заряду в тканинах організму?
5. Яка величина кількісно характеризує електричний струм?
6. Сформулювати і записати закон Ома в диференціальній формі.
7. Що називають рухливістю вільних носіїв?
8. Від чого залежить рухливість іонів?
9. Від чого залежить густина струму в провіднику?
10. Які магнітні властивості мають біологічні тканини?
11. Охарактеризувати електрокінетичні явища?
12. Назвати види електрофорезу та їх використання в медицині.
13. Що являє собою електрокінетичний, або дзета-потенціал?
14. Що називається подвійним електричним шаром?

4.3. Практичні роботи (завдання), які виконуються на занятті:

- оволодіти технікою розв'язку типових задач;
- набути навичок розв'язування задач;
- вміти визначати рухливість іонів методом електрофорезу на папері.

| Задача | Послідовність виконання | Зауваження, попередження, щодо самоконтролю |
|----------------------------------|---|---|
| Підготувати установку до роботи. | 1. Встановити камеру приладу для електрофорезу на папері горизонтально. | Обережно! Зверніть увагу на |

| | | |
|--------------------------------|--|--|
| | <p>2. Залити буферний розчин в дві окремі посудини.</p> <p>3. Підготувати смужки хроматографічного паперу (нарізати вздовж волокон смуги 25x250 мм).</p> <p>4. Переконайтеся, що органи управління блоку живлення знаходяться в початковому положенні.</p> | <p>те, щоб рівень розчину був менше ніж бортик, який розділяє посудини.</p> |
| Провести експеримент | <p>1. Змочити буферним розчином смужку хромографічного паперу і накласти її на діелектричну платівку, яка з'єднує ці посудини так, щоб кінці смужки були опущені в буфер.</p> <p>2. На середині смужки розмістити нитку, змочену в розчині досліджуваного препарату.</p> <p>3. Ванну закрити і підключити до блоку живлення.</p> <p>4. Увімкнути прилад в мережу, встановити напругу 60В і зафіксувати початковий момент часу.</p> <p>5. Через 7-10 хвилин вимкнути напругу, зняти кришку і капнути розчин фенолфталеїну на нитку.</p> <p>6. Виміряти ширину пофарбованої смужки, яка виникла там, де вздовж паперу пройшли іони гідроксиду і прореагували з фенолфталеїном.</p> <p>7. Повторити експеримент двічі для 80 В і 100 В.</p> | <p>Обережно!</p> <p>Дотримуйтесь правил техніки безпеки під час роботи з хімічними реактивами!</p> <p>Ванну щільно закрити!</p> <p>Дотримуйтесь правил техніки безпеки при роботі з електричними приладами!</p> <p>Результати занести в таблицю.</p> |
| Обробити результати вимірювань | <p>1. Розрахувати рухливість для трьох випадків.</p> <p>2. Обчислити середнє значення і похибку вимірювань.</p> | <p>Результати занести в таблицю</p> |

Зміст теми:

Тканини організму є композиційними середовищами, причому одні структурні елементи можуть бути провідниками, інші діелектриками, деякі – напівпровідниками.

Діелектрики поділяються на полярні та неполярні. Діелектрики, в молекулах яких центри просторового розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються, називають *неполярними* (H_2 , N_2 , CO_2 , CCl_4 , парафін, бензол та інші вуглеводи).

Полярними називають молекули, в яких центри позитивних і негативних зарядів не збігаються (H_2O , NO_2 , HCl , CHCl , органічні кислоти тощо). За відсутності зовнішнього електричного поля дипольний момент неполярних молекул дорівнює нулю, а полярні молекули мають власний дипольний момент $p = ql$. В зовнішньому електричному полі діелектрики поляризуються. Механізми поляризації діелектрика різноманітні і залежать від характеру хімічного зв'язку атомів у молекулі. Для біологічних тканин характерні різні типи поляризації.

Орієнтаційна поляризація виникає внаслідок спільної дії двох факторів (зовнішнього поля, яке намагається зорієнтувати полярні молекули вздовж силових ліній і хаотичного теплового руху), при цьому у діелектрику з'являється переважаюча орієнтація молекулярних диполів у напрямку поля.

Деформаційна (електронна) поляризація обумовлена зміщенням електричних зарядів в атомах і молекулах під дією зовнішнього електричного поля, що призводить до появи дипольного моменту у цих частинок.

Іонна поляризація (поляризація іонного зміщення) виникає під дією зовнішнього поля в іонних кристалах (наприклад, NaCl) внаслідок зміщення підґраток, які утворені позитивними і негативними іонами, у протилежні боки. При цьому на поверхні діелектрика з'являється зв'язаний заряд.

У деяких речовин (п'єзоелектрики) при механічних деформаціях у певних напрямках виникає електрична поляризація навіть за відсутності електричного поля (прямий п'єзоэффект). Наслідком прямого п'єзоэффекту є зворотний п'єзоэффект – поява механічних деформацій під дією електричного поля. Суттєвий п'єзоэффект виникає в кістковій тканині за наявності деформації зсуву, а також в сухожиллях і шкірі. Причина ефекту деформація колагену, основного білка з'єднувальних тканин.

Поляризація сегнетоелектриків зводиться до орієнтації доменів у зовнішньому полі У їх кристалах при відсутності зовнішнього електричного поля існують області, всередині яких дипольні моменти молекул однаково направлені. Такі області *самовільної (спонтанної) поляризації* називають доменами. Сегнетоелектрики зберігають деяку залишкову поляризацію навіть після припинення дії зовнішнього електричного поля.

Крім описаних раніше, суттєву роль відіграє *об'ємна поляризація* (ефект Максвелла-Вагнера), яка має місце в електрично ізольованих від оточуючого середовища об'ємах (наприклад, клітинах).

Діелектричні властивості живих тканин визначаються біоструктурами, які за значеннями дипольних моментів можна поділити на три групи.

До першої групи належать внутрішньоклітинні органоїди, значення їхніх дипольних моментів є максимальними. Для цих об'єктів характерна власна (спонтанна) поляризація. Властивості таких утворень обумовлені, по-перше, їхньою шаруватою структурою, по-друге, наявністю різниці потенціалів на межі шарів із суттєво відмінними значеннями електропровідності. Клітинні органоїди є, по суті, замкненими об'ємами, утвореними біомембраною – типовим діелектриком, заповнені та оточені електролітом. За поведінкою в електричному полі та значеннями дипольних моментів такі внутрішньоклітинні органоїди подібні до доменів сегнетоелектрика. Завдяки їхній наявності живі тканини мають значну діелектричну проникність і деякі інші сегнетоелектричні властивості.

Другу групу складають біологічно активні полярні макромолекули, що містяться як у цитоплазмі, так і у мембранах.

До третьої групи належать, в основному, молекули води і розчинених в ній різних неорганічних речовин.

Рух вільних носіїв, в основному іонів, у постійному електричному полі напруженості E призводить до порушення звичного для клітини розподілу зарядів і, як наслідок, її функцій. На дії постійного електричного поля високої напруженості ($E=10^4 - 10^6 \text{В/м}$) на весь організм або окремі його ділянки базується лікувальний метод – *франклінізація*.

Якщо в електричне поле помістити провідник то в ньому виникне впорядкований (напрявлений) рух електричних зарядів – *електричний струм*. Електричний струм має теплову, хімічну і магнітну дії, причому магнітна дія струму проявляється в усіх без винятку провідниках, хімічна дія проявляється переважно в електролітах. Кількісно електричний струм характеризується густиною електричного струму.

Густина струму j векторна величина, яка має напрям середньої швидкості v впорядкованого руху позитивних носіїв струму і дорівнює відношенню сили струму dI до площі поперечного перерізу провідника dS , через яку цей струм проходить:

$$j = \frac{dI}{dS} \quad (1)$$

Розмірність густини струму $[j] = \text{А/м}^2$.

Згідно закону Ома в диференціальній формі: густина струму пропорційна напруженості електричного поля і має однаковий з нею напрям.

$$j = \sigma E \quad (2)$$

Закон Ома в такому вигляді встановлює зв'язок між величинами, які відносяться до даної точки провідника (локально), тому він застосовний і до неоднорідних провідників, якими є тканини організмів.

Багато біологічних середовищ (кров, спинномозкова рідина та інші) є електролітами. Як відомо, носії струму в електролітах це позитивні і негативні іони, які виникають у результаті електролітичної дисоціації.

Припустимо, що кожна нейтральна молекула дисоціює на два іони. Тоді концентрації позитивних та негативних іонів будуть однаковими $n_+ = n_- = \alpha n$, де α коефіцієнт електролітичної дисоціації, n число нейтральних молекул розчиненої речовини в одиниці об'єму. Звідси маємо:

$$j = \alpha n q_0 (v_+ + v_-). \quad (3)$$

Швидкість впорядкованого руху іонів прямо пропорційна до напруженості поля

$$v = bE. \quad (4)$$

Коефіцієнт пропорційності b називається рухливістю носіїв. **Рухливість** b чисельно дорівнює швидкості впорядкованого руху в полі з напруженістю $E=1\text{В/м}$:

$$b = \frac{v}{E}, [b] = \text{м/с} \cdot \text{м/В} = \text{м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с}).$$

Величина рухливості залежить від заряду носія q_0 , його маси m , а також від часу вільного пробігу τ : $b = \frac{q_0 \tau}{m}$. Значення рухливості для деяких іонів подані в таблицях.

Для іонів різного знака $v_+ = b_+ E$, $v_- = b_- E$, тоді для густини струму отримаємо

$$j = \alpha n q_0 (b_+ + b_-) E \quad (5)$$

Порівнявши (5) з (2), бачимо, що питома електропровідність σ для електролітів:

$$\sigma = \alpha n q_0 (b_+ + b_-). \quad (6)$$

Видно, що провідність зростає відповідно до зростання коефіцієнта дисоціації, концентрації молекул електроліту, заряду носіїв, рухливості іонів. Із зростанням температури питомий опір електролітів зменшується. Це відбувається, по-перше, завдяки збільшенню коефіцієнта дисоціації з ростом температури; по-друге, завдяки зменшенню в'язкості рідин, в результаті чого збільшується рухливість іонів.

Електропровідність окремих ділянок залежить від опору шкіри і підшкірного шару в місцях накладання електродів. Опір шкіри, в свою чергу, визначається віком, товщиною, пітливістю тощо. Біологічні тканини мають досить неоднорідну електропровідність. В них складним чином чергуються ділянки з високою провідністю (біологічні рідини) і низькою (шкіра, кісткова і жирова тканини, мембрани клітин та клітинних органів).

Первинна дія постійного струму на організм пов'язана в основному з двома процесами: поляризацією – виникненням дипольного моменту в тканинах та рухом заряджених частинок – їх появою і зміною концентрації, які призводять до порушення нормального для клітини розподілу зарядів і, як наслідок, її функцій.

Постійний струм з напругою $U \sim 60-80\text{В}$ використовується з лікувальною метою в *гальванізації*. При цьому густина струму не повинна перевищувати $j_{\text{max}} = 0.1\text{мА/см}^2$.

Електрофорез – ще одна лікувальна методика, яка базується на пропусканні постійного струму.

Рух фаз гетерогенної системи одна відносно іншої при накладанні зовнішнього електричного поля або ж виникнення різниці потенціалів у системі при механічному русі фаз під дією яких-небудь сил відносять до *електрокінетичних явищ*. До таких явищ відносяться електрофорез, електроосмос, потенціали плинну (протікання) і потенціали осідання (седиментації).

У складних гетерогенних системах під дією електричного поля рухаються не тільки електрони та іони, а є зважені в рідині тверді частинки, бульбашки, крапельки іншої рідини (електрофорез), при цьому сама рідина рухається в протилежному напрямку (електроосмос).

Стінки пор шкіри мають електричний заряд, а самі пори зазвичай заповнені повітрям, тому проникність шкіри для різних речовин незначна. В електричному полі пори ділянки шкіри заповнюються рідиною внаслідок електроосмотичного руху рідини зсередини на зовні, що дає можливість вводити через шкіру різні лікувальні препарати. Цей процес є результатом взаємодії двох явищ – електрофорезу самих частинок і протилежно направленою електроосмосу води.

Електрокінетичні явища, що протікають в тканинах, використовуються в клінічній медицині з метою введення лікарських речовин не лише через шкіру – її пори, а й волосяні луковиці, потові і сальні залози та слизові оболонки. Якщо активним елементом лікарської речовини є іони, то цей метод має назву *іонофорез*, якщо хімічні сполуки у вигляді частинок, колоїдів, крапель *катафорез*. З прокладки під анодом в організм вводять іони металів із розчинів їх солей, складні алкалоїди (хінін),

синтетичні речовини (новокаїн), а також позитивно заряджені частинки й крапельки. З прокладки під катодом вводять кислотні радикали, а також негативно заряджені частинки.

Особливістю електрофорезу є те, що з'являється можливість ввести лікарську речовину безпосередньо в зоні ураження й тому суттєво зменшити дозу. Саме тому електрофорез широко застосовується в стоматології для проведення лікування в порожнині рота.

Оскільки рухливість – величина, характерна для даного типу іонів, то за її значенням можна встановити вид іонів, або, якщо є суміш іонів, розділити їх в електричному полі. Цю особливість використовують для аналізу сироватки крові, шлункового соку електрофоретичним методом. Фракції білків (альбуміни, α -, β -, γ -глобуліни) мають різні значення рухливості, тому їх можна розділити електричним полем, а потім і визначити їхні концентрації за допомогою фотометра.

Потенціали течії виникають в результаті руху рідини через капіляри або пори пористої перегородки під впливом різниці гідростатичного тиску.

Потенціали седиментації можуть виникати в гетерогенному середовищі під впливом сили тяжіння між верхніми і нижніми шарами системи. Седиментаційний метод є найбільш поширеним для визначення молекулярної маси біомакромолекул.

Електрокінетичні явища можна спостерігати під час міграції лейкоцитів в зону запалення

Електричний заряд на поверхні клітин і біосубстратів виникає в результаті адсорбції іонів на поверхні неіоногенних частинок, або за рахунок іонізації дисоціюючих груп дисперсної фази. В результаті іонізації цих груп проти-іони виходять в дисперсне середовище, а потенціалоутворюючі іони залишаються зафіксованими на поверхні частинок дисперсної фази і відповідають за знак її потенціалу

Величину дзета-потенціалу можна розрахувати тільки шляхом вимірювання швидкості руху фази в електричному полі за формулою Смолуховського: $\zeta = \frac{4\pi\eta v}{\varepsilon E}$.

Ця формула може бути використана для лейкоцитів, еритроцитів, мікроорганізмів і інших клітин, але не для молекулярних частинок. Для білкових молекул і невеликих за розмірами частинок, радіус яких порівняний з товщиною подвійного електричного шару, електрофоретична рухливість залежить як від форми так і від розмірів частинок. Електрокінетичний потенціал розраховується в цих випадках за формулою Дебая і

Гюккеля: $\zeta = k \frac{\pi\eta v}{\varepsilon E}$.

Найбільш широке використання для визначення електрокінетичного потенціалу біологічних об'єктів отримали макро- і мікрометоди електрофорезу.

5. Матеріали для самоконтролю:

А. Завдання для самоконтролю:

1) Густина електричного струму провідності ...

А. не залежить від концентрації носіїв заряду в провіднику;

Б. обернено пропорційна концентрації носіїв заряду в провіднику;

- В. прямо пропорційна концентрації носіїв заряду в провіднику;
Г. не дорівнює нулю;
Д. визначається тільки концентрацією носіїв заряду в провіднику.
- 2) Рухливість іона при протіканні постійного струму через електроліт (електрофоретична рухливість) чисельно рівна швидкості його ...
А. руху по колу;
Б. випаровування;
В. прискореного руху;
Г. рівномірного руху при одиничній напруженості електричного поля;
Д. прискореного руху при одиничній напруженості електричного поля.
- 3) З підвищенням температури (за інших рівних умов) рухливість іонів в розчинах електролітів ...
А. зменшується;
Б. не змінюється;
В. зростає;
Г. стає рівним нулю;
Д. стає дуже малою, але завжди відмінної від нуля.
- 4) Електрофоретична рухливість іонів, що вийшли в результаті електролітичної дисоціації у водних розчинах електролітів ...
А. може бути різною у катіонів і аніонів;
Б. і у катіонів і у аніонів дорівнює нулю;
В. завжди однакова у катіонів і аніонів;
Г. у аніонів дорівнює нулю, у катіонів більше нуля;
Д. у катіонів дорівнює нулю, у аніонів більше нуля.
- 5) Аналітичний і препаративний електрофорез глобулярних білків заснований на тому, що ...
А. у електрофоретичному середовищі створюється неоднорідне магнітне поле;
Б. у електрофоретичному середовищі створюється однорідне магнітне поле;
В. у електрофоретичному середовищі створюється неоднорідне електричне поле;
Г. електрофоретичні рухливості у молекул різних білків однакові;
Д. електрофоретичні рухливості у молекул різних білків різні.
- 6) Ефект дії на організм людини при процедурі лікувального електрофорезу визначається ...
А. поєднанням дії одно направленого електричного струму провідності і лікарської речовини в іонізованій формі;
Б. поєднанням дії змінного електричного струму провідності і лікарської речовини в іонізованій формі;
В. дією постійного струму провідності;
Г. дією струму зсуву;
Д. тільки введеною лікарською речовиною.
- 7) При лікарському електрофорезі з позитивного електроду в організм людини вводяться іони:

- A) Na ;
- B) Ca ;+
- C) Cl ;
- D) Mg ;
- E) Br .

- 8) Зворотні електрокінетичні явища називаються:
- A) потенціал течії;
 - B) потенціал седиментації;
 - C) потенціал обертання;
 - D) потенціал деформації.
- 9) Електроосмос у лікарському електрофорезі...
- A) забезпечує рух лікарської речовини;
 - B) протистоїть руху лікарської речовини;
 - C) розкладає лікарську речовину на іони;
 - D) зволожує шкіру.
- 10) До прямих електрокінетичних явищ належать:
- A) осмос;
 - B) електроосмос;
 - C) дифузія;
 - D) електрофорез.
- 11) Лікарський метод при якому використовується на живій тканині організму постійного струму малої сили називається...
- A) франклінізація;
 - B) дарсонвалізація;
 - C) гальванізація;
 - D) електрофорез.
- 12) При лікарському електрофорезі вводяться в організм людини з позитивного електроду:
- A) Новокаїн(+);
 - B) Хінін(+);
 - C) Пеніцилін(-)(із натрієвої або калієвої солі);
 - D) Радикали саліцилової кислоти(-);
 - E) Радикали фосфорної кислоти(-).

Б. Задачі для самоконтролю:

Задача 1. Знайти кількість іонів йоду, які будуть введені пацієнту за 10хв при густині струму 0.05 A/cm^2 з електрода площею 5 cm^2 .

Задача 2. Знайти густину струму в електроліті, якщо концентрація іонів у ньому $n=10^5 \text{ cm}^{-3}$; їх рухливості $b^+ = 4.65 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{c}$; $b^- = 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{c}$ і напруженість електричного поля $E=10 \text{ V/cm}$. Вважаючи густину струму всюди однаковою, знайти силу струму, якщо площа кожного електрода $S = 1 \text{ dm}^2$. Іони одновалентні.

Література:

Основна:

1. Губанов Н.И., Утепбергенов А.А. Медична біофізика. – М.: Медицина, 1978. – 335с. С. 124-167.
2. Лабораторний практикум з біофізики/ Доценко В.І. та ін. – Полтава 2004. – 191с. С. 148-151.
3. Ливенцев Н.М. Курс физики. Ч.2 – М.: Высшая школа, 1978. – 333с. С. 154-172.
4. Медична і біологічна фізика. Т.1 /За ред. О.В.Чалого.– К.: ВПОЛ, 2001.415с. С. 260-289.
5. Медична і біологічна фізика(практикум)/ За ред. О.В.Чалого. – К.: Книга-плюс, 2003. – 217с. С. 63-66.
6. Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика. – М.: Высшая школа, 1987. – 638с. С. 278-284; 286-289; 308-314; 342-348.

Додаткова:

1. Горский Ф.К., Сакевич Н.М. Физический практикум с элементами электроники. – Минск: Высшая школа, 1980 – 272с. С.149-152.
2. Григоров О.Н. Электрокинетические явления. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1973. – 199с.
3. Тиманюк В.А., Животова Е.Н. Биофизика. – Харьков: Изд. НФАУ, 2003. – 704с. С. 269-275.