

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 615.843

Друц
Элина Викторовна

Модель введения лекарственных препаратов под действием электрического
тока

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание степени магистра

по специальности 7-06-0713-02 Электронные системы и технологии

Научный руководитель

Камлач Павел Викторович
кандидат технических наук, доцент

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

В современной медицине и фармакологии особое внимание уделяется методам направленной доставки лекарственных препаратов, позволяющим повысить эффективность терапии и минимизировать побочные эффекты. Одним из таких методов является лекарственный электрофорез – процесс переноса ионов лекарственного вещества под действием внешнего электрического поля. Этот метод находит применение в физиотерапии, лечении кожных заболеваний и локальной анестезии.

Метод лекарственного электрофореза позволяет создавать высокую локальную (в патологическом очаге) концентрацию препарата, не насыщая им весь организм. После электрофореза содержание лекарств в тканях области воздействия в несколько раз выше, чем после общепринятых способов введения той же дозы препарата.

Однако широкому внедрению электрофореза в клиническую практику мешает недостаточная изученность закономерностей распределения лекарств в тканях в зависимости от параметров воздействия (силы тока, времени экспозиции, свойств препарата). Математическое моделирование позволяет прогнозировать результаты и оптимизировать режимы воздействия.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с приоритетными направлениями научных исследований и запросами реального сектора экономики

Тема диссертационной работы соответствует пункту 2 «Биологические, медицинские, фармацевтические и химические технологии и производства» приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности Республики Беларусь на 2021–2025 годы, утвержденных Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г. Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Практическая ценность работы состоит в разработке математической модели и оптимизации параметров процесса лекарственного электрофореза.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка математической модели процесса лекарственного электрофореза.

В соответствии с поставленной целью, в работе сформированы и решены следующие задачи:

- разработать математическую модель, описывающую процесс проникновения лекарственного вещества в биологические ткани;
- провести численные эксперименты в программной среде для анализа зависимости глубины и скорости проникновения лекарства от параметров процедуры;
- разработать методику определения оптимальных параметров электрофореза с использованием математической модели.

Научная новизна и значимость полученных результатов

Разработана математическая модель, описывающую процесс проникновения лекарственного вещества в биологические ткани. Предложена методика оптимизации параметров электрофореза на основе численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту

Математическая модель лекарственного электрофореза, основанная на уравнениях фильтрации и электродинамики, адекватно описывает процесс проникновения лекарственного вещества в биологические ткани.

Методика определения параметров электрофореза на основе математической модели.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в изучении методик проведения процедуры электрофореза и построении математической модели для оптимизации параметров.

Определение цели и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились с научным руководителем, кандидатом технических наук, доцентом П.В. Камлачом.

Апробация результатов диссертации

- 17-я Международная научно-техническая конференция, 26-29 ноября 2024 года, Республика Беларусь, Минск.
- 60-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Электронные системы и технологии», Минск, 19-23 апреля 2024 года.
- 61-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов «Электронные системы и технологии», Минск, 18-22 апреля 2025 года.
- XIV Международная научно-техническая конференция «Медэлектроника 2024» Минск, 5-6 декабря 2024 года.
- 81 студенческая научно-техническая конференция «Цифровые технологии и бизнес», 15 мая 2025 года, Минск.

Опубликованность результатов диссертации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 6 печатных работах. В их числе 3 статьи в сборниках материалов научных конференций и 5 тезисов докладов на научных конференциях.

Структура и объем работы

Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка. Общий объем диссертаций – 40 страниц. Работа содержит 3 таблицы, 18 рисунков. Библиографический список включает 32 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен комплексный анализ физико-химических основ лекарственного электрофореза, включая законы Фарадея, механизмы электролитической диссоциации и ионной миграции. Рассмотрены современные методы электролечения (гальванизация, диадинамотерапия, амплипульстерапия) и их клиническое применение. Особое внимание уделено методикам лекарственного электрофореза и техническим характеристикам используемого оборудования, в частности аппарата "Поток-1".

Вторая глава посвящена разработке математической модели процесса электрофореза. После сравнительного анализа программных инструментов (MATLAB, COMSOL Multiphysics, ANSYS Fluent) выбран MATLAB как наиболее подходящая платформа для моделирования. Предложена оригинальная модель фильтрации, описывающая движение лекарственного вещества в тканях с учетом градиента концентрации и параметров электрического поля. Выведены ключевые уравнения для расчета скорости движения ионов и глубины проникновения препарата.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования и анализа зависимостей скорости и глубины проникновения лекарства от параметров процедуры. Эксперименты проводились при напряжениях 30-50 В и времени воздействия до 10 минут. Установлено, что увеличение напряжения до 50 В позволяет достичь глубины проникновения до 3,56 мм, при этом отмечается снижение скорости проникновения с увеличением глубины из-за роста сопротивления тканей. Результаты визуализированы в виде графиков зависимостей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого исследования были изучены физико-химические основы процесса лекарственного электрофореза, разработана и реализована математическая модель его протекания в биологических тканях, а также выполнена численная симуляция с использованием программной среды MATLAB. Целью работы являлось создание научно обоснованного инструментария для прогнозирования глубины проникновения лекарственных веществ под действием постоянного электрического тока и оптимизация параметров процедуры с точки зрения повышения её терапевтической эффективности.

На основе анализа физических и химических процессов, происходящих при воздействии электрического тока на растворы лекарственных веществ, была определена ключевая роль электролитической диссоциации, описанной теорией Сванте Аррениуса, и движение заряженных частиц под действием электрического поля. Установлено, что эффективность электрофореза зависит от множества факторов: свойств самого лекарства (заряд, масса, растворимость), параметров тока (напряжение, сила тока, форма импульсов), температурных условий, а также характеристик биологических тканей (проницаемость, сопротивление, структура).

Проведённый обзор программных инструментов позволил выбрать MATLAB в качестве основного средства для моделирования процесса. Выбор обусловлен его мощными вычислительными возможностями, наличием специализированных пакетов (например, Partial Differential Equation Toolbox), гибкостью программирования и возможностью визуализации трёхмерных полей скоростей и распределения концентрации лекарственного вещества.

Разработанная математическая модель описывает движение ионов лекарственного вещества в жировой ткани под действием электрического поля и учитывает следующие параметры:

- напряжённость электрического поля;
- масса и заряд иона;
- длина свободного пробега;
- температура;
- коэффициенты проникновения в ткань;
- время воздействия тока.

Модель основана на уравнении фильтрации, связывающем напор лекарственного вещества с градиентом его концентрации и скоростью движения под действием внешнего электрического поля. Получено итоговое уравнение, позволяющее рассчитать напор H , который используется для определения скорости и глубины проникновения препарата в ткань.

Численные эксперименты показали, что увеличение напряжения положительно влияет на эффективность доставки лекарства. Так, при напряжении 50 В за 10 минут процедуры глубина проникновения составила 3,56 мм, при 40 В – 1,46 мм, а при 30 В – всего 0,46 мм. Это свидетельствует о высокой чувствительности процесса к величине электрического поля и позволяет говорить о целесообразности использования повышенных значений напряжения в клинической практике при соблюдении безопасности пациента.

Кроме того, установлено, что с увеличением времени воздействия глубина проникновения возрастает практически линейно, что говорит о стабильности и предсказуемости процесса. Однако с ростом глубины наблюдается снижение скорости движения ионов, обусловленное увеличением сопротивления тканей и уменьшением градиента концентрации. Это указывает на необходимость оптимизации не только напряжения, но и длительности процедуры в зависимости от целевой глубины действия препарата.

Для наглядного представления результатов были построены графики зависимости глубины проникновения лекарства в жировую ткань от времени процедуры при напряжениях 30 В, 40 В и 50 В. Также выполнена визуализация векторного поля скоростей проникновения и пространственное распределение напора в трёхмерной сетке.

Результаты моделирования могут быть использованы для разработки рекомендаций по выбору оптимальных режимов проведения электрофореза, учитывающих индивидуальные особенности пациента и физико-химические свойства применяемых препаратов. Модель может служить основой для дальнейшего совершенствования аппаратуры и методик проведения электрофореза с целью повышения его эффективности и безопасности.

Таким образом, разработанная математическая модель представляет собой эффективный инструмент для прогнозирования поведения лекарственных веществ в тканях под действием электрического поля. Она открывает перспективы для персонализированного подхода к проведению лекарственного электрофореза и может быть внедрена в клиническую практику для повышения качества физиотерапевтического лечения.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1–А. Друц, Э. В. Модель действия электрического тока низкого напряжения на биологические ткани / Э. В. Друц, Т. С. Смольская // Электронные системы и технологии : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024. – С. 262–264.

2–А. Смольская, Т. С. Обзор программных средств для 3-D моделирования ушного импланта / Т. С. Смольская, Э. В. Друц // Электронные системы и технологии : сборник материалов 60-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024. – С. 326–328.

3–А. Моделирование и оптимизирование процесса электрофореза для доставки лекарственных веществ с использованием математических методов / Е. П. Франко [и др.] // Приборостроение-2024 : материалы 17-й Международной научно-технической конференции, 26-29 ноября 2024 года, Минск, Республика Беларусь. – Минск : Интегралполиграф, 2024. – С. 283-284.

4–А. Частотный анализ и вибрационные характеристики титанового протеза слуховых косточек / Т. С. Смольская [и др.] // Медэлектроника – 2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции. – Минск, 2024. – С. 153–155.

5–А. Алгоритм поиска отпечатка стопы на плантограмме / Е. А. Зуев [и др.] // Медэлектроника – 2024. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сборник научных статей XIV Международной научно-технической конференции. – Минск, 2024. – С. 222–225.

6–А. Смольская, Т. С. Получение 3D-модели среднего уха на основе компьютерной томографии / Т. С. Смольская, Э. В. Друц // Электронные системы и технологии : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024.

7–А. Друц, Э. В. Оптимизация подбора титанового протеза слуховых косточек с использованием методов вычислительной геометрии / Э. В. Друц, Т. С. Смольская, // Электронные системы и технологии : сборник материалов 61-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – Минск, 2024.

8–А. Друц, Э. В. Численная модель для расчёта параметров процесса электрофореза и её реализация в MATLAB / Э. В. Друц, Т. С. Смольская // Сборник материалов 81 студенческой научно-технической конференции «Цифровые технологии и бизнес» международного института дистанционного образования. – Минск, 2024.