



# **ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**

---

**Електротехнически факултет  
Катедра „Електрически апарати“**

**маг. инж. Момчил Димитров Шопов**

## **ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОЦЕСИ И АПАРАТИ ЗА ЕЛЕКТРООВЛАКНЯВАНЕ**

### **А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

на дисертация за придобиване на образователна и научна степен  
**"ДОКТОР"**

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника, електроника и  
автоматика

Научна специалност: „Електротехнологии“

**Научни ръководители:  
проф. д-р инж. Диляна Господинова  
доц. д-р инж. Костадин Миланов**

СОФИЯ, 2026 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Електрически апарати“ към Електротехнически факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 10.03.2026 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 04.06.2026 г. от 15,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-..... / .....2026 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. доц. д-р инж. Евгения Василева-Илиева – председател
2. проф. д-р инж. Петър Динев – научен секретар
3. проф. дн инж. Галина Чернева
4. проф. д-р инж. Георги Павлов
5. доц. д-р инж. Мартина Томчева

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Петър Динев
2. проф. дн инж. Галина Чернева

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет на ТУ-София, блок №12, кабинет № 12222.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електрически апарати“ на Електротехнически факултет. Изследванията, включени в дисертационния труд, са извършени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти: 1. NIS-251ПД0012-01; 2. Проект №: BG-RRP-2.004-0005, научна група: 3.4.11; 3. Договор № КП-06-Рила/7.

Автор: маг. инж. Момчил Шопов

Заглавие: Технологични процеси и апарати за електроовлажняване

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

## I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

### **Актуалност на проблема**

През последните две десетилетия технологичният процес на електроовлакняване (англ.: *electrospinning*) се утвърди като една от най-ефективните технологии за получаване на ултрафини (микро- и нано) влакна с контролирана морфология, високо специфично отношение повърхност към обем и добре развита порьозност [1]. Благодарение на тези характеристики нановлакнестите материали намират широко приложение в области като филтрация и мембранни технологии, електротехника и електроника, сензорни системи, енергийни устройства и биомедицински материали.

Значителният научен интерес към електроовлакняването се потвърждава от нарастването на броя научни публикации през последните години. В обзорни изследвания се посочва, че от началото на XXI век са публикувани десетки хиляди научни труда, като през последните години броят на публикациите достига няколко хиляди годишно [2]. Това показва устойчив интерес към технологията и постепенно пренасочване на изследванията към инженерни разработки, свързани с моделиране и оптимизация на процеса [3].

Паралелно с научния интерес се наблюдава и нарастващо индустриално значение на електроовлакняването. Пазарните анализи показват устойчив растеж на глобалния пазар на нановлакнести материали, свързан с увеличаващото се търсене на влакнести структури за филтрация, защитни материали и функционални покрития [4], [5]. Развитието на лабораторни и индустриални апаратни решения показва, че електроовлакняването постепенно се утвърждава като технологичен процес с реален индустриален потенциал.

Въпреки този напредък процесът електроовлакняване остава силно многофакторен и чувствителен към редица технологични фактори. Въпреки значителния обем научни изследвания, в литературата липсва систематичен инженерен подход, който да интегрира експериментално изследване, математическо моделиране и оптимизация на процеса на електроовлакняване в рамките на единна методология. Това налага разработването на инженерни методи за анализ и оптимизация на процеса, както и изследване на възможностите за комбинирането му с методи за повърхностна модификация, като обработка със студена технологична плазма при атмосферно налягане.

**Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване**

*Основната цел на настоящия дисертационен труд е разработването и прилагането на интегриран научноприложен подход за анализ, управление и оптимизация на технологичния процес на електроовлажняване при високо постоянно напрежение, като се изучава неговото насочено усложняване, за получаването на полимерни нетъкани нановлакнести структури с контролирана морфология и функционални характеристики, чрез:*

*а – въвеждане на порест влакнест (текстилен) колектор върху повърхността на заземен противоелектроод;*

*б – управление на разпределението на електрическото поле върху повърхността на текстилния колектор чрез изменение на размерите и геометрията на заземенния противоелектроод;*

*в – предварително директно повърхностно плазмено химично активизиране (функционализиране) на порестия влакнест колектор.*

Постигането на тази цел е насочено към преодоляване на ограниченията, свързани с емпиричния характер на настройването на процеса на електроовлажняване, чрез използване на систематичен анализ на влиянието на основните технологични параметри, прилагане на методи за планиране и статистическа обработка на експериментите, както и разработване на математически модели и софтуерни инструменти за подпомагане на инженерни решения.

### **Научна новост**

Научната новост на дисертационния труд се изразява в следното:

**1. Предложена и експериментално апробирана е методологична рамка** за изследване на процеса електроовлажняване, базирана на интегриран подход, включващ планиране на експериментите, статистически анализ, математическо моделиране и оптимизация на технологичните параметри.

**2. Изследвана и експериментално доказана е приложимостта на порести влакнести колектори** при процеса електроовлажняване, като е показана възможност за директно формиране на функционални влакнести слоеве в рамките на една технологична операция.

**3. Предложен и експериментално проверен е подход за интегриране на процеса електроовлажняване с плазмено химично повърхностно активизиране при атмосферно налягане**, използвано като допълнителен технологичен етап за модификация на повърхността на порести влакнести колектори и подобряване на условията за отлагане на влакнестата структура.

### **Практическа приложимост**

Като практическа реализация на разработения подход е създаден софтуерен инструмент за инженерна оптимизация на процеса електроовлажняване, който подпомага избора на технологични параметри и съкращава времето за настройване на процеса при разработване на нови влакнести материали. Получените резултати показват, че предложената методология е приложима както в лабораторни, така и в пилотни условия и създава предпоставки за по-ефективно внедряване на електроовлажняването в реални технологични схеми.

### **Апробация**

Практическата приложимост на разработения подход е проверена чрез експериментални изследвания на процеса на електроовлажняване, реализирани върху лабораторна установка. Експерименталната апробация е проведена чрез серии от целенасочено планирани експерименти (англ.: *Design of Experiments*), които позволяват анализ на влиянието на основните технологични фактори: приложено електрическо напрежение, разстояние между електродите и свойства на полимерния разтвор върху морфологията и характеристиките на получените влакнести структури. Изследвано е електроовлажняване на полимерни разтвори на поливинилов алкохол (PVA), включително двуконпонентни системи (PVA и алое вера), както и отлагане на влакна върху различни типове колектори – метални и порести влакнести текстилни колектори. Анализирани са параметри като диаметър на влакната, маса и площ на отложения влакнест мат. Допълнително е изследвано влиянието на плазмена повърхностна обработка при атмосферно налягане върху свойствата на получените влакнести материали и взаимодействието им с използваните подложки. Получените експериментални резултати са използвани за разработване на математически зависимости и за определяне на препоръчителни технологични режими на процеса електроовлажняване.

### **Публикации**

Основните резултати и постижения на дисертационния труд са публикувани в 3 научни статии, от които 1 самостоятелна, в сборници от международни конференции на IEEE, индексирани в Web of Science и Scopus. Резултатите от изследването са представени на 3 международни научни конференции, от които 2 проведени в България и 1 в чужбина. Към момента на изготвяне на автореферата публикациите по дисертационния труд са получили 2 цитирания в издания, индексирани в WoS и Scopus, като едното е в списание от първи квартал (Q1) на WoS, което показва научната актуалност и разпознаваемост на получените резултати.

### **Структура и обем на дисертационния труд**

Дисертационният труд е в обем от **183** страници, като включва увод, 4 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък

на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **188** литературни източници, като **186** са на латиница и **2** на кирилица, а останалите представляват интернет адреси. Работата включва общо **55** фигури и **24** таблици. Номерата на фигурите и точките от главите в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

## **II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

---

### **ГЛАВА I. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР**

#### **1.1. Същност на процеса на електроовлакняване**

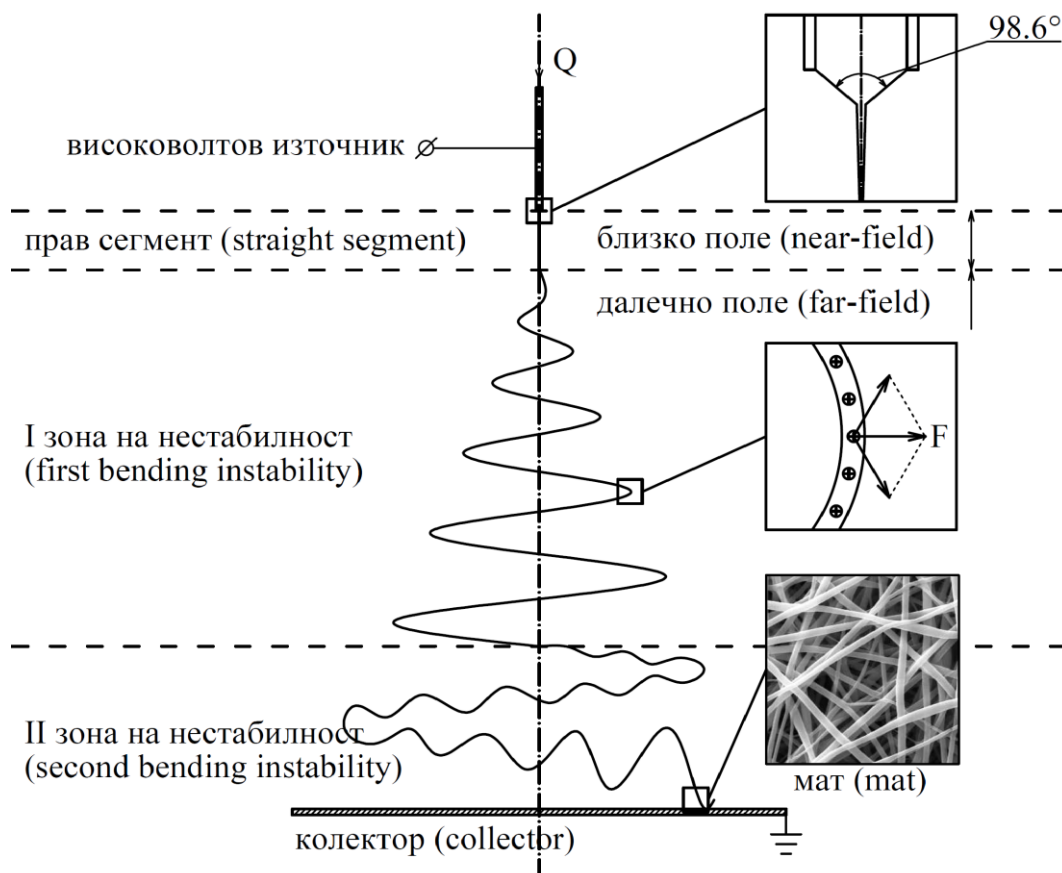
Електроовлакняването представлява електрохидродинамичен технологичен процес за получаване на ултрафини (микро и нано) влакна, при който под въздействието на силно електрическо поле се формира непрекъснатата струя от полимерен разтвор [1]. Физичната същност на процеса на електроовлакняване се определя от сложното взаимодействие между елестростатичните сили, повърхностното напрежение на течността, вискозните сили и инерционните ефекти [1], [6].

В резултат на това взаимодействие на силите на границата течност–въздух се формира характерна структура, известна като конус на Тейлър. Конусът на Тейлър представлява характерна конусообразна форма, която електропроводима течност приема под въздействието на външно електрическо поле, когато елестростатичните сили достигнат стойности, сравними с капилярните сили, породени от повърхностното напрежение. Формирането на този конус е ключов етап в процеса на електроовлакняване, тъй като именно от върха на конуса се инициира електрически заредената струя, водеща до образуване на ултрафини влакна [1], [7].

Иницирането на електрически заредена струя от върха на конуса на Тейлър настъпва при достигане на критична стойност на приложеното електрическо напрежение. При това условие елестростатичните сили, действащи върху повърхността на течността, превишават капилярните сили, породени от повърхностното напрежение. В резултат равновесието между тези сили се нарушава и от върха на конуса се формира устойчива струя, което бележи началото на процеса на електроовлакняване, Фиг. [1], [13], [14].

От гледна точка на технологичната реализация, процесът на електроовлакняване се характеризира с висока чувствителност към параметрите на полимерния разтвор или стопилката, към електрическите и геометричните параметри на апаратната конфигурация, както и към условията на околната среда [2], [12]. Дори малки отклонения в концентрацията, вискозитета, електрическата проводимост, приложеното напрежение или разстоянието между конуса на Тейлър и колектора могат да доведат до съществени промени в стабилността на процеса

и морфологията на получените влакна. Това определя електроовлажняването като сложен многофакторен процес, при който постигането на възпроизводими и контролируеми резултати изисква задълбочен анализ, моделиране и оптимизация [8], [9].



**Фиг. 2. Електроовлажняване с използване на игла (needle electrospinning) и стационарен колектор**

В съвременните технологични реализации на процеса на електроовлажняване концепцията за конуса на Тейлър намира приложение не само при класическите иглени системи, но и при многоиглени и безиглени конфигурации. В тези случаи върху повърхността на полимерния разтвор или върху елементите на спинерета се формират множество локални „конуси на Тейлър“, чиято стабилност и взаимодействие определят производителността и качеството на получените влакна [10], [11], [12]. Това обуславя необходимостта от задълбочено разбиране и контрол на условията за формиране на конуса на Тейлър при различни апаратни конфигурации.

След инициране на електрически заредената струя от върха на конуса на Тейлър, струята се ускорява по посока на електрическото поле и преминава през последователни етапи на развитие, които определят окончателния диаметър, морфологията и структурата на получените ултрафини влакна. Развитието на струята при процеса на електроовлажняване обикновено се разделя на две основни зони: зона

на стабилно линейно движение, наричана прав сегмент (*straight segment*), и зона на нестабилности, характеризираща се със сложни осцилационни и спираловидни движения на струята, Фиг. [1], [13], [15].

Характерът и интензитетът на нестабилностите зависят от редица параметри, включително електрическа проводимост и вискозитет на полимерния разтвор, приложено напрежение, дебит и разстояние от върха на иглата до колектора [16], [17], [21]. При определени условия нестабилностите могат да доведат до прекъсване на струята, образуване на дефекти или до преход към електроразпръскване, особено при нисковискозни или нискомолекулни разтвори [18], [19].

Въпреки че терминът „нестабилност“ предполага нежелано поведение, огъващата нестабилност на струята играе ключова положителна роля в процеса на електроовлажняване. Именно в тази зона се реализира основното разтягане на струята и намаляване на диаметъра на влакната до микро и наноразмери [13], [15]. Контролът върху развитието на нестабилностите е от съществено значение за управлението на морфологията на влакната. Чрез промяна на електрическите параметри, геометрията на апаратната конфигурация и свойствата на полимерния разтвор може да се влияе върху дължината на правия сегмент, началото и интензитета на нестабилностите, както и върху структурата на отложената влакнеста структура [9], [20], [21].

## **1.2. Апарати за електроовлажняване – принципни схеми и технологични реализации**

Класическата принципна схема на апарат за електроовлажняване (Фиг. ) включва капилярна игла, чрез която се подава полимерният разтвор или стопилка с контролиран дебит, метален колектор, разположен на определено разстояние от върха на иглата, и високоволтов захранващ източник, който създава необходимото електрическо поле между върха на иглата и колектора [1], [7]. Под действие на електрическото поле формираните влакна се отлагат върху колектора под формата на нетъкан влакнест слой (структура).



**Фиг. 3. Класическа принципна схема на лабораторен апарат за електроовлакняване с вертикална конфигурация**

### **1.3. Влияние на параметрите върху процеса електроовлакняване – обобщение**

Анализът на литературните източници показва, че факторите, влияещи върху процеса на електроовлакняване, могат да бъдат систематизирани в три основни групи: фактори, свързани със свойствата на полимерния разтвор или стопилка, процесни и електрически фактори, както и фактори на околната среда [9], [16], [19], [20].

#### Фактори, свързани със свойствата на полимерния разтвор или стопилка

Свойствата на полимерния разтвор или стопилка имат определящо значение за възможността за реализиране на устойчив процес на електроовлакняване. Основните параметри в тази група включват молекулната маса на полимера, концентрацията на разтвора, вискозитетът, електрическата проводимост и повърхностното напрежение [20], [22], [23], [24]. Тези параметри определят условията за формиране и стабилност на струята, както и възможността за получаване на непрекъснати влакна.

#### Процесни и електрически фактори

Процесните и електрическите фактори се определят от параметрите на апаратната конфигурация и режима на работа. Към тях се отнасят приложеното напрежение или интензитетът на електрическото поле, дебитът на подаване на полимерния разтвор или стопилка, разстоянието между формиращия елемент и колектора, както и геометрията на апаратната конфигурация [1], [9], [16]. Приложеното напрежение е основен управляващ параметър, който определя формирането на конуса на Тейлър, иницирането на струята и развитието на нестабилностите.

#### Фактори на околната среда

Факторите на околната среда, включително температурата, относителната влажност и съставът на газовата среда, често се подценяват, но оказват съществено влияние върху процеса на електроовлажняване [9], [24], [25]. Температурата влияе върху вискозитета на полимерния разтвор или стопилката и върху скоростта на изпаряване на разтворителя, като повишаването ѝ обикновено води до намаляване на диаметъра на влакната.

## **1.6. Приложение на ултрафини влакна**

Ултрафините влакна, получени чрез процеса на електроовлажняване, намират широко приложение в различни научни и технологични области благодарение на високото отношение повърхност/обем, порьозната структура, възможността за контрол на морфологията и лесната функционализация на влакнестите материали [20], [16], [9].

### **1.6.1. Филтрация и разделителни процеси**

Едно от най-ранните и широко разпространени приложения на ултрафините влакна, получени чрез електроовлажняване, е във филтрационните технологии. Поради малкия диаметър на влакната и високата порьозност на влакнестите структури тези материали демонстрират висока ефективност при улавяне на фини частици, аерозоли, бактерии и вируси при сравнително ниско аеродинамично съпротивление [16], [25], [26]. Такива материали намират приложение във въздушни и течни филтри, защитни маски, индустриални и медицински филтрационни системи. Възможността за контрол на дебелината на влакнестата структура и диаметъра на влакната позволява оптимизиране на компромиса между ефективност на филтрация и енергийни загуби [27], [28].

### **1.6.2. Биомедицински приложения и тъканно инженерство**

Нановлакната, получени чрез електроовлажняване, са особено подходящи за биомедицински приложения поради сходството им със структурата на естествения извънклетъчен матрикс. Те се използват широко като скелети (*scaffolds*) за тъканно инженерство, регенеративна медицина и култивиране на клетки [20], [29].

Възможността за включване на биологично активни вещества, растежни фактори и лекарствени молекули в структурата на влакната позволява създаване на системи за контролирана и таргетна доставка на лекарства. Влакна със структура тип „ядро–обвивка“ (*core-shell*) намират приложение за капсулиране и постепенно освобождаване на активни вещества, като се постига висока ефективност и продължително действие [29], [30].

### **1.6.3. Електротехника, електроника и сензорни системи**

В областта на електротехниката и електрониката ултрафините влакна се използват за разработване на функционални материали с електрически, диелектрични и проводими свойства. Получените влакнести структури могат да се използват като диелектрични бариери, изолационни слоеве, субстрати за гъвкава електроника и носители на проводими или полупроводникови наночастици [31], [32], [33].

Функционализираните нановлакна намират приложение и в сензорни системи за детекция на газове, биомолекули и химични вещества. Голямата специфична повърхност и възможността за повърхностна модификация водят до висока чувствителност и бърза реакция на такива сензори [34], [35].

### **1.6.4. Енергийни приложения**

Ултрафините влакна, получени чрез електроовлажняване, намират все по-широко приложение в енергийни устройства, включително батерии, суперкондензатори и горивни клетки. Те служат като електродни материали, сепаратори или носители на активни вещества, порестата им структура улеснява транспорта на йони и електрони и подобрява електрохимичните характеристики на устройствата. [32], [36], [37].

В литиево-йонните батерии електроовлажнените сепаратори демонстрират подобрена термична стабилност и електрохимични характеристики в сравнение с традиционните материали. В суперкондензаторите нановлакната допринасят за увеличаване на специфичния капацитет и цикличната стабилност [30], [37].

### **1.6.5. Катализа и опазване на околната среда**

Ултрафините влакна намират приложение и в каталитични системи и технологии за опазване на околната среда. Влакнести структури, функционализирани с каталитично активни наночастици, се използват за фотокаталитично разграждане на замърсители, пречистване на въздух и вода, както и в реакции на окисление и редукция [9], [29].

Поради голямата си специфична повърхност електроовлажнените материали осигуряват висока активност и ефективност на каталитичните процеси при сравнително малко количество активен материал.

### **1.6.6. Текстил, композити и защитни материали**

В текстилната и композитната индустрия електроовлажнените ултрафини влакна се използват за създаване на функционални покрития, защитни слоеве и подсилващи елементи. Те намират приложение в защитни облекла, мембрани с бариерни свойства, интелигентни текстилни материали и високоефективни композитни материали [38], [39].

Комбинирането на електроовлакнени слоеве с традиционни текстилни структури позволява създаване на материали с висока добавена стойност и специфични функционални характеристики.

Приложенията на ултрафините влакна, получени чрез електроовлакняване, обхващат широк спектър от области – от биомедицината и филтрацията до електротехниката, енергетиката и технологиите за опазване на околната среда. Общото между тези приложения е възможността за прецизен контрол върху структурата и функционалните свойства на влакнестите материали.

### **Изводи от Глава I**

1. Извършеният литературен обзор показва, че електроовлакняването представлява утвърден електрохидродинамичен технологичен процес за получаване на ултрафини полимерни влакна с микро- и наноразмери, които се характеризират с високо отношение повърхност/обем и добре развита порьозна структура.

2. Физичната същност на процеса се определя от взаимодействието между електростатичните сили, повърхностното напрежение на течността и реологичните свойства на полимерния разтвор, като ключов етап за инициране на процеса е формирането и стабилността на конуса на Тейлър.

3. Анализът на литературните източници показва, че процесът на електроовлакняване е сложен, силно многофакторен и чувствителен към свойствата на полимерния разтвор, електрическите и геометричните параметри на апаратната конфигурация, както и към условията на околната среда.

4. Съществуващите апаратни реализации на електроовлакняването – иглени, многоиглени и безиглени системи – предлагат различни компромиси между производителност, стабилност на процеса и възможности за контрол върху морфологията на получените влакна.

5. Анализът на приложенията на ултрафините влакна показва, че те намират широко приложение в области като филтрация, биомедицина, електротехника, енергийни устройства и технологии за опазване на околната среда, като изборът на технологична конфигурация е тясно свързан с изискванията към крайния материал.

6. Независимо от значителния обем научни изследвания, в литературата все още липсва интегриран подход, който да обединява експериментални изследвания, математическо моделиране и оптимизация на процеса на електроовлакняване, което обуславя необходимостта от разработване на систематичен методологичен подход за анализ и управление на процеса.

Въз основа на направения литературен анализ в следващата глава е разработена методологична рамка за изследване на процеса на

електроовлакняване, базирана на планиране на експериментите, статистически анализ и математическо моделиране.

## **ГЛАВА II. МЕТОДИ ЗА ПРАКТИЧЕСКО РЕШЕНИЕ НА ПОСТАВЕНИТЕ ЗАДАЧИ**

### **2.2. Методологична рамка на изследването**

Технологичният процес на електроовлакняване е сложен, нелинеен и многофакторен, като качеството и характеристиките на получените ултрафини влакна зависят едновременно от свойствата на използвания полимерен разтвор, електрическите фактори, геометрията на апаратната конфигурация и условията на околната среда. Това налага използването на системен и структуриран методологичен подход, който да осигури възпроизводимост на резултатите, ефективно използване на експерименталните ресурси и възможност за последващо моделиране и оптимизация. В рамките на експерименталната методика е използвана и установка за повърхностна обработка със студена технологична плазма при атмосферно налягане, приложена като допълнителен технологичен етап за модификация на порести влакнести колектори.

### **2.3. Методика за планиране на експериментите (DOE - Design of Experiments)**

Процесът на електроовлакняване се характеризира с едновременно влияние на множество технологични фактори, между които често съществуват нелинейни зависимости и взаимодействия. При такива условия използването на класически еднофакторен експериментален метод е неефективно и не позволява адекватно описание на поведението на процеса. В настоящия дисертационен труд е използвана методиката Design of Experiments (DOE) – утвърден статистически инструмент за анализ и оптимизация на многофакторни инженерни процеси, [40].

В рамките на дисертационния труд е избран експериментален план от типа Box–Behnken, който е широко използван при оптимизация на технологични процеси с нелинейно поведение. Плановете от този тип са разработени като ефективна алтернатива на пълните факторни планове за изграждане на квадратични регресионни модели в рамките на методологията на „отговор на повърхностите“ (RSM - *Response Surface Methodology*) [41].

Изборът на дизайна Box–Behnken е направен съзнателно и целенасочено, като са отчетени спецификите на процеса на електроовлакняване и ограниченията, свързани с неговата стабилност и възпроизводимост. За разлика от пълния факторен план, при който броят на експериментите нараства експоненциално с увеличаване на броя на факторите, дизайнът Box–Behnken позволява значително редуциране на експерименталния обем при запазване на възможността за моде-

лиране на нелинейни зависимости чрез квадратичен регресионен модел [41], [42].

## **2.7. Информационен и системен подход при анализа на процеса на електроовлажняване**

Процесът на електроовлажняване представлява сложна инженерна система, при която технологичните параметри, експерименталните данни, математическите модели и оптимизационните алгоритми са тясно взаимосвързани. Анализът и управлението на такъв процес изискват не само прилагане на отделни методи, но и изграждане на цялостен системен и информационен подход, който да осигури последователност, проследимост и интеграция между отделните етапи на изследването [43].

В настоящия дисертационен труд електроовлажняването се разглежда като информационна система, в която експерименталните данни служат като вход за статистически анализ, математическо моделиране и оптимизация, а получените резултати се използват за обратна връзка и усъвършенстване на технологичните режими.

Системният подход, възприет в дисертационния труд, се основава на ясно дефиниран информационен поток, който обхваща следните основни етапи:

1. Събиране на експериментални данни – резултати от планирани експерименти, проведени при контролирани условия;
2. Предварителна обработка и структуриране на данните – проверка за коректност, елиминиране на груби грешки и стандартизиране на данните;
3. Статистически анализ – оценка на значимостта на факторите и идентифициране на основните зависимости;
4. Математическо моделиране – изграждане на модели, описващи поведението на процеса на електроовлажняване;
5. Оптимизация – определяне на оптимални или Парето-оптимални режими на работа;
6. Обратна връзка и валидация – експериментална проверка и корекция на моделите.

Тази последователност осигурява систематичен преход от сурови експериментални данни към практически приложими решения за управление на процеса на електроовлажняване [44].

Възприетият системен подход позволява разглеждане на процеса на електроовлажняване като затворен цикъл с обратна връзка, при който резултатите от оптимизацията се използват за коригиране на технологичните параметри и подобряване на стабилността и качеството на процеса. Това създава предпоставки за постепенно усъвър-

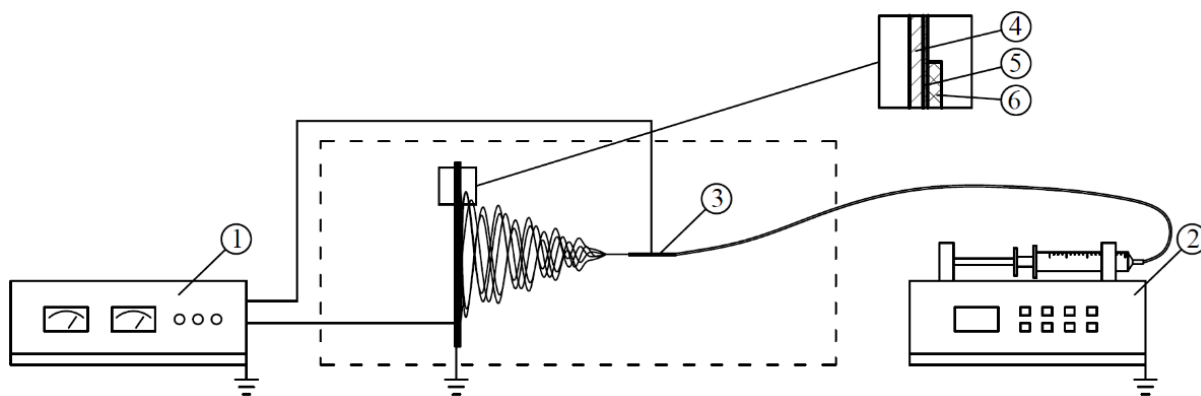
шенстване на моделите и за разработване на инструменти за подпомагане на управлението и автоматизацията на процеса [45].

## 2.8. Лабораторен апарат за електроовлакняване

Лабораторният апарат за електроовлакняване, използван в настоящия дисертационен труд, представлява стандартна експериментална система, предназначена за реализиране на технологичния процес при контролирани условия. Апаратът е използван като инструмент за реализиране на експерименталната методика и за осигуряване на входни данни за математическото моделиране и оптимизацията на процеса.

Лабораторният апарат за електроовлакняване включва следните основни функционални елементи, Фиг. , [1], [46], [47], [48]:

- високоволтов източник на постоянно напрежение;
- система за подаване на полимерния разтвор под налягане при постоянен обемен поток - инфузионна помпа и медицинска спринцовка;
- капилярна тръбичка – затъпена куха медицинска игла;
- колектор за отлагане на произведените ултрафини полимерни влакна и формообразуване на влакнестата нетъкана структура (мат, скафолд, подложка);
- механична система за позициониране на електроовлакнителя.



**Фиг. 5. Лабораторен апарат за електроовлакняване: 1 – високоволтов зарядващ източник на постоянно напрежение, 2 – инфузионна помпа, 3 – игла, 4 – изолационна основа, 5 – алуминиево фолио (изпълняващ ролята на заземен противоелектрод), 6 – порест влакнест колектор**

Принципът на работа на апарата се основава на създаване на силно електрическо поле между изхода на капилярната игла и колектора, което води до формиране на конус на Тейлър и инициране на течна струя при процеса на електроовлакняване. Геометрията на системата и електрическите параметри се задават предварително и се поддържат постоянни по време на експериментите, освен в случаите, когато са предмет на планирано изследване в рамките на DOE подхода.

Параметрите на лабораторния апарат (напрежение, дебит на разтвора, разстояние върх на иглата–колектор и др.) се разглеждат като контролируеми входни фактори в експерименталната методика. Те не се оптимизират на хардуерно ниво, а се използват като променливи величини в рамките на планираните експерименти.

### **Изводи към Глава II**

1. В глава II е разработена и обоснована методологична рамка за изследване на процеса на електроовлажняване, съчетаваща планиране на експериментите, статистически анализ, математическо моделиране и оптимизация.

2. Използването на методологията Design of Experiments (DOE) позволява ефективно изследване на влиянието на основните технологични параметри и техните взаимодействия при намален експериментален обем и висока статистическа надеждност.

3. Приложените статистически методи осигуряват обективна оценка на значимостта на факторите и адекватността на изградените модели, като създават основа за последваща оптимизация на процеса.

4. Математическото моделиране и оптимизационните методи са разгледани като взаимосвързани инструменти за анализ и подобряване на технологичния процес.

5. Изграденият системен и информационен подход осигуряват логическа последователност и интеграция между отделните етапи на изследването и създава предпоставки за надеждна експериментална апробация и практическа приложимост на получените резултати.

### **ГЛАВА III. АПАРАТИ, МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ И УПРАВЛЕНИЕ НА ПРОЦЕСА НА ЕЛЕКТРООВЛАКНЯВАНЕ**

На основата на методологичния подход, разработен в Глава II, са получени експериментални данни, които са използвани за математическо моделиране и анализ на процеса на електроовлажняване.

В рамките на настоящия дисертационен труд е извършена целенасочена обработка и анализ на експериментални данни, получени при контролирани лабораторни условия. За разлика от съществуващите изследвания, които разглеждат отделни параметри или частични модели, в настоящата работа е приложен системен подход за предварителна обработка, структуриране и подготовка на данните с цел последващо математическо моделиране и оптимизация.

В рамките на дисертационния труд е разработен и софтуерен инструмент за анализ и оптимизация на процеса на електроовлажняване, реализиран на програмния език Python. Софтуерът интегрира експериментални данни, математически модели и оптимизационни алгоритми и подпомага инженерния избор на технологични параметри.

### 3.1.2. Генетично програмиране

Генетичното програмиране е разгледано като приложен метод за извличане на нелинейни зависимости и структурни модели от данни, без да се цели разработване на нови алгоритми или програмни реализации.

При голям брой на независимите променливи  $x_1, x_2, \dots, x_m$  зависимостта  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  може да бъде опростена чрез оценка на значимостта на променливите (*Feature Evaluation*), подбор на съществени променливи (*Feature Selection*) и генериране на нови зависимости, например чрез генетично програмиране (*Genetic Programming*) [49]. В настоящия дисертационен труд генетичното програмиране се използва като надграждащ метод спрямо класическата регресия, с цел автоматично извличане на нелинейни и интерпретируеми зависимости от експерименталните данни за процеса на електроовлажняване. Генетичното програмиране е особено подходящо в случаите, когато класическите регресионни модели не осигуряват достатъчна точност на описанието.

### 3.1.3. Индустриални математически модели

Един от основните проблеми при разработването на индустриални математически модели, особено в химическата индустрия и биотехнологиите, е необходимостта от намаляване на общата стойност на притежание (*TCO – Total Cost of Ownership*). Тя включва разходите за създаване на математическия модел, както и разходите за неговото поддържане, калибриране и адаптиране към променящите се производствени условия. Един от ефективните подходи за решаване на този проблем е използването на **хибридни модели**, които съчетават опростен параметричен модел, базиран на физични принципи, с емпирични методи за оценка на неизвестните параметри.

### Изводи към Глава III

1. В глава III са представени резултати от аналитична обработка, математическо моделиране и инженерна интерпретация на данни, свързани с процеса на електроовлажняване. Получените резултати установяват връзка между експерименталните наблюдения и управляемите технологични параметри и създават основа за последваща експериментална апробация.

2. Регресионният анализ и генетичното програмиране са използвани като допълващи се подходи за моделиране и прогнозиране на зависимостите между основните технологични параметри и характеристиките на получените ултрафини влакна. Показана е тяхната приложимост при описание на сложния многофакторен характер на процеса.

3. Анализът на индустриални математически модели позволява позициониране на разработените подходи в контекста на реални произ-

водствени и инженерни системи и демонстрира възможностите за тяхната практическа интеграция.

4. Морфологията на получените ултрафини полимерни влакна е разгледана като ключов качествен и количествен показател при анализа, моделирането и оптимизацията на процеса, а не само като резултат от експерименталното изследване.

5. Разработен е подход за осигуряване, структуриране и подготовка на експериментални данни, който създава предпоставки за надеждно математическо моделиране, оптимизация и софтуерна реализация на инженерните решения. В рамките на дисертационния труд е разработен и софтуерен инструмент (*Electrospinning Designer 1.0*) за оптимизация на процеса на електроовлакняване, реализиран на програмния език Python, който интегрира експериментални данни, математически модели и оптимизационни алгоритми за подпомагане на инженерния избор на технологични параметри.

6. Разработеният софтуерен инструмент *Electrospinning Designer 1.0* за оптимизация и предложената концепция за контрол и автоматизация демонстрират възможността за интеграция на модели, данни и алгоритми в единна инженерна рамка за подпомагане управлението и оптимизацията на процеса на електроовлакняване.

В обобщение, глава III формира теоретичната и методологичната основа за експерименталните изследвания, оптимизацията и автоматизацията на процеса на електроовлакняване, представени в следващата глава на дисертационния труд.

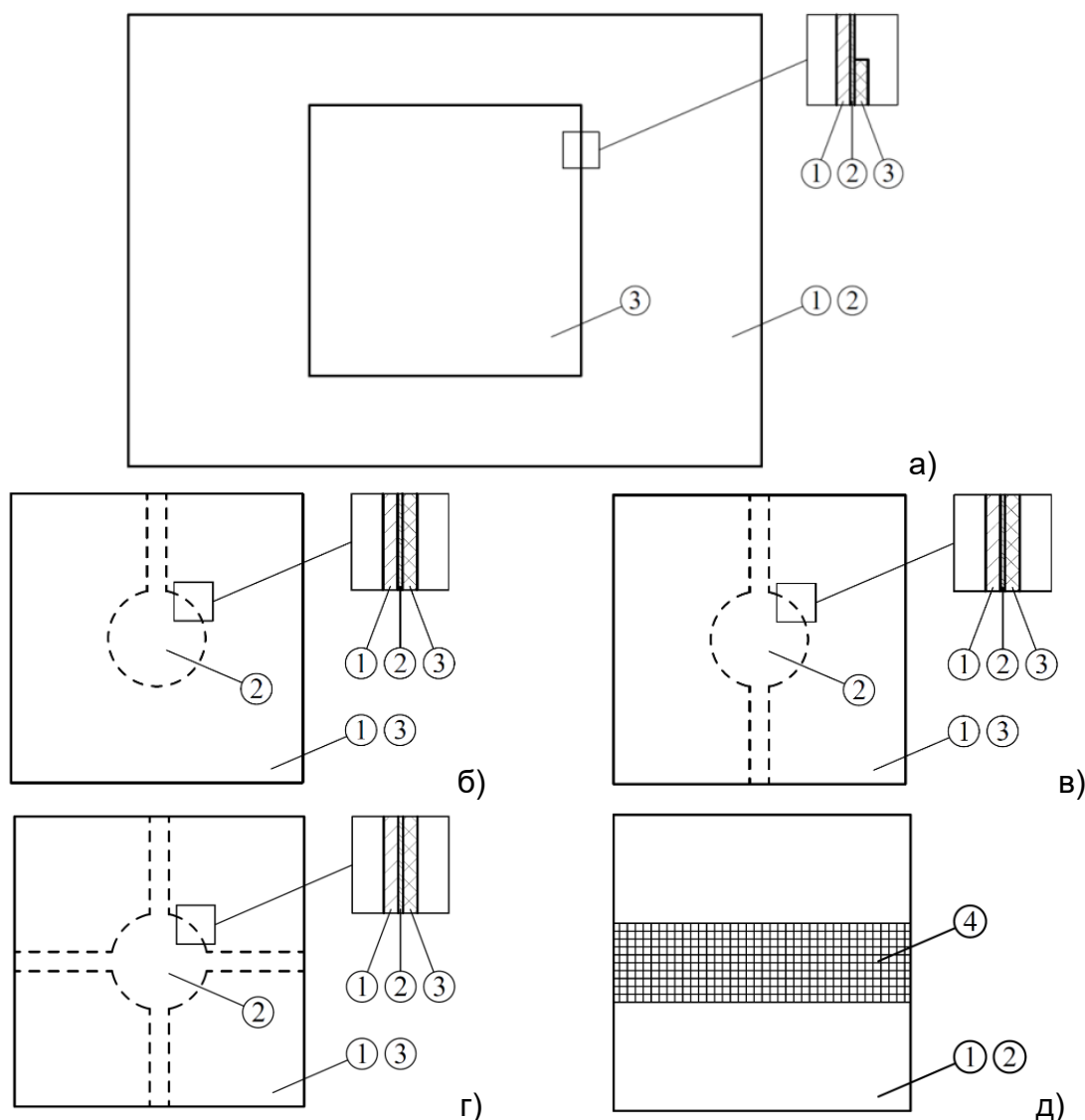
В Глава III са разработени и анализирани модели, методи и инженерни решения за обработка на данни, моделиране, оптимизация и подпомагане на управлението на процеса на електроовлакняване. Представените резултати формират аналитичната и софтуерна основа за практическото приложение на разработените подходи.

Разработените модели и аналитични зависимости изискват експериментална проверка. Поради това в Глава IV е представена експериментална апробация на процеса на електроовлакняване и валидиране на предложените подходи.

## **ГЛАВА IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АПРОБАЦИЯ И АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ**

За експерименталната апробация е използван полимер поливинилов алкохол (PVA), който е един от най-често прилаганите материали при електроовлакняване поради благоприятната комбинация от физикохимични и технологични свойства. В допълнение са проведени и експериментални изследвания с двукомпонентен полимерен разтвор PVA/алое вера с цел оценка на влиянието на биологично активни добавки върху процеса на електроовлакняване и морфологията на получените влакна. Добавянето на алое вера води до изменение на елект-

рофизичните свойства на разтвора и съответно оказва влияние върху диаметъра и структурата на получените нановлакна.



**Фиг. 20. Порести влакнести колектори, разположени върху метален противоелектрод: 1 – изолационна основа; 2 – алуминиево фолио; 3 – порест влакнест (текстилен) колектор с размери 15 x 15 cm; 4 – порест влакнест колектор, представляващ полимерна мрежа): а) тип 1; б) тип 2; в) тип 3; г) тип 4; д) порест влакнест колектор полимерна мрежа в комбинация с метален противоелектрод**

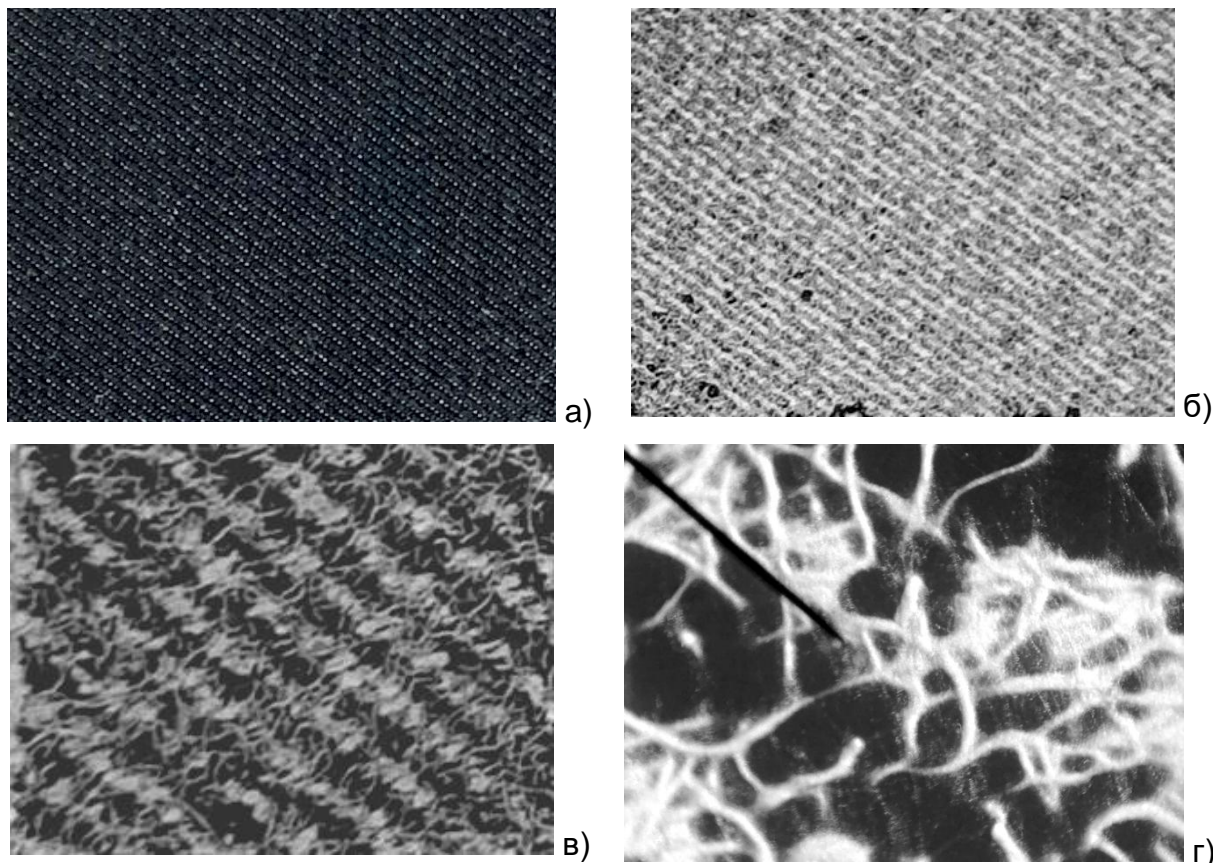
Анализът на получените резултати е насочен към изследване на влиянието на основните технологични фактори върху морфологията и характеристиките на получените влакна и влакнести структури, както и към оценка на ефекта от допълнителни технологични обработки.

Проведени са експериментални изследвания с използване на два типа порести влакнести колектори и лабораторния апарат за електроовлажняване, Фиг. :

- порест влакнест колектор от текстилен материал, разположен върху работната повърхност на заземен противоелектрод. Конфигу-

рацията „колектор-заземен противоелектрод“ е показана на Фиг.а-г [50];

- метален колектор в комбинация с полимерна мрежа с потенциални приложения във филтри, мембрани, текстилна промишленост, тъканно инженерство и 3D принтиране. Конфигурациите на този тип колектори са показани на Фиг.д.



**Фиг. 21. Формиране на нетъкани влакнести структури върху текстилен материал: а) структура на текстил тип „Деним“, лицева част; б), в), г) структура на отложени нановлакна върху текстил тип „Деним“ при различно увеличение**

Изборът на тези конфигурации позволява систематично изследване на ефекта от геометрията и диелектричните свойства на подложката върху процеса на електроовлажняване.

Характерна особеност, произтичаща от нееднородността на електрическото поле в областта на порестия влакнест колектор, е формирането на структури (клъстър, групи) от ултрафини влакна. Това се наблюдава при всички използвани порести влакнести колектори от текстилен материал. Формираните структури върху 100 % памучен текстил тип „Деним“ са показани на Фиг. .

### **Предварителен експеримент 01**

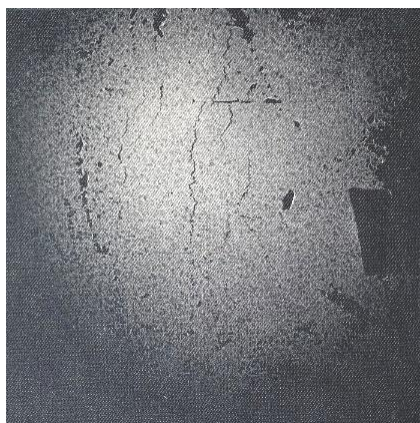
Експеримент 01 е предварително (скрининг) изследване, насочено към анализ на поведението на процеса на електроовлажняване при

гранични условия на много висока електропроводимост на полимерния разтвор и приложено високо електрическо напрежение. Полимерният разтвор PVA (9%) се характеризира с изключително висока електропроводимост ( $G = 621 \mu S/cm$ ) и сравнително нисък вискозитет ( $\mu = 185 cP$ ), което създава предпоставки за силно електростатично разтягане на струята и повишена нестабилност на процеса.

Морфологичният анализ проведен, чрез SEM (Фиг. в, г) показва наличие на множество вретеновидни образувания, разклонения с голяма площ и локални разкъсвания на влакната. Наблюдава се формиране на странични струи и значителна нееднородност на влакнестата структура, което е характерно за процеси с доминиращо електростатично взаимодействие. Атомно-силова микроскопия (AFM), представена на Фиг. б, потвърждава неравномерната повърхностна топография на влакнестата структура и наличие на локални натрупвания, свързани с непълно изсъхване на влакната при отлагането им върху колектора.

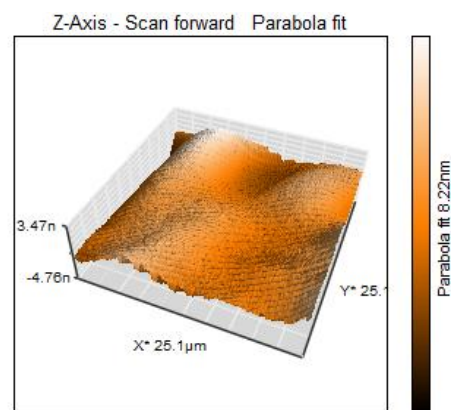
Статистическата обработка на диаметъра на влакната показва среден диаметър  $d_m = 251.94 \text{ nm}$  при стандартно отклонение  $\sigma = 102.82 \text{ nm}$  и коефициент на вариация  $CV = 40.81\%$  (Фиг. г), което показва силно неустойчив режим на електроовлажняване. Получената стойност на  $CV$  значително надвишава приетия праг за устойчив процес ( $CV < 20\%$ ) и потвърждава наличието на значителни флуктуации в диаметъра на влакната. Средният брой дефекти достига 11 бр. (pcs)/10 000  $\text{nm}^2$ , като доминиращи са вретеновидните образувания и разкъсванията.

Основната причина за наблюдаваната нестабилност е комбинацията от висока електропроводимост и нисък вискозитет на разтвора, което води до нестабилност на конуса на Тейлър и неконтролируемо развитие на струята. Допълнителен неблагоприятен фактор е ниската околна температура, която забавя изпаряването на разтворителя и увеличава вероятността от формиране на дефекти. Използваният порест влакнест колектор от текстилен материал ("Деним", лицева страна) създава силно неравномерно електрическо поле в областта на колектора, което допълнително усилва разклоненията и локалните напрежения във влакнестата структура.

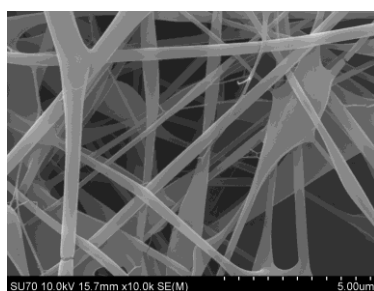
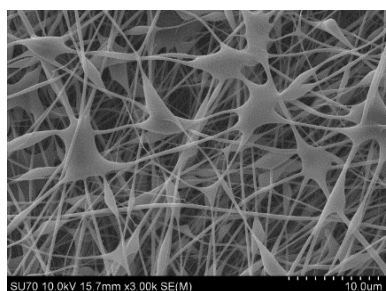


а)

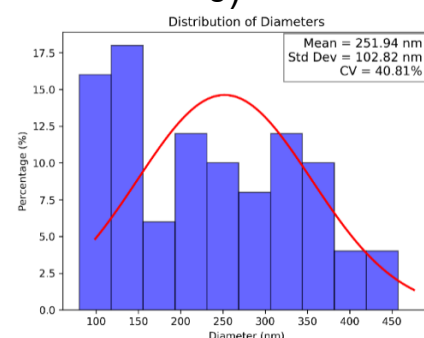
полимерен разтвор:  
 PVA 9%  
 $U_{es} = 25 \text{ kV}$   
 $H = 20 \text{ cm}$   
 игла 22G



б)



в)



г)

**Фиг. 23. Морфология и статистически анализ на електроовлакнени влакна – Експеримент 01: а) фотографско изображение на влакнестата структура; б) 3D реконструкция на повърхностната топография, получена от AFM анализ; в) SEM изображения на влакнестата структура при увеличение  $\times 3\ 000$  и  $\times 10\ 000$ ; г) хистограма на разпределението на диаметъра на влакната.**

Качеството на получените влакна при този експеримент може да се оцени като ниско до средно, поради доминиращите морфологични дефекти и високата нееднородност на диаметъра. Въпреки това Експеримент 01 има съществена стойност като референтен граничен случай, който ясно демонстрира, че при електропроводимост на разтвора над  $G = 600 \mu\text{S}/\text{cm}$  процесът на електроовлакняване става силно неустойчив, дори при относително висока концентрация на полимера.

Получените резултати служат като основа за определяне на работните диапазони на факторите при последващите експерименти, насочени към намаляване на електропроводимостта, повишаване на вискозитета и стабилизиране на процеса.

#### **4.4. Плазмена химична повърхностна активация (функционализиране) при атмосферно налягане като допълнителен технологичен етап при електроовлакняване**

Плазменото обработване със студена технологична плазма при атмосферно налягане се разглежда като утвърден метод за повърхностна модификация на полимерни материали, при който се променят свойствата на повърхностния слой (повърхностна енергия, омекряне и

адхезионни характеристики), без да бъдат засегнати обемните свойства на материала [51], [52], [53]. В сравнение с традиционните химични методи плазменото третиране представлява „сух“ процес, който не изисква използване на органични разтворители и позволява добра управляемост чрез избор на плазмен източник и режим на обработка [53], [54].

Наблюденията показват, че плазмената обработка може съществено да промени повърхностните свойства на порестия влакнест колектор от текстилен материал и да повлияе на взаимодействието между колектора и отложената нановлакнеста структура.

#### **Изводи към Глава IV**

1. В глава IV е реализирана експериментална апробация на процеса на електроовлажняване чрез целенасочено планирани серии от експерименти, позволяващи оценка на влиянието на основните технологични параметри върху количествените и качествените характеристики на получените нановлакнести материали.

2. Проведените експерименти потвърждават, че изборът и управлението на работните параметри на процеса са критични за формирането и стабилността на отложената влакнеста структура. Наблюдаваните изменения в показателите са в съответствие с многофакторния характер на процеса.

3. При електроовлажняване на двукомпонентен полимерен разтвор PVA/алое вера е установена отчетлива зависимост между електрофизичните свойства на разтвора (в частност електрическата проводимост), приложеното напрежение  $U_{es}$  и получените количествени показатели – диаметър на нановлакната и маса на влакнестата структура. Това потвърждава същественото значение на състава на полимерния разтвор за управлението на процеса.

4. Плазмената обработка със студена технологична плазма при атмосферно налягане е приложена като допълнителен технологичен етап за повърхностна модификация, включително предварителна активация на порест влакнест колектор. Подходът подобрява условията за отлагане и адхезия на влакнестата структура и ограничава електростатичното натрупване, като разширява възможностите за практическо приложение на получените електроовлажнени материали.

5. При оптимизацията на процеса с разтвор на PVA (10%) върху плосък колектор е установено, че разстоянието между върха на иглата и колектора  $H$  оказва определящо влияние върху площта на отлагане  $S_{mat}$ . За масата на отложената влакнеста структура  $m_{mat}$  статистически значими са както разстоянието  $H$ , така и приложеното напрежение  $U_{es}$ .

6. Изградените регресионни модели  $m_{mat} = f(U_{es}, H)$ ,  $S_{mat} = f(U_{es}, H)$  са статистически значими и осигуряват аналитична основа за прогнозиране на тенденциите и подпомагане избора на работни режими в рам-

ките на изследваните диапазони. По този начин се подобрява инженерната настройка и повторяемостта на процеса.

В обобщение, резултатите от Глава IV демонстрират практическата приложимост на разработената методология (планиране, анализ и моделиране) за контролирано формиране на нановлакнести материали и създават основа за формулиране на приложни препоръки, свързани с оптимизация и технологично усъвършенстване на процеса на електроовлакняване.

Получените експериментални резултати и извършеният анализ позволяват формулиране на научно-приложните и приложните приноси на дисертационния труд.

## **НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ**

Научно-приложните приноси на дисертационния труд са свързани с разширяване и систематизиране на знанията за технологичния процес на електроовлакняване и с прилагането им за решаване на конкретни инженерни задачи.

1. Разработена и апробирана е методология за изследване на процеса на електроовлакняване, базирана на планиране на експерименти (Design of Experiments, DoE), статистически анализ и моделиране на зависимостите между технологичните фактори на процеса (входни параметри) и морфологичните характеристики на получените влакна (изходни параметри), като диаметър на влакната и структурни особености на влакнестата структура. Методологията отчита съвместното влияние на електрическите, реологичните и геометричните параметри върху морфологията и структурата на получените ултрафини полимерни влакна.

2. Предложен е подход за интегриране на процеса на електроовлакняване със студена технологична плазма при атмосферно налягане, като допълнителен технологичен етап за повърхностна активация на порестия влакнест колектор и подобряване на условията за отлагане на влакнестата структура.

3. Изследвана е приложимостта на порести влакнести колектори при електроовлакняване и е установено, че геометрията и конфигурацията на колектора влияят върху разпределението на електрическото поле и морфологията на получените влакна, което позволява директно формиране на функционални влакнести слоеве в една технологична операция.

4. Разработени са статистически регресионни модели за прогнозиране на процеса на отлагане при електроовлакняване, описващи зависимостта между входните технологични фактори, като приложено напрежение  $U_{es}$  и разстояние игла–колектор  $H$  и изходните параметри на получената влакнеста структура –  $m_{mat}$  и площ  $S_{mat}$ . Получените зависимости осигуряват аналитична основа при избора на работни

режими на електроовлакняване, както и за последваща оптимизация на технологичния процес.

### **ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ**

Приложните приноси на дисертационния труд са насочени към създаване на практически използвани технологични решения и инструменти за инженерната практика.

1. Разработен е софтуерен инструмент за оптимизация на процеса на електроовлакняване, подпомагащ избора на работни режими чрез използване на експериментални данни и модели.

2. Създадена е работна схема за структуриране и обработка на експериментални данни, подходяща за многофакторен анализ, моделиране и интеграция с оптимизационни алгоритми.

3. Разработен е подход за получаване на нетъкана нановлакнеста структура чрез електроовлакняване на двукомпонентен полимерен разтвор PVA/алое вера, при който е установена възможност за управление на параметрите на структурата – чрез регулиране на входните фактори: приложеното напрежение  $U_{es}$  и електрическата проводимост на разтвора.

4. Разработени са практически насоки за избор на работни режими при електроовлакняване на PVA (10%) върху плосък колектор, базирани на регресионни зависимости между масата  $m_{mat}$  и площта  $S_{mat}$  на произведената ултрафина влакнеста структура, като функции на приложеното напрежение  $U_{es}$  и разстоянието между електродите игла-колектор  $H$ , валидни в рамките на изследваните области на изменение на параметрите.

5. Предложени са технологични решения за усъвършенстване на процеса на електроовлакняване, включващи използване на различни конфигурации на колектори (вкл. порести влакнести колектори), интегриране на студена технологична плазма при атмосферно налягане и концепция за контрол и автоматизация на процеса на електроовлакняване.

### **СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ И ЗАБЕЛЯЗАНИТЕ ЦИТИРАНИЯ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

[1] M. Shopov, "Electrical Process Parameters of Electrospinning," in *2024 16th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria: IEEE, Sep. 2024, pp. 1–6. doi: 10.1109/BulEF63204.2024.10794870.

Цитираща статия:

Y. N. Hendri et al., “Current Perspectives and Potential Trends of Metal-Organic Framework Nanofibers,” *J Inorg Organomet Polym*, vol. 35, no. 12, pp. 9655–9678, Dec. 2025, doi: 10.1007/s10904-025-03919-w, Цитира се под № 75 (indexed in Scopus and WoS, Q1)

[2] M. D. Shopov and D. N. Gospodinova, “Modelling and Optimization of Electrospinning Process Parameters,” in *2025 60th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*, Ohrid, North Macedonia: IEEE, Jun. 2025, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEST66328.2025.11098356.

Цитираща статия:

V.-T. Nguyen and T. K. Nguyen, “Studying the effects of parameters on fiber diameter during an electrospinning process using the Taguchi method,” *Int J Interact Des Manuf*, Jan. 2026, doi: 10.1007/s12008-025-02484-3, Цитира се под № 21 (Indexed in WoS and Scopus)

[3] D. Gospodinova and M. Shopov, “Influence of Collector Geometry on the Morphology of Electrospun Fibers,” in *2025 19th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Sofia, Bulgaria: IEEE, Jun. 2025, pp. 1–5. doi: 10.1109/ELMA65795.2025.11083458.

## СПИСЪК НА ИЗПОЛЗВАНАТА В АВТОРЕФЕРАТА ЛИТЕРАТУРА

[1] J. Xue, T. Wu, Y. Dai, and Y. Xia, “Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications,” *Chem. Rev.*, vol. 119, no. 8, pp. 5298–5415, Apr. 2019, doi: 10.1021/acs.chemrev.8b00593.

[2] Q. Gao, S. Agarwal, A. Greiner, and T. Zhang, “Electrospun fiber-based flexible electronics: Fiber fabrication, device platform, functionality integration and applications,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 137, p. 101139, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101139.

[3] Y. Si, S. Shi, and J. Hu, “Electrospinning and electrospraying synergism: Twins-tech collaboration across dimensions,” *Matter*, vol. 7, no. 4, pp. 1373–1405, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.matt.2024.01.009.

[4] “Electrospun Fibers Market Size, Share & Growth Report 2030.” Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electrospun-fibers-market-report>

[5] “Patented needle-free Nanospider™ technology | Elmarco.” Accessed: Jan. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.elmarco.com/nanospider>

[6] T. Lin, *Fundamentals of electrospinning & electrospun nanofibers*, 1st edition. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc, 2016.

- [7] “Disintegration of water drops in an electric field,” *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, vol. 280, no. 1382, pp. 383–397, Jul. 1964, doi: 10.1098/rspa.1964.0151.
- [8] Y. Huang, Y. Li, Y. Zhang, H. Yu, and Z. Tan, “Near-field electrospinning for 2D and 3D structuring: Fundamentals, methods, and applications,” *Mater. Today Adv.*, vol. 21, p. 100461, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.mtadv.2023.100461.
- [9] Y. Guo, X. Wang, Y. Shen, K. Dong, L. Shen, and A. A. A. Alzalab, “Research progress, models and simulation of electrospinning technology: a review,” *J. Mater. Sci.*, vol. 57, no. 1, pp. 58–104, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10853-021-06575-w.
- [10] É. J. Beaudoin, M. M. Kubaski, M. Samara, R. J. Zednik, and N. R. Demarquette, “Scaled-Up Multi-Needle Electrospinning Process Using Parallel Plate Auxiliary Electrodes,” *Nanomaterials*, vol. 12, no. 8, p. 1356, Apr. 2022, doi: 10.3390/nano12081356.
- [11] T. D. Nguyen, S. Roh, M. T. N. Nguyen, and J. S. Lee, “Structural Control of Nanofibers According to Electrospinning Process Conditions and Their Applications,” *Micromachines*, vol. 14, no. 11, p. 2022, Oct. 2023, doi: 10.3390/mi14112022.
- [12] I. Partheniadis, I. Nikolakakis, I. Laidmäe, and J. Heinämäki, “A Mini-Review: Needleless Electrospinning of Nanofibers for Pharmaceutical and Biomedical Applications,” *Processes*, vol. 8, no. 6, p. 673, Jun. 2020, doi: 10.3390/pr8060673.
- [13] R. Asmatulu and W. S. Khan, *Synthesis and applications of electrospun nanofibers*. in Micro & nano technologies series. Kidlington, Oxford Cambridge, MA: Elsevier, 2019.
- [14] J.-H. He, Ed., *Electrospun nanofibres and their applications*. Shawbury: iSmithers, 2008.
- [15] L. M. Valencia-Osorio, M. L. Aguiar, and M. L. Álvarez-Láinez, “Electrospinnability and Air Filtration Efficiency of PVDF Nanofibers: The Role of Electrospinning Solution Properties,” *J. Appl. Polym. Sci.*, p. e56613, Dec. 2024, doi: 10.1002/app.56613.
- [16] N. Aminu *et al.*, “Applications of nanofibers drug delivery system in cancer therapy,” *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 90, p. 105128, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jddst.2023.105128.
- [17] J.-H. He, Y. Wu, and W.-W. Zuo, “Critical length of straight jet in electrospinning,” *Polymer*, vol. 46, no. 26, pp. 12637–12640, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.polymer.2005.10.130.
- [18] I. Alghoraibi and S. Alomari, “Different Methods for Nanofiber Design and Fabrication,” in *Handbook of Nanofibers*, A. Barhoum, M. Bechelany, and A. Makhoulf, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 1–46. doi: 10.1007/978-3-319-42789-8\_11-2.
- [19] R. Abdulhussain, A. Adebisi, B. R. Conway, and K. Asare-Addo, “Electrospun nanofibers: Exploring process parameters, polymer selec-

- tion, and recent applications in pharmaceuticals and drug delivery,” *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 90, p. 105156, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jddst.2023.105156.
- [20] M. Afshari, *Electrospun nanofibers*. in Woodhead publishing series in textiles, no. number 186. Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing, 2017.
- [21] S. V. Fridrikh, J. H. Yu, M. P. Brenner, and G. C. Rutledge, “Controlling the Fiber Diameter during Electrospinning,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, no. 14, p. 144502, Apr. 2003, doi: 10.1103/PhysRevLett.90.144502.
- [22] R. Bhattarai, R. Bachu, S. Boddu, and S. Bhaduri, “Biomedical Applications of Electrospun Nanofibers: Drug and Nanoparticle Delivery,” *Pharmaceutics*, vol. 11, no. 1, p. 5, Dec. 2018, doi: 10.3390/pharmaceutics11010005.
- [23] A. Keirouz *et al.*, “The History of Electrospinning: Past, Present, and Future Developments,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 8, no. 11, p. 2201723, Jun. 2023, doi: 10.1002/admt.202201723.
- [24] P. M. Silva, S. Torres-Giner, A. A. Vicente, and M. A. Cerqueira, “Management of Operational Parameters and Novel Spinneret Configurations for the Electrohydrodynamic Processing of Functional Polymers,” *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 307, no. 5, p. 2100858, May 2022, doi: 10.1002/mame.202100858.
- [25] S. Suresh, A. Becker, and B. Glasmacher, “Impact of Apparatus Orientation and Gravity in Electrospinning—A Review of Empirical Evidence,” *Polymers*, vol. 12, no. 11, p. 2448, Oct. 2020, doi: 10.3390/polym12112448.
- [26] P. Nuamcharoen, T. Kobayashi, and P. Potiyaraj, “Influence of volatile solvents and mixing ratios of binary solvent systems on morphology and performance of electrospun poly(vinylidene fluoride) nanofibers,” *Polym. Int.*, vol. 70, no. 10, pp. 1465–1477, Oct. 2021, doi: 10.1002/pi.6218.
- [27] A. Ghosh, J. T. Orasugh, S. S. Ray, and D. Chattopadhyay, “Integration of 3D Printing—Coelectrospinning: Concept Shifting in Biomedical Applications,” *ACS Omega*, vol. 8, no. 31, pp. 28002–28025, Aug. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c03920.
- [28] J. Xu, C. Sun, X. Zhang, Q. He, and Y. Yu, “Investigation into the role of electrospinning nanofiber technology based on controlled magnetic-electric field,” *J. Magn. Mater.*, vol. 622, p. 172991, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jmmm.2025.172991.
- [29] J. Xing, M. Zhang, X. Liu, C. Wang, N. Xu, and D. Xing, “Multi-material electrospinning: from methods to biomedical applications,” *Mater. Today Bio*, vol. 21, p. 100710, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.mtbio.2023.100710.
- [30] B. A. Chinnappan, M. Krishnaswamy, H. Xu, and M. E. Hoque, “Electrospinning of Biomedical Nanofibers/Nanomembranes: Effects of Pro-

- cess Parameters,” *Polymers*, vol. 14, no. 18, p. 3719, Sep. 2022, doi: 10.3390/polym14183719.
- [31] M. Sivan *et al.*, “AC electrospinning: impact of high voltage and solvent on the electrospinnability and productivity of polycaprolactone electrospun nanofibrous scaffolds,” *Mater. Today Chem.*, vol. 26, p. 101025, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.mtchem.2022.101025.
- [32] J. Valtera *et al.*, “Fabrication of dual-functional composite yarns with a nanofibrous envelope using high throughput AC needleless and collectorless electrospinning,” *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, p. 1801, Feb. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-38557-z.
- [33] B. Farkas, A. Balogh, A. Farkas, G. Marosi, and Z. K. Nagy, “Frequency and waveform dependence of alternating current electrospinning and their uses for drug dissolution enhancement,” *Int. J. Pharm.*, vol. 586, p. 119593, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijpharm.2020.119593.
- [34] K. Li *et al.*, “Solution electrospinning with a pulsed electric field,” *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 135, no. 15, p. 46130, Apr. 2018, doi: 10.1002/app.46130.
- [35] Y. Al Saif and R. Cselkó, “Revolutionizing Electrospinning: A Review of Alternating Current and Pulsed Voltage Techniques for Nanofiber Production,” *Processes*, vol. 13, no. 7, p. 2048, Jun. 2025, doi: 10.3390/pr13072048.
- [36] T. Kalous *et al.*, “The effect of frequency change on the alternating current electrospinning of polyamide 6 and its productivity,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 11, no. 2, p. 109543, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jece.2023.109543.
- [37] A. Al-Abduljabbar and I. Farooq, “Electrospun Polymer Nanofibers: Processing, Properties, and Applications,” *Polymers*, vol. 15, no. 1, p. 65, Dec. 2022, doi: 10.3390/polym15010065.
- [38] Y. Cho, J. W. Baek, M. Sagong, S. Ahn, J. S. Nam, and I. Kim, “Electrospinning and Nanofiber Technology: Fundamentals, Innovations, and Applications,” *Adv. Mater.*, vol. 37, no. 28, p. 2500162, Jul. 2025, doi: 10.1002/adma.202500162.
- [39] U. Ali, Y. Zhou, X. Wang, and T. Lin, “Direct electrospinning of highly twisted, continuous nanofiber yarns,” *J. Text. Inst.*, vol. 103, no. 1, pp. 80–88, Jan. 2012, doi: 10.1080/00405000.2011.552254.
- [40] R. Sukowati *et al.*, “Optimization of electrospinning process parameters using Box-Behnken design for Nylon-6 nanofibers fabrication,” *Mater. Today Proc.*, p. S2214785324001329, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.matpr.2024.03.009.
- [41] M. P. Iwundu and J. Cosmos, “The Efficiency of Seven-Variable Box-Behnken Experimental Design with Varying Center Runs on Full and Reduced Model Types,” *J. Math. Stat.*, vol. 18, no. 1, pp. 196–207, Jan. 2022, doi: 10.3844/jmssp.2022.196.207.

- [42] L. Liu *et al.*, “Analysis and optimization of electrospinning parameters for fabricating thermoplastic polyurethanes (TPU) nanofibers by response surface methodology,” *Express Polym. Lett.*, vol. 18, no. 8, pp. 807–818, 2024, doi: 10.3144/expresspolymlett.2024.60.
- [43] J. C. Earnshaw, E. G. Johnson, B. J. Carroll, and P. J. Doyle, “The Drop Volume Method for Interfacial Tension Determination: An Error Analysis,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 177, no. 1, pp. 150–155, Jan. 1996, doi: 10.1006/jcis.1996.0015.
- [44] J.-R. Riba and B. Esteban, “A simple laboratory experiment to measure the surface tension of a liquid in contact with air,” *Eur. J. Phys.*, vol. 35, no. 5, p. 055003, Sep. 2014, doi: 10.1088/0143-0807/35/5/055003.
- [45] J. Skrivanek, P. Holec, O. Batka, M. Bilek, and P. Pokorný, “Optimization of the Spinneret Rotation Speed and Airflow Parameters for the Nozzleless Forcespinning of a Polymer Solution,” *Polymers*, vol. 14, no. 5, p. 1042, Mar. 2022, doi: 10.3390/polym14051042.
- [46] F. J. Davis, S. D. Mohan, and M. A. Ibraheem, “Chapter 1. Introduction,” in *Polymer Chemistry Series*, G. R. Mitchell, Ed., Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2015, pp. 1–21. doi: 10.1039/9781849735575-00001.
- [47] D. Gospodinova, N. Todorov, and M. Neznakomova, “Design Modifications in Electrospinning Setup for Medical Patches,” in *2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, Varna, Bulgaria: IEEE, Sep. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/BulEF51036.2020.9326079.
- [48] Ari Kurniawan Saputra, “An ultra-low-cost and adjustable in-house electrospinning machine to produce polymer nanofibers.” Mendeley, Jan. 10, 2022. doi: 10.17632/VZMD24HZHM.1.
- [49] A. K. Kordon, *Applying Data Science: How to Create Value with Artificial Intelligence*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-36375-8.
- [50] D. Gospodinova and M. Shopov, “Influence of Collector Geometry on the Morphology of Electrospun Fibers,” in *2025 19th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Sofia, Bulgaria: IEEE, Jun. 2025, pp. 1–5. doi: 10.1109/ELMA65795.2025.11083458.
- [51] S. Thomas, Ed., *Non-thermal plasma technology for polymeric materials: applications in composites, nanostructured materials and biomedical fields*. Cambridge, MA: Elsevier, 2019.
- [52] K. K. Nath, P. Kundu, G. A. Ahmed, and R. Biswas, “Surface modification of electrospun gelatin/PVA nanofibers via dielectric barrier discharge plasma for enhanced mechanical properties,” *Eur. Phys. J. Plus*, vol. 139, no. 9, p. 836, Sep. 2024, doi: 10.1140/epjp/s13360-024-05632-y.
- [53] M. Bertin, E. M. Leitao, S. Bickerton, and C. J. R. Verbeek, “A review of polymer surface modification by cold plasmas toward bulk functional-

zation,” *Plasma Process. Polym.*, vol. 21, no. 5, p. 2300208, May 2024, doi: 10.1002/ppap.202300208.

- [54] K. G. Kostov, T. M. C. Nishime, A. H. R. Castro, A. Toth, and L. R. O. Hein, “Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 314, pp. 367–375, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.apsusc.2014.07.009.

## **SUMMARY**

### **Technological Processes and Apparatus for Electrospinning**

**Momchil Shopov**

The aim of this dissertation is to investigate the analysis, modelling, and optimization of the electrospinning process for the production of ultrafine polymer fibers with controlled morphology and functional properties.

The electrospinning process has become one of the most versatile and effective technologies for producing micro- and nanofibers characterized by a high surface-to-volume ratio, adjustable porosity, and tunable structural properties. These characteristics enable the development of functional fibrous materials with applications in filtration, biomedical engineering, electronics, energy systems, environmental protection, and advanced textile materials. Despite the significant research progress in this field, electrospinning remains highly sensitive to multiple technological parameters, and the optimization of operating conditions is still largely based on empirical approaches.

The main objective of the dissertation is to develop and apply an integrated scientific and engineering approach for the analysis, control, and optimization of the electrospinning process operating under high DC voltage. Special attention is given to the directed modification of the process through the use of porous fibrous collectors, the control of electric field distribution by modifying the geometry of the grounded electrode, and the integration of plasma-chemical surface activation of the collector.

A methodological framework has been developed that combines design of experiments (DOE), statistical analysis, mathematical modeling, and optimization techniques. Experimental investigations were performed using a laboratory electrospinning system, where key process parameters such as applied voltage, solution flow rate, and needle–collector distance are systematically varied. Polyvinyl alcohol (PVA) solutions are used as a base polymer system for the experimental studies.

The dissertation also applies regression analysis and genetic programming to identify nonlinear relationships between technological parameters and fiber morphology. A software tool for process analysis and optimization has been developed, supporting engineering decision-making and reducing the time required for process adjustment.

Experimental validation confirms the applicability of the proposed methodological approach under laboratory conditions. The results demonstrate that the developed framework enables systematic analysis, improved control of fiber morphology, and effective optimization of the electrospinning process, creating favorable conditions for its practical implementation in technological and industrial applications.